ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ
Том 66, книга 1, 2016

VII-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2015“

19 - 21 септември 2015 г., Созопол, България

PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
Volume 66, Issue 1, 2016

VII-th CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING “EF 2015”

September 19 - 21, 2015, Sozopol, Bulgaria

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. дтн Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. дтн Елена ШОЙКОВА

членове

проф. дтн Георги ПОПОВ
проф. дтн Иван КОРОБКО
проф. дфн Иван УЗУНОВ
проф. дтн Иван ЯЧЕВ
проф. дтн Кети ПЕЕВА
проф. дтн Ганчо БОЖИЛОВ
проф. д-р Бончо БОНЕВ
проф. д-р Евелина ПЕНЧЕВА
проф. д-р Иво МАЛАКОВ
проф. д-р Младен ВЕЛЕВ
проф. д-р Огнян НАКОВ

секретар-организатор

инж. Мария ДУХЛЕВА

EDITORIAL BOARD

Editor -in -Chief

Prof. D.Sc. Emil NIKOLOV

Editor -in -Vice -Chief

Prof. D.Sc. Elena SHOYKOVA

Editors

Prof. D.Sc. Georgi POPOV
Prof. D.Sc. Ivan KOROBKO
Prof. D.Sc. Ivan UZUNOV
Prof. D.Sc. Ivan YATCHEV
Prof. D.Sc. Keti PEEVA
Prof. D.Sc. Gantcho BOJILOV
Prof. Ph.D. Boncho BONEV
Prof. Ph.D. Evelina PENCHEVA
Prof. Ph.D. Ivo MALAKOV
Prof. Ph.D. Mladen VELEV
Prof. Ph.D. Ognyan NAKOV

Organizing Secretary

Eng. Maria DUHLEVA

Технически университет-София
София 1000, бул."Кл. Охридски" 8
България http://tu-sofia.bg

Technical University of Sofia
Sofia, 1000, boul. Kliment Ohridski 8
Bulgaria http://tu-sofia.bg

© Технически Университет-София
© Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

форум
„ДНИ НА НАУКАТА НА ТУ-СОФИЯ“ Созопол’2015

VII-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2015“

19 - 21 септември 2015 г., Созопол, България

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

председател

проф.	дтн	**Иван**	**Ячев**

членове

доц.	д-р	**Вълчан**	**Георгиев**
доц.	д-р	**Ангел**	**Цолов**
доц.	д-р	**Петър**	**Наков**
доц.	д-р	**Георги**	**Тодоров**
проф.	дтн	**Илиана**	**Маринова**
доц.	д-р	**Валентин**	**Колев**
доц.	д-р	**Светлана**	**Цветкова**
доц.	д-р	**Ивайло**	**Долапчиев**
проф.	дтн	**Ганчо**	**Божилов**

Научен секретар

доц.	д-р	**Николай**	**Матанов**

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Forum
„DAYS OF SCIENCE OF TU-SOFIA“ Sozopol’2015

VII-th CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING “EF 2015”

September 19 - 21, 2015, Sozopol, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEE

chair of PC

Prof. DSc **Ivan Yatchev**

members of PC

Assoc. Prof. PhD **Vulchan Gueorgiev**

Assoc. Prof. PhD **Angel Tzolov**

Assoc. Prof. PhD **Peter Nakov**

Assoc. Prof. PhD **Georgi Todorov**

Prof. DSc **Iliana Marinova**

Assoc. Prof. PhD **Valentin Kolev**

Assoc. Prof. PhD **Svetlana Tzvetkova**

Assoc. Prof. PhD **Ivaylo Dolapchiev**

Prof. DSc **Gantcho Bojilov**

scientific secretary

Assoc. Prof. PhD **Nikolay Matanov**

СЪДЪРЖАНИЕ том 66, книга 1

ЕЛЕКТРОТЕХНИКА

1. **Пламен Ризов, Вълчан Георгиев** **19**
   Влияние на режима на възбуждане на турбогенератори върху устойчивата работа на собствените нужди

2. **Вълчан Георгиев, Пламен Ризов** **29**
   Изследване на възможностите за резервиране на шини СН, захранващи мощни помпени агрегати

3. **Димо Стоилов, Иван Загорски** **37**
   Методи за оценяване преноса на електроенергия

4. **Рад Станев, Емил Рачев, Любен Кръстев, Илия Маджаров, Цветомир Асенов, Иво Домишлярски, Кристиан Иванов** **47**
   Физически модел на хидроагрегат за изследване на преходни процеси и устойчивост на ЕЕС

5. **Теодора Терентева, Димо Стоилов, Никола Николов, Иван Загорчев** **57**
   Управление на електропотреблението в европейския съюз

6. **Борислав Бойчев** **67**
   Компенсиране на капацитивната мощност в електроснабдяването на интегрираната система за наблюдение по границата с република Турция

7. **Реджеп Шакири, Везир Реджепи, Димитър Богданов** **73**
   Анализ на проект за присъединяване на нови генератори към електроразпределителната система в област Витня

8. **Петко Петков, Димитър Димитров** **83**
   Оценка компонентите на пълната мощност и електрическите загуби в електроенергийните системи при наличие на смущения от несиметрии и висши хармоници

9. **Иван Петров, Георги Стойчев, Георги Димитров** **93**
   Определяне енергийните показатели на генератор за „Браунов газ”

10. **Иван Петров** **101**
    Оптимизирани тягови задвижвания на електрически транспортни средства

11. **Георги Павлов, Тодор Лалев, Явор Исаев, Любомир Секулов, Мартина Томчева** **111**
    Проектиране и изграждане на товарно устройство за конвенционални и цифрови релейни защити

12. **Георги Павлов, Явор Исаев, Любомир Секулов, Мартина Томчева** **119**
    Проектиране и изграждане на стенд за изследване на трифазни DC/AC инвертори

13. **Радослав Спасов, Пламен Ризов, Цветомир Стоянов, Виктор Захариев** **127**
    Изследване на вида на статорната намотка на синхронна машина с постоянни магнити за постигане на максимална енергийна ефективност

14. **Радослав Спасов, Пламен Ризов, Виктор Захариев, Цветомир Стоянов** **137**
    Разпределителни трансформатори за фотоволтаични електроцентрали

15. **Светлана Цветкова, Ангел Петлешков, Георги Жегов, Ваня Петрова** **145**
Изследване на качеството на електрическата енергия в електроснабдителна система ниско напрежение

16. **Светлана Цветкова** **155**
Непрекъснатост на електроснабдяването в разпределителна мрежа средно напрежение

17. **Румен Киров, Никола Македонски, Владимир Чиков, Николай Найденов, Илиян Илиев** . **165**
Изследване възможностите за минимизиране на дисперсионната съставяща на загубите на мощност и елелктроенергия в рудник „Трояново 2“

18. **Димо Стоилов, Веселина Трашлиева**. **171**
Модел за оптимално използване на обратимите агрегати в електроенергийни системи Част I: математическо описание

19. **Веселина Трашлиева, Димо Стоилов**. **181**
Модел за оптимизация използването на обратимите агрегати в електроенергийни системи част II:алгоритъм за решение, примерни резултати и анализ

20. **Милко Йовчев, Пламен Цанков**. . . . . **191`**
Оптимизация на формата на леща на lED осветител за вътрешно осветление с аксиална симетрия на светлоразпределението

21. **Ива Петринска, Дилян Иванов**. **201**
Методи за оценка на количествените и качествените показатели на дневната естествена светлина

22. **Христо Василев, Станимир Стефанов**. **211**
Изследване на възможностите за приложение на фотоволтаични улични осветители

23. **Станимир Стефанов** **217**
Осветяване на автобусни спирки

24. **Захари Иванов**. **225**
Разработване на методика за измерване на вътрешни осветителни уредби

25. **Захари Иванов** **235**
Ергономична уредба за изследвания на вътрешни осветителни уредби с различни лампи

26. **Ганчо Божилов, Емил Рац, Михо Михов** **241**
Изследване на пусковия процес на еднофазен синхронен двигател чрез обобщената теория на електрическите машини

27. **Емил Соколов** **249**
Влияние на демпферната намотка върху хармониците в напрежението на явнополюсен синхронен генератор

28. **Гаврил Гаврилов**. **259**
Начини за подобряване на въртящия момент на монофазни асинхронни електродвигатели

29. **Михо Михов, Емил Рачев, Адриан Иванов** 267
Сравнение на преходни режими при пускане на постояннотокови двигатели с последователно възбуждане и възбуждане с постоянни магнити посредством числени модели

30. **Иван Лалов, Иван Петров** 277
Изследване на психофизическите показатели на локомотивните машинисти и тяхното влияние върху енергийната ефективност на железопътните превози с електрическа тяга

31. **Георги Тодоров, Божидар Стоев** 285
Изследване на пулсациите на момента на синхронни двигатели с възбуждане от постоянни магнити

32. **Георги Тодоров, Божидар Стоев** 295
Влияние на ширината на феромагнитното ребро върху параметрите и пулсациите на момента на синхронни двигатели с възбуждане от постоянни магнити

33. **Свилен Стоянов** 305
Изследване на методите за повишаване на метрологичните параметри и характеристики на двустранен честотен тензопреобразувател

34. **Даниел Добрилов, Ангел Цолов** 315
Регулатор на честотата на въртене на ПТД

35. **Иван Миленов, Васил Димитров, Румен Баев, Венцислав Станков** 321
Модулно задвижване за електромобил

36. **Васил Димитров, Иван Миленов** 329
Подобряване характеристиките на лабораторен симулатор при изпитания на асинхронно задвижване

37. **Валентин Матеев, Мигленна Тодорова, Илиана Маринова** 337
Моделиране на електромагнитна система с тороидален ферит

38. **Иван Ангелов, Петър Матов, Николай Матанов** 345
Алгоритъм за тягови изчисления при електрически влаков подвижен състав

39. **Иван Ангелов, Петър Матов** 351
Анализи на тягов ток при локомотиви с асинхронни тягови двигатели

40. **Валентин Колев, Васил Шуманов** 357
Марковски модели за оценка на надеждността при различни стратегии за резервиране

41. **Валентин Колев, Васил Шуманов** 367
Оценка на надеждността и интервалите на основните ремонт на трансформаторите от русловите водноелектрически централи от ВЕЦ „Своге”

42. **Васил Шуманов** 375
Събиране и обработка на информация за надеждността на функциониране на русловите водноелектрически централи от ВЕЦ „Своге”

43. **Нели Харизанова, Димитър Богданов** 385
Защити на фотоволтаични централи

44. **Мартин Златков** 395
Методи за управление, контрол и защита на малки ветрогенератори

45. **Захари Зарков, Людмил Стоянов, Иван Бачев, Владимир Лазаров** 401
Изследване на синхронен генератор за ВЕПС с различни DC-DC преобразуватели

46. **Николай Матанов, Харалан Пенев** 411
Алгоритъм за избор на пасивни филтри за висши хармоници

47. **Илко Търпов** 421
Аналитично изследване на разхода за електроенергия в БДЖ-товарни превози и методи за неговото ограничаване

48. **Пламен Цанков, Милко Йовчев** 427
Анализ на чувствителността на технико-икономическите показатели при модернизация на осветителна уредба с LED осветители

49. **Станимир Стефанов** 435
Осветяване на железопътни гари и спирки

50. **Захари Иванов, Виктор Манов** 443
Приложение на светловоди с надлъжна светеща ивица за осветление на специални вътрешни осветителни уредби

51. **Захари Иванов, Владимир Шаламанов** 451
Светлинна терапия

52. **Захари Иванов** 461
Изследване на психофизиологичното въздействие и ергономичните и светлотехнически показатели на осветителни уредби с натриеви лампи високо налягане

53. **Пламен Ризов, Самуил Александров** 471
Тримерен топлинен модел на двускоростен асинхронен двигател за средно напрежение

54. **Самуил Александров, Пламен Ризов** 479
Тримерен електромагнитен анализ на двускоростен асинхронен двигател за средно напрежение

55. **Калинка Тодорова** 489
Изследване на затихването в различни направления на вихровите токове в плоски среди при импулсно възбуждане

56. **Стефчо Гунински** 497
Анализ на ефективността на информационни параметри на изходния сигнал на импулсен ВТП, свързани с площи

57. **Калинка Тодорова** 505
Изследване на формата на вихровите токове при импулсно възбуждане в плоски проводящи среди

58. **Росен Танев, Валентин Матеев, Илиана Маринова** 511
Конструктивни характеристики на вакуумни прекъсвачи за високо напрежение

59. **Ивайло Долапчиев** 519
Изследване на влиянието на отместването върху изходния сигнал на вихровотоков преобразувател с перпендикулярни намотки

60. **Валентин Матеев, Райна Ценева, Емил Мечков, Иван Ячев** 527
Моделиране на електромагнитно поле на активната част на маслен трансформатор с МКЕ

61. **Иван Костов, Стефчо Гунински** 533
Източници на електромагнитно поле с некласическа форма за магниторезистивни сензори с мостови схеми на свързване

62. **Йоско Балабозов, Кръстьо Хинов, Николай Стоименов, Станислав Гьошев, Димитър Карастоянов** 541
Изследване на движението на електромагнит за брайлов екран чрез високоскоростна камера

63. **Иван Хаджиев, Диан Маламов, Иван Ячев** 549
Изследване на влиянието на силата върху контактното съпротивление между медни шини

64. **Емилия Димитрова** 557
Съвременни методи за безразрушителен контрол на състоянието на кабелни линии

65. **Кръстю Кръстев, Радка Кръстева** 567
Повишаване ефективността на модул за широчинно импулсна модулация

66. **Кръстю Кръстев, Радка Кръстева** 573
Разпределение на загубите при висока скорост в асинхронен двигател с кафезен ротор

67. **Николай Матанов, Снежана Димитрова** 579
Модел на електроснабдителна система с променлива структура и електрически товари

68. **Николай Матанов, Снежана Димитрова** 589
Формализирано математическо описание на структурата и товарите на електроснабдителна система

69. **Анелия Терзова** 597
Влияние на съпротивителната сила на ферофлуид върху характеристиките на електромагнит за задвижване

70. **Емилия Димитрова** 607
Апаратура за безразрушителен контрол на състоянието на кабелни линии

71. **Росен Танев, Валентин Матеев, Илиана Маринова** 615
Динамични характеристики на вакуумен прекъсвач за високо напрежение

CONTENTS volume 66, Issue 1

ELECTRICAL ENGINEERING

1. Plamen Rizov, Vultchan Gueorgiev 19
Influence of the Regime of Excitement of the Turbo-Generators on the Stable Work of the Own Needs Supply

2. Vultchan Gueorgiev, Plamen Rizov 29
Study of the Possibility for Backup Power Supply Changeover on Medium Voltage Busses, Supplying Power Pump Aggregates

3. Dimo Stoilov, Ivan Zagorchev 37
Methods for Electricity Transmission Pricing

4. Rad Stanev, Emil Rachev, Lyuben Krastev, Iliya Madzharov, Tsvetomir Asenov, Ivo Domishlyarski, Kristian Ivanov 47
Physical Model of Hydraulic Turbine Generator Unit for Transient Processes and Power System Stability Studies

5. Teodora Terenteva, Dimo Stoilov, Nikola Nikolov, Ivan Zagorchev 57
Demand Side Management in European Union

6. Borislav Boychev 67
Capacitive Electric Power Compensation in Electric Supply of Integrated Monitoring System in the Border with Republic of Turkey

7. Rexhep Shaqiri, Vezir Rexhepi, Dimitar Bogdanov 73
Case Study of Connection of New Generators to the Electrical Distribution System of Vitia

8. Petko Petkov, Dimitar Dimitrov 83
Assessment of the Apparent Power Components and Electrical Losses in Power Systems in the Presence of Disturbances by Load Unbalance and Harmonics

9. Ivan Petrov, Georgi Stoychev, Georgi Dimitrov 93
Determination of Energy Performance of "Brown's Gas" Generator

10. Ivan Petrov 101
Optimised Traction Drives of Electric Vehicles

11. Georgi Pavlov, Todor Lalev, Iavor Isaev, Lubomir Sekulov, Martina Tomcheva 111
Design and Building Load Device for Conventional and Digital Relay Protection System

12. Georgi Pavlov, Iavor Isaev, Lubomir Sekulov, Martina Tomcheva 119
Design and Building Bench for the Study of Three-Phase DC/AC Inverters

13. Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Tsvetomir Stoyanov, Victor Zahariev 127
Research of the Stator Winding Type's of Synchronous Machine with Permanent Magnets to Achievement Maximum Energy efficiency

14. Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Victor Zahariev, Tsvetomir Stoyanov 137
Distributing Transformer for Photovoltaic Power Stations

15. Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov, Georgi Zhegov, Vania Petrova 145
Study of the Electrical Energy Quality in Electrical Supply System Low Voltage

16. Svetlana Tzvetkova 155
Electrical Supply Without Interruptions in Medium Voltage Distribution Net

17. Rumen Kirov, Nikola Makedonski, Vladimir Chikov, Nikolay Naydenov, Ilian Iliev 165
Study of Opportunities for the Dispersion Component Minimizing of the Power and Energy Losses in Mine Troyanovo 2

18. Dimo Stoilov, Vesselina Trashlieva 171
Optimal Operation Model of the Storage Capacities in Electric Power Systems Part I: Mathematical Model

19. Vesselina Trashlieva, Dimo Stoilov 181
Optimal Operation Model of the Storage Capacities in Electric Power Systems Part II: Solution Algorithm, Results and Analysis

20. Milko Yovchev, Plamen Tsankov 191
Optimization of the Lens Shape of LED Luminaire for Interior Lighting with Axial Symmetry of the Light Distribution

21. Iva Petrinska, Dilian Ivanov 201
Methods for Estimation of the Quality and Quantiy of the Natural Daylight

22. Hristo Vasilev, Stanimir Stefanov 211
Research of the Possibilities for Application of Photovoltaic Street Luminaires

23. Stanimir Stefanov 217
Lighting at Bus Stops

24. Zahari Ivanov 225
Developing a Methodology for Measuring Interior Lighting Systems

25. Zahari Ivanov 235
Ergonomic System for Research of Interior Lighting Systems with Various Lamps

26. Gantcho Bojilov, Emil Ratz, Miho Mihov 241
Study of the Starting process of Single Phase Synchronous Motor by Means of Generalized Theory of Electrical Machines

27. Emil Sokolov 249
Damper Winding Influence on the Voltage Harmonics of Salient-Pole Synchronous Generator

28. Gavril Gavrilov 259
Methods of Improving Torque of Single Phase Asynchronous Motors

29. Miho Mihov, Emil Rachev, Adrian Ivanov 267
Numerical Models Comparison of Transitional Regimens for DC Motor with Coherent Excitation and Excitation of Permanent Magnets

30. Ivan Lalov, Ivan Petrov 277
Study of Psycho Physical Indicators of Train Drivers and their Impact on the Energy Efficiency of Rail Transportation with Electric Traction

31. George Todorov, Bozhidar Stoev 285
Analysis of Torque Ripples of Permanent Magnet Exited Synchronous Motors

32. George Todorov, Bozhidar Stoev 295
Influence of Ferromagnetic Rib width on the Parameters and Torque Ripple of Interior Permanent Magnet Motors

33. Svilen Stoyanov 305
Research Methods of Enhancing the Metrological Parameters and Characteristics of Bidirectional Frequency Strain Gauges Converter

34. Daniel Dobrilov, Angel Tsolov 315
Speed Controller for DC Motor

35. Ivan Milenov, Vasil Dimitrov, Rumen Baev, Vencislav Stankov 321
Modular Drive for Electric Vehicle

36. Vasil Dimitrov, Ivan Milenov 329
Improving Performance of Laboratory Simulator During Asynchronous Drive Tests

37. Valentin Mateev, Miglenna Todorova, Iliana Marinova 337
Computer Modeling of an Electromagnetic System with a Toroidal Ferrite

38. Ivan Angelov, Peter Matov, Nikolay Matanov 345
Algorithm for Traction Calculations at Electrical Train Rolling Stock

39. Ivan Angelov, Peter Matov 351
Analysis of Traction Current in Locomotives with Asynchronous Traction Motors

40. Valentin Kolev, Vassil Shumanov 357
Markov Models for Reliability Evaluation with Different Reservation Strategies

41. Valentin Kolev, Vassil Shumanov 367
Reliability Valuation and Overhaul Interval of "VEZ Svoge" Run of the River Hydropower Plant Transformers

42. Vassil Shumanov 375
Collecting and Processing of an Information About the Operation Reliability of "VEZ Svoge" Run of the River Hydropower Plant

43. Nelly Harizanova, Dimitar Bogdanov 385
Protections for Photovoltaic Power Plants

44. Martin Zlatkov 395
Methods for Management Control and Protection of Small wind Turbines

45. Zahari Zarkov, Ludmil Stoyanov, Ivan Bachev, Vladimir Lazarov 401
Study of Synchronous Generator for WECS with Different Types of DC-DC Converters

46. Nikolay Matanov, Haralan Penev 411
Algorithm for Selection of Passive Harmonics Filters

47. IlkoTarpov 421
Analytical Research - Electric Energy Consumption in BDZ Cargo-Methods for its Retrench

48. Plamen Tsankov, Milko Yovchev 427
Sensitivity Analysis of the Technical and Economic Indicators in Modernization of a Lighting System with LED Luminaires

49. Stanimir Stefanov 435
Lighting of Railway Stations and Stops

50. Zahari Ivanov, Viktor Manov 443
Using a Hollow Light Guide for Lighting Specific Internal Lighting Systems

51. Zahari Ivanov, Vladimir Shalamanov 451
Light Therapy

52. Zahari Ivanov 461
Study of Influence Psychophysiological and Ergonomic and Lighting Indexes of Lighting Systems with High Pressure Sodium Lamps

53. Plamen Rizov, Samuil Aleksandrov 471
3D Thermal Analysis of Double Speed Induction Motor for Middle Voltage

54. Samuil Aleksandrov, Plamen Rizov 479
3D Electromagnetic Analysis of Double Speed Induction Motor for Middle Voltage

55. Kalinka Todorova 489
Study Attenuation in Different Directions Eddy Current in a Flat Material at Pulse Excitation

56. Stefcho Guninski 497
Analysis of Effectiveness of Area-Related Information Parameters of The Output Signal of Pulse ECT

57. Kalinka Todorova 505
Study of the Form of a Flat Eddy Currents in Conductive Medium at Pulse Excitation

58. Rosen Tanev, Valentin Mateev, Iliana Marinova 511
Constructive Improvements of High Voltage Vacuum Interrupters

59. Ivaylo Dolapchiev 519
An Investigation on the Influence of the Lift-Off Effect on the Output Signal of the Eddy Current Surface Probe with Perpendicular Coils

60. Valentin Mateev, Raina Tzeneva, Emil Mechkov, Ivan Yatchev 527
Electromagnetic Field Modeling of the Active Part of Oil-Immersed Transformer with FEM

61. Ivan Kostov, Stefcho Guninski 533
Nonclassical Shape EMF Sources for Magnetoresistive Sensors in Bridge Circuits

62. Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Nikolay Stoimenov, Stanislav Gioshev, Dimitar Karastoyanov 541
Study of the Motion of a Braille Screen Actuator Using High Speed Camera

63. Ivan Hadzhiev, Dian Malamov, Ivan Yatchev 549
Study of the Influence of the Force on the Contact Resistance Between Copper Busbars

64. Emiliya Dimitrova 557
Contemporary Methods for Nondestructive Testing (NDT) of the state of Cable Lines

65. Krastyu Krastev, Radka Krasteva 567
Increasing Efficiency Module Pulse width Modulation

66. Krastyu Krastev, Radka Krasteva 573
Allocation of Losses at High Speed Induction Motor with Squirrel Cage Rotor

67. Nikolay Matanov, Snezhana Dimitrova 579
Model of Power Supply System with Variable Structure and Electrical loads

68. Nikolay Matanov, Snezhana Dimitrova 589
Formalized Mathematical Description of the Power System Structure and Loads

69. Aneliya Terzova 597
Influence of Ferrofluid Drag Force on Characteristics of Electromagnetic Actuator

70. Emiliya Dimitrova 607
Equipment for Nondestructive Testing (NDT) of the State of Cable Lines

71. Rosen Tanev, Valentin Mateev, and Iliana Marinova 615
Dynamic Characteristics of High Voltage Vacuum Interrupters

Author's Index - Volume 66, Issue 1

	author	article
1.	Adrian Ivanov	267
2.	Aneliya Terzova	597
3.	Angel Petleshkov	145
4.	Angel Tsolov	315
5.	Borislav Boychev	67
6.	Bozhidar Stoev	285, 295
7.	Daniel Dobrilov	315
8.	Dian Malamov	549
9.	Dilian Ivanov	201
10.	Dimitar Bogdanov	73, 385
11.	Dimitar Dimitrov	83
12.	Dimitar Karastoyanov	541
13.	Dimo Stoilov	37, 57, 171, 181
14.	Emil Mechkov	527
15.	Emil Rachev	47, 267
16.	Emil Ratz	241
17.	Emil Sokolov	249
18.	Emiliya Dimitrova	557, 607
19.	Gantcho Bojilov	241
20.	Gavril Gavrilov	259
21.	George Todorov	285, 295
22.	Georgi Dimitrov	93
23.	Georgi Pavlov	111, 119
24.	Georgi Stoychev	93
25.	Georgi Zhegov	145
26.	Haralan Penev	411
27.	Hristo Vasilev	211
28.	Iavor Isaev	111, 119
29.	Iliana Marinova	337, 511, 615
30.	Iliya Madzharov	47
31.	IlkoTarpov	421
32.	Iosko Balabozov	541
33.	Iva Petrinska	201
34.	Ivan Angelov	345, 351
35.	Ivan Bachev	401
36.	Ivan Hadzhiev	549
37.	Ivan Kostov	533
38.	Ivan Lalov	277
39.	Ivan Milenov	321, 329
40.	Ivan Petrov	93, 101, 277
41.	Ivan Yatchev	527, 549
42.	Ivan Zagorchev	37, 57
43.	Ivaylo Dolapchiev	519
44.	Ivo Domishlyarski	47
45.	Kalinka Todorova	489, 505
46.	Krastyo Hinov	541
47.	Krastyu Krastev	567, 573
48.	Kristian Ivanov	47
49.	Lubomir Sekulov	111, 119
50.	Ludmil Stoyanov	401
51.	Lyuben Krastev	47
52.	Martin Zlatkov	395
53.	Martina Tomcheva	111, 119
54.	Miglenna Todorova	337
55.	Miho Mihov	241, 267
56.	Milko Yovchev	191, 427
57.	Nelly Harizanova	385
58.	Nikola Makedonski	165
59.	Nikola Nikolov	57
60.	Nikolay Matanov	345, 411, 579, 589
61.	Nikolay Naydenov	165
62.	Nikolay Stoimenov	541
63.	Peter Matov	345, 351
64.	Petko Petkov	83
65.	Plamen Rizov	19, 29, 127, 137, 471, 479
66.	Plamen Tsankov	191, 427

Author's Index - Volume 66, Issue 1

	author	article
67.	Rad Stanev	47
68.	Radka Krasteva	567, 573
69.	Radoslav Spasov	127, 137
70.	Raina Tzeneva	527
71.	Rexhep Shaqiri	73
72.	Rosen Tanev	511, 615
73.	Rumen Baev	321
74.	Rumen Kirov	165
75.	Samuil Aleksandrov	471, 479
76.	Snezhana Dimitrova	579, 589
77.	Stanimir Stefanov	211, 217, 435
78.	Stanislav Gioshev	541
79.	Stefcho Guninski	497, 533
80.	Svetlana Tzvetkova	145, 155
81.	Svilen Stoyanov	305
82.	Teodora Terenteva	57
83.	Todor Lalev	111
84.	Tsvetomir Asenov	47
85.	Tsvetomir Stoyanov	127
86.	Tsvetomir Stoyanov	137
87.	Valentin Kolev	357, 367
88.	Valentin Mateev	337, 511, 527, 615
89.	Vania Petrova	145
90.	Vasil Dimitrov	321, 329
91.	Vassil Shumanov	357, 367, 375
92.	Vencislav Stankov	321
93.	Vesselina Trashlieva	171, 181
94.	Vezir Rexhepi	73
95.	Victor Zahariev	127, 137
96.	Viktor Manov	443
97.	Vladimir Chikov	165
98.	Vladimir Lazarov	401
99.	Vladimir Shalamanov	451
100.	Vultchan Gueorgiev	19, 29
101.	Zahari Ivanov	225, 235, 443, 451, 461
102.	Zahari Zarkov	401

Volume 66 Issue 1

pages	articles	authors
622	71	102

ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМА НА ВЪЗБУЖДАНЕ НА ТУРБОГЕНЕРАТОРИ ВЪРХУ УСТОЙЧИВАТА РАБОТА НА СОБСТВЕНИТЕ НУЖДИ

Пламен Ризов, Вълчан Георгиев

Резюме: *Представено е изследване на причините за отпадане на захранването на собствените нужди на един от блоковете в голяма елктроцентрала в България. Изследването е направено на база на компютърен модел, чиято адекватност е експериментално проверена. Изследванията с модела, показват, че надеждността на захранването на собствените нужди зависи и от режима на възбуждане на генераторите.*
Ключови думи: *турбогенератори, възбуждане, качество на енергията*

INFLUENCE OF THE REGIME OF EXCITEMENT OF THE TURBO-GENERATORS ON THE STABLE WORK OF THE OWN NEEDS SUPPLY

Plamen Rizov, Vultchan Gueorgiev

Abstract: *The reasons led to voltage failure on the own needs busses in big power plant in Bulgaria are studied. The study is based on a computer model which adequacy is experimentally verified. The results from the model show that the reliability of the power supply of the own needs depends on regime of excitement of the turbo-generator.*

Keywords: *turbo-generators, excitement, quality of electrical supply*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Осигуряването на непрекъсваемо захранване на собствените нужди на електрическите централи е част от мерките за повишаване на тяхната надеждност [1, 2]. Затова в експлоатацията се обръща особено внимание на случаите на отпадане на напрежение на тези шини.

В доклада са изследвани причините, довели до изключване на част от съоръженията на собствените нужди на голяма електрическа централа в България, след еднофазно късо съединение на далекопровод 400 kV.

За схемата на основните съоръжения от генериращите мощности и захранването на собствените нужди може да се добие представа от Фиг.1. В централата има два идентични блока с турбогенератори, означени като ТГ1 и ТГ2.

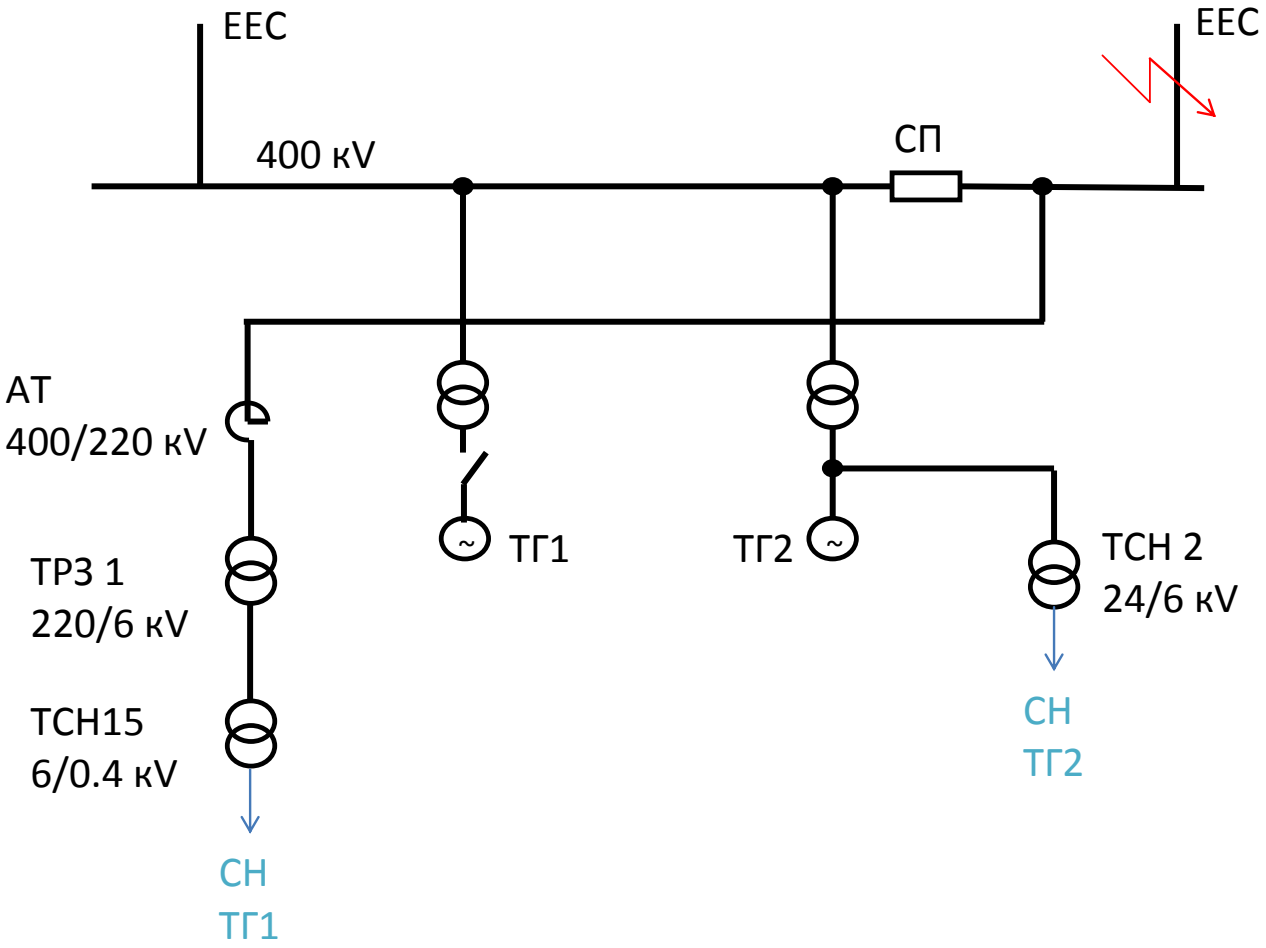
По време на късото съединение, ТГ1 е изключен, а ТГ2 е натоварен до номинална мощност.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Както се вижда от фиг.1, схемите за захранване на собствените нужди на двата блока са идентични, но поради факта, че ТГ1 е изключен, собствените му нужди се захранват от шини 400 kV на централата през автотрансформатор АТ 400/220 kV и трансформатор резервно захранване - ТР31 6/0,4 kV. В резултат от едно-фазното късо съединение в енергийната система, отпада захранването на шини 0.4 kV само на собствените нужди на ТГ2, но не и това на ТГ1.

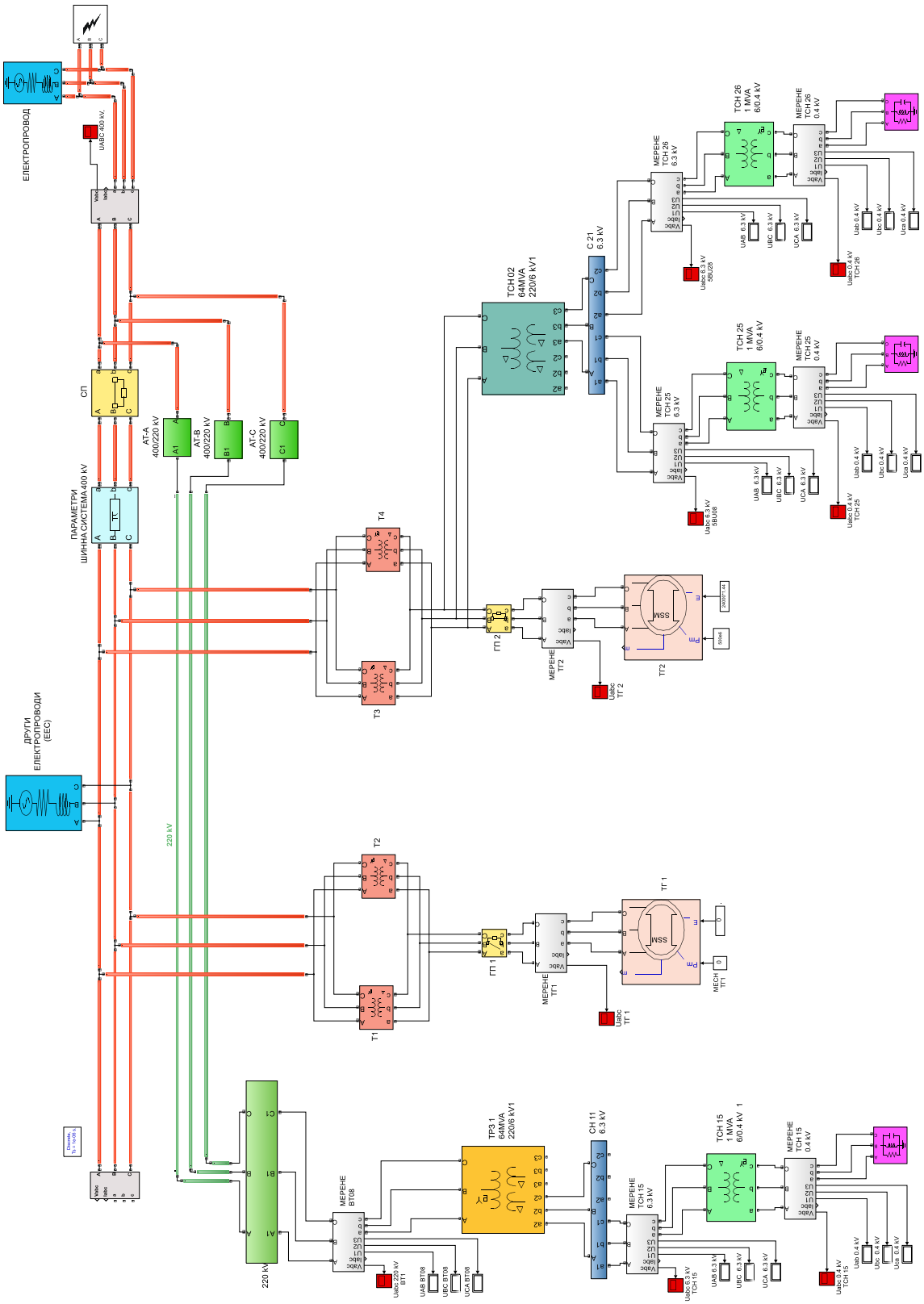
Естеството на проблема и спецификата на обекта [1] не позволяват извършването на експериментални изследвания. Не са налични записи от регистратори на процесите на изключените шини. По тази причина явленията са изследвани с помощта на модели, чиято адекватност е проверена чрез наличните измервания преди и по време на гореописания режим.



Фиг.1.

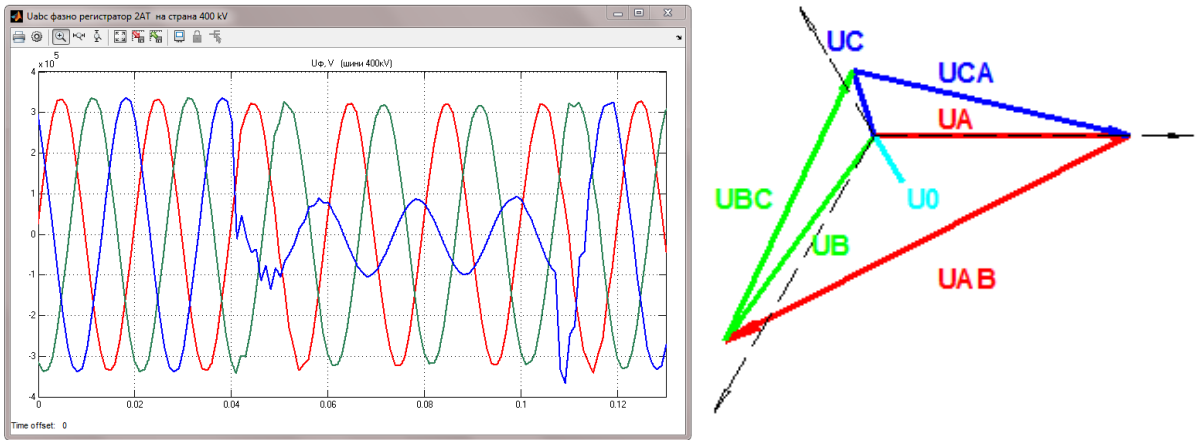
2. РАЗРАБОТВАНЕ НА МОДЕЛ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ

Моделът за изследване на устойчивата работа на електрозахранващата система на собствените нужди на синхронен турбогенератор с голяма мощност е разработен в средата на MATLAB – SIMULINK. Той е показан на фиг.2 и включва шини 400 и 220 kV, основни трансформатори, трансформатори собствени нужди, трансформатори за резервно захранване на собствените нужди, синхронен турбогенератор с голяма мощност, секции 6.3 и 0.4 kV от електрозахранващите системи на собствените нужди на силовата установка.

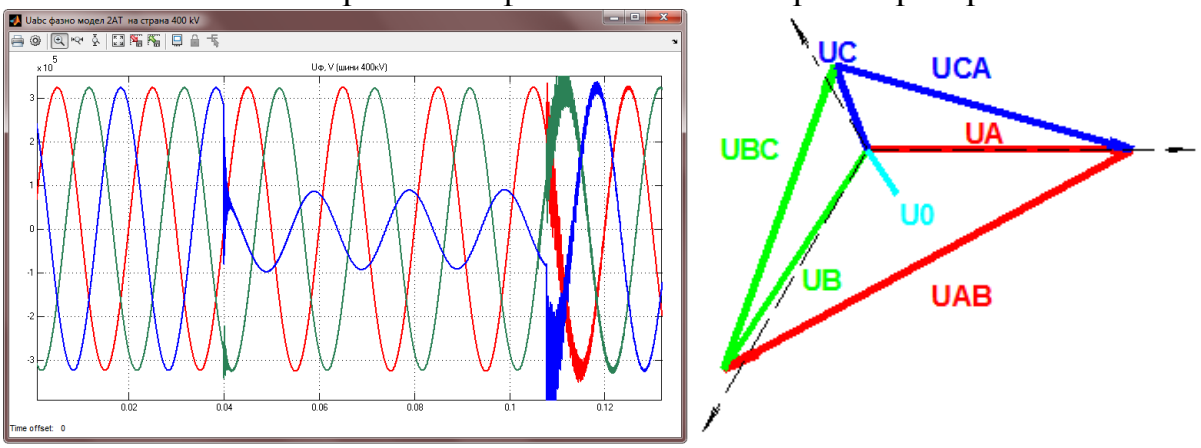


Фиг.2.

Адекватността на разработения модел бе проверена посредством сравнение на оцилограмите и векторните диаграми на напреженията получени от него и оцилограмите и векторните диаграми на реалните напрежения на шини 400 и 220 kV, записани в регистраторите при еднофазно късо съединение на една от фазите на електропроводите в близост до електрическата централа.

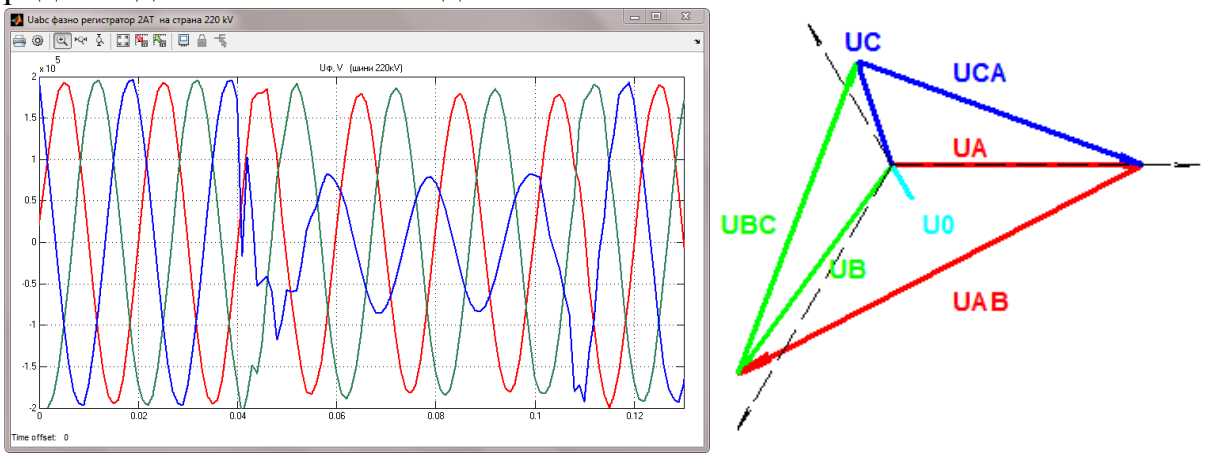


Фиг.3. Осцилограма и векторна диаграма на фазните напрежения на шини 400 kV при з.с. на фаза С записани в регистратора.

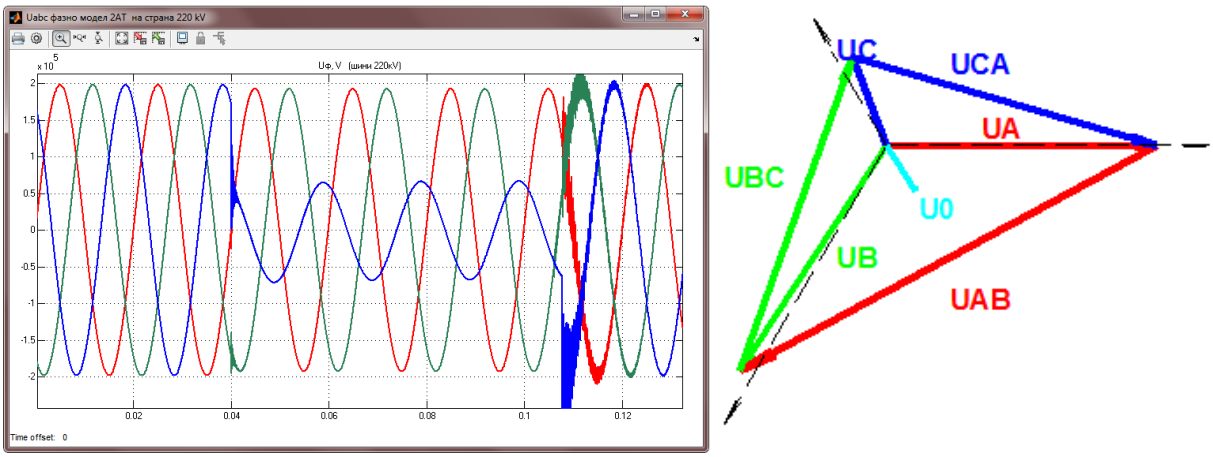


Фиг.4. Осцилограма и векторна диаграма на фазните напрежения на шини 400 kV при з.с. на фаза С получени от модела.

На фиг.3 и фиг.4 могат да се видят кривите на фазните напрежения на шини 400 кV по време на еднофазното късо съединение, получени от регистраторите и от показания на фиг.1 модел. Аналогични резултати, но за фазните напрежения на шини 220 кV са показани на фиг.5 и фиг.6. От резултатите показани на фиг.3, фиг.4, фиг. 5 и фиг. 6 се вижда, че разработения модел с висока степен на точност симулира изменението на напреженията по време на земното съединение. Доброто съвпадение между експерименталните и симулационните резултати определя адекватността на модела.



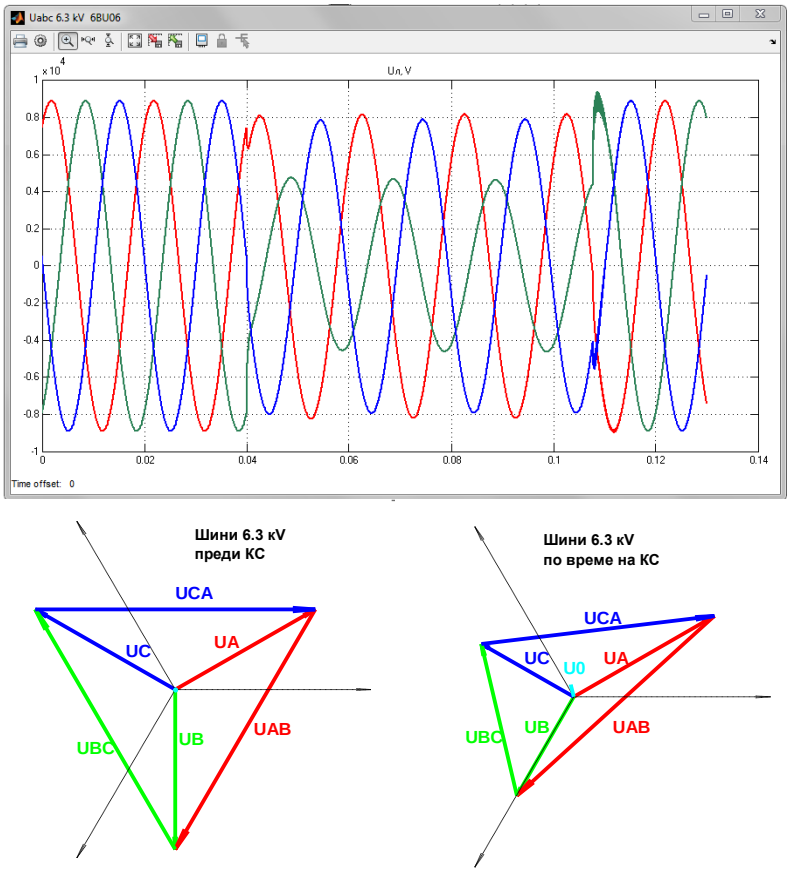
Фиг.5. Осцилограма и векторна диаграма на фазните напрежения на шини 220 kV при з.с. на фаза С записани в регистратора.



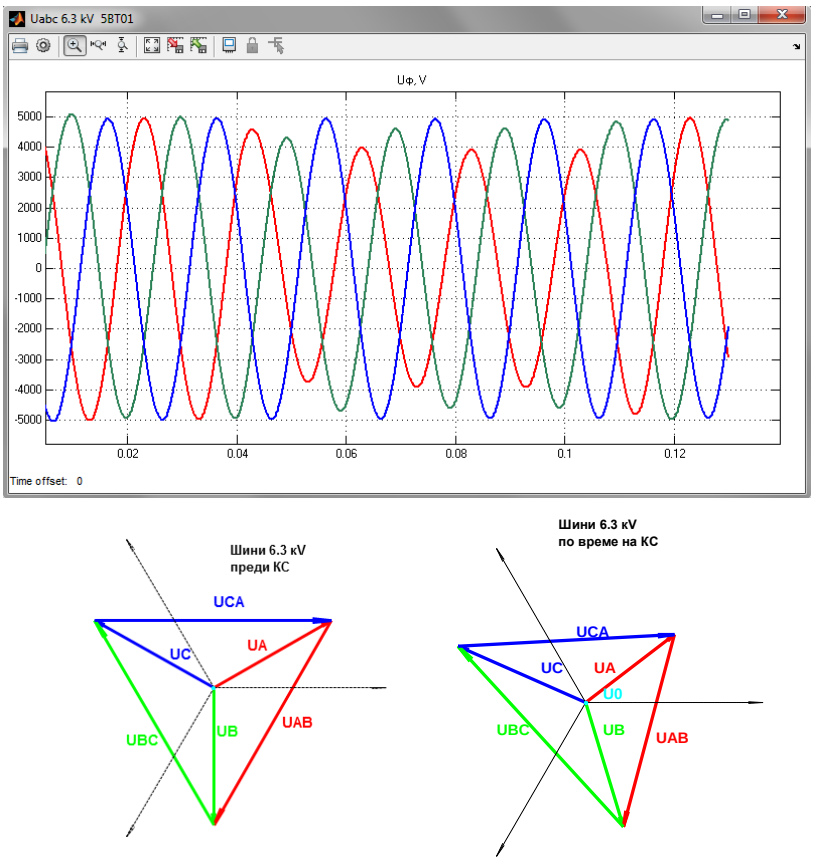
Фиг.6. Осцилограма и векторна диаграма на фазните напрежения на шини 220 kV при з.с. на фаза С получени от модела.

3. РЕЗУЛТАТИ

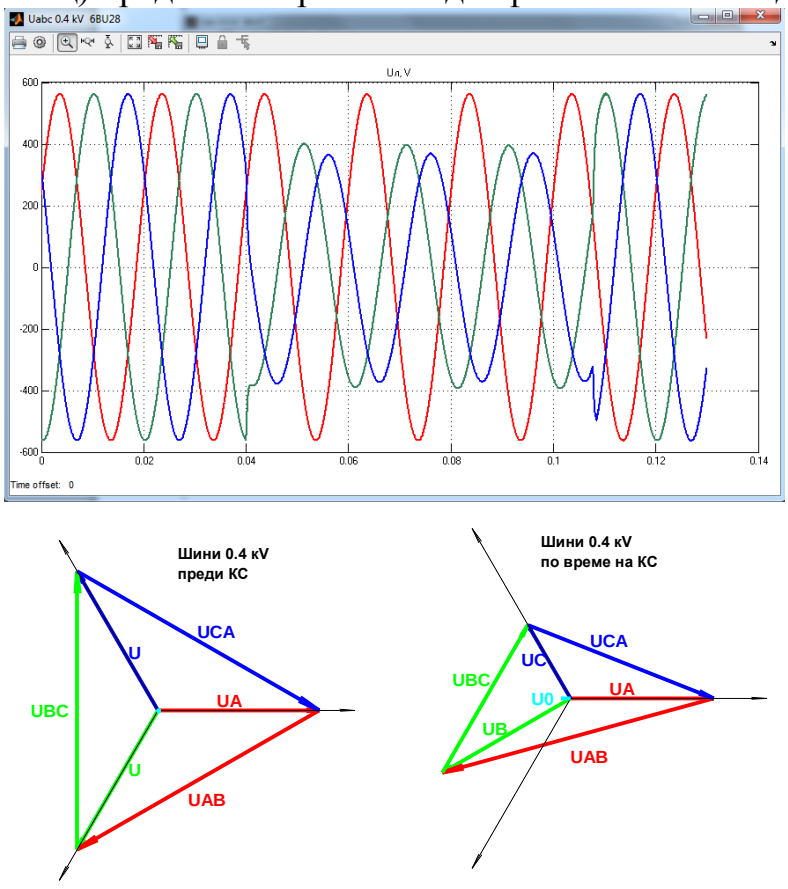
С помощта на модела от фиг.2 са симулирани напреженията в различни точки от систематаза захранване на собствените нужди по време на еднофазното късо съединение. Времедиаграми на напреженията на шини 6 kV и 0.4 kV са показани на следващите фигури. Дадени са не само времедиаграмите, но и векторните диаграми на напреженията преди и по време на еднофазното късо съединение. За сравнение са показани резултатите както за неработещия блок – ТГ1, така и за работещия – ТГ2.



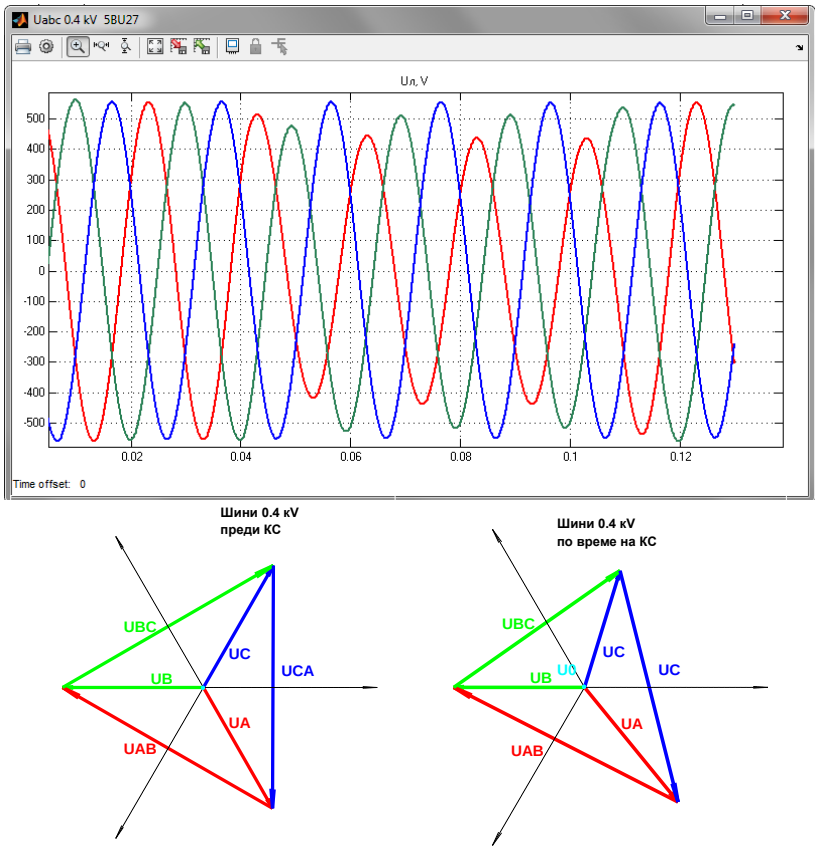
Фиг.7. Времедиаграма и векторни диаграми на напреженията на шини 6 kV на ТГ1 (неработещ) преди и по време на еднофазното късо съединение.



Фиг.8. Времедиаграма и векторни диаграми на напреженията на шини 6 kV на ТГ2 (работещ) преди и по време на еднофазното късо съединение.



Фиг.9. Времедиаграма и векторни диаграми на напреженията на шини 0.4 kV на ТГ1 (неработещ) преди и по време на еднофазното късо съединение.



Фиг.10. Времедиаграма и векторни диаграми на напреженията на шини 0.4 kV на ТГ2 (работещ) преди и по време на еднофазното късо съединение.

Резултатите, показани графично на фиг.7- фиг.10 са представени в табличен вид в табл.1.

В табл.1 са представени ефективните стойности на напреженията на шини 400 kV, 220 kV, 6 kV и 0.4 kV преди и по време на еднофазното късо съединение в енергийната система.

В последните колони на таблицата са дадени процентните изменения на напреженията спрямо номиналните за всяка от изследваните шини по време на късото съединение.

Вижда се голямата процентна несиметрия на напреженията по време на късото съединение, като на шини 6 и 0.4 kV на неработещия блок, пропадането на напреженията е с повече от 30 %.

Задействането на минимално-напреженовите релета, защитаващи част от консуматорите от собствените нужди на блока са причината за изключване на съоръженията. Настройката на минимално – напреженовата защита е 30% от номиналната стойност.

Таблица 1

	Преди земно съединение			След земно съединение			Процентно изменение			
	UAB	UBC	UCA	UAB	UBC	UCA	ΔU	ΔU	ΔU	
	kV	kV	kV	kV	kV	kV	%	%	%	
Шини 400, kV	400	400	400	400	282	267	0.0	29.4	33.4	
Шини 220, kV	230	230	230	230	161	151	0.0	30.0	34.2	
ТГ2, СН 6 kV	6.2	6.21	6.21	5.83	4.66	5.31	**5.97**	**24.9**	**14.4**	**работещ**
ТГ2 СН 0.4 kV	0.4	0.39	0.39	0.38	0.312	0.357	**5**	**20**	**8.46**	
ТГ1, СН 6 kV	6.4	6.36	6.36	5.86	3.38	5.66	**8.44**	**46.8**	**11.0**	**неработещ**
ТГ1, СН 0,4 kV	0.4	0.4	0.4	0.4	0.28	0.26	**0.0**	**29.9**	**34.2**	

4. ИЗВОДИ

- Силната несиметрия в линейните и фазни напрежения на шини 0,4 kV на собствените нужди на неработещия ТГ1 водят до задействане на минимално-напреженовите релета, които изключват част от съоръженията.
- Работещият генератор ТГ2 поддържа нивото на напрежение на своите шини, а от там несиметрията на напреженията на неговите собствени нужди е много по-малка.
- Направените изследвания показаха, че режима на възбуждане на генераторите е определящ за стабилността на напреженията при евентуални къси съединения в ЕЕС.
- По тази причина, идеята да се намали възбудителния ток, за да се увеличи генерираната активна енергия или за да се използват генераторите за компенсиране на капацитивна енергия трябва да се провери и от гледна точка стабилност на системата.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Борисов Е. Гъвкавост и надеждност на електрозахранването на собствените нужди на АЕЦ „Козлодуй“, Първа Атомна – периодично издание на „АЕЦ Козлодуй ЕАД“, брой V, 2011 г., стр.2-6.

[2] Пачаманов А., Н. Матанов. Относно съвместната работа на синхронни генератори с устройства за непрекъсваемо електрозахранване. Енергиен форум 1997, 11-13 юни, Варна, стр.204-207.

Автори: Пламен Ризов, доцент, д-р, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*, Вълчан Георгиев, доцент, д-р, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *vulchy@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Константин Малчев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА РЕЗЕРВИРАНЕ НА ШИНИ СН, ЗАХРАНВАЩИ МОЩНИ ПОМПЕНИ АГРЕГАТИ

Вълчан Георгиев, Пламен Ризов

Резюме: *Обобщени са резултатите от реално изследване за възможността за използване на автоматично включване на резерва на шини СН в помпена станция с мощни помпени агрегати. На базата на модели, чиято адекватност е доказана с експерименти са изследвани електрическите преходни процеси при режима на самопускане, който неминуемо съпътства такъв АВР.*
Ключови думи: *помпени агрегати, резервиране, АВР*

STUDY OF THE POSSIBILITY FOR BACKUP POWER SUPPLY CHANGEOVER ON MEDIUM VOLTAGE BUSSES, SUPPLYING POWER PUMP AGGREGATES

Vultchan Gueorgiev, Plamen Rizov

Abstract: *The paper summarizes results from experimental study of possibilities for automatic power source change over on medium voltage busses, in a pump station with powerful pump aggregates. Electrical transients, concomitant to the self-start of induction motors are studied based on computer models which adequacy is proven by experimental results. The high current regime of self-starting of induction motors is inevitable in automatic change over and it is potentially dangerous for supply system.*
Keywords: *power pumps, emergency supply, automatic power changeover*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съществуват индустриални обекти, в които големи количества вода се използват за охлаждане, а самото охлаждане е важна част от технологичния процес и е определящо за надеждността и сигурността на обектите.

В тези случаи се поставят много високи изисквания към непрекъснатостта на водоподаването, съответно към захранването на помпените агрегати, осигуряващи нужния дебит.

Електроснабдителната система на такива обекти се изпълнява с АПВ [1] и АВР [3].

На базата на експериментални измервания и симулационни резултати от числени модели е изследвана възможността за резервиране чрез АВР (автоматично включване на резерва) на шини средно напрежение, захранващи мощни помпени агрегати.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ПОМПЕНИ АГРЕГАТИ

Разглежданите помпени агрегати са с потопяеми осеви помпи, с дебит 1 m^3/s и номинален напор 9,6 m, с водно мазане.

Помпите се задвижват от асинхронен двигател с късо съединен ротор и параметри:

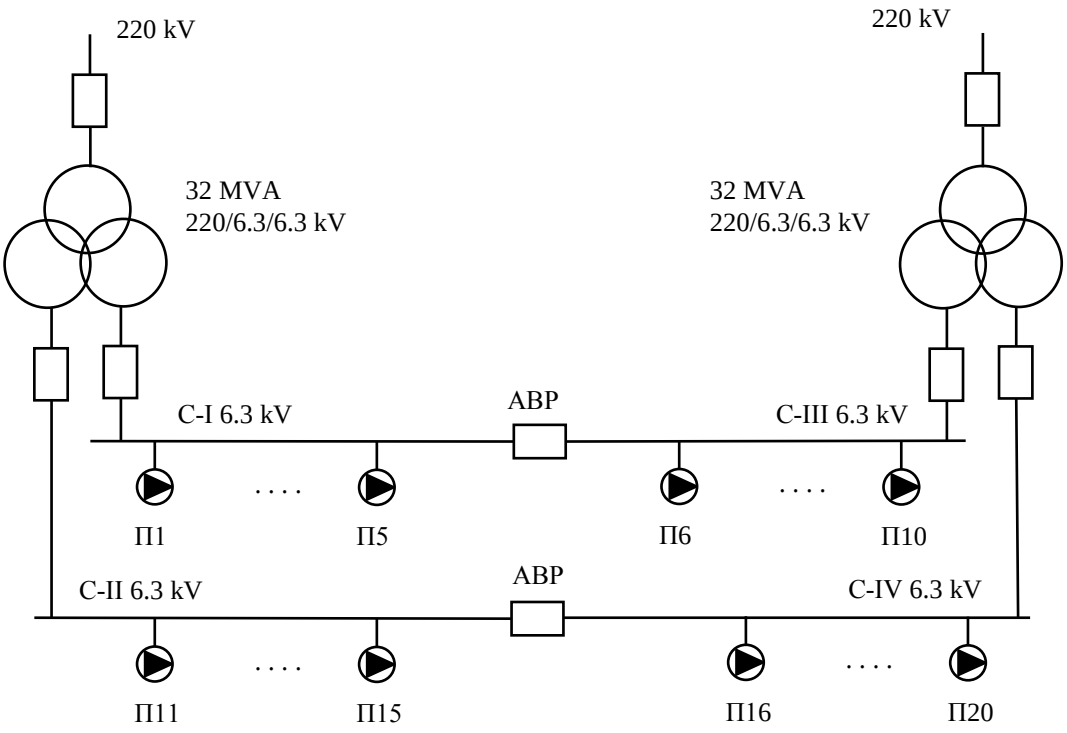
Номинална мощност Pн = 800 kW,

Номинално захранващо напрежение Uн = 6kV,

Номинален ток Iн = 100A,

Номинални обороти Nн = 493 min^{-1}.

Двигателите на помпите са с директно пускане. Схема на електроснабдителната система на помпената станция е показана на следващата фиг.1.



Фиг.1. Електроснабдителна система на помпената станция.

Както се вижда от фиг.1, налице са 4 секции на 6,3 кV: от С-I до С-IV. Всяка секция захранва по 5 помпи и в нормален режим е свързана към една от вторичните намотки на двунамотъчен трансформатор.

Секциите са свързани две по две със секционни прекъсвачи, чрез които може да се осигури резервиране от съседния трансформатор.

Ако резервирането се извършва ръчно, се изчаква пълното спиране на помпите от секциите без напрежение. След това се включва секционния прекъсвач и помпените агрегати се пускат ръчно един по един. Така се минимизира негативното въздействие на пусковите токове на помпените агрегати.

Когато става въпрос за автоматично включване на резерва, такъв алгоритъм на

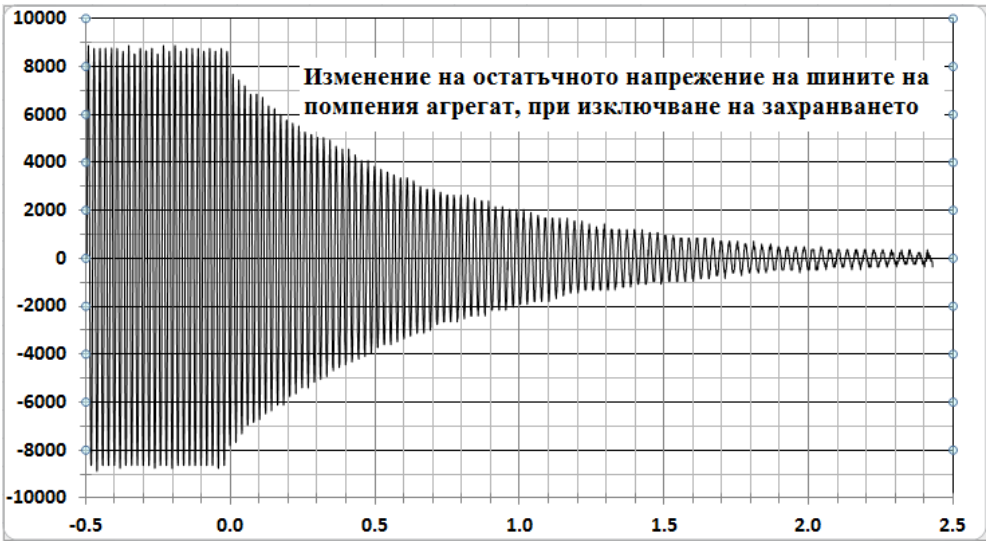
работа е непрактичен. Много по-удобно е да се инсталира стандартен АВР, който ще направи бързо превключване на секциите. При това обаче, всички помпи от превключваните секции ще влязат в режим на самопускане.

Тук са публикувани резултати от изследване, чиято цел е да отговори на въпроса опасен ли е режима на самопускане за помпите и за елементите от електроснабдителната система и възможна ли е работата на „бърз“ АВР.

3. ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ В ПОМПЕНИТЕ АГРЕГАТИ

В работата на помпените агрегати се проявяват няколко различни по своята физическа същност процеси – хидравлични, механични, електромагнитни. За целите на настоящото изследване е важно да се оцени общото въздействие на преходните процеси върху електроснабдителната система на помпената станция. Пускането на помпите е свързано с протичане на голям пусков ток, с апериодична компонента, зависеща от електрическите параметри и началните условия и времетраене, определено от развъртането на помпата.

При нормални условия, помпите се пускат една по една, като преди пускането на следващата помпа се изчаква пълното развъртане на предходната. При АВР всички помпи ще се пуснат едновременно, а големите пускови токове ще предизвикат пад на напрежение [5]. Пониженото напрежение ще доведе до по-малки амплитуди на тока и по-дълго време за развъртане.



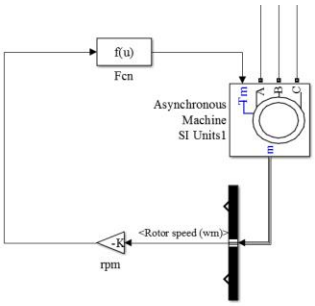
Фиг.2. Изменение на остатъчното напрежение на шините на помпен агрегат при изключване на захранването – експериментални данни.

При спирането на помпите, те продължават да се въртят в същата посока, заради запасената във въртящите се маси енергия. Вследствие на това, двигателите преминават в генераторен режим, поддържан от „свиващия се“ магнитен поток (фиг.2). След като скоростта на помпата спадне до нула, водният стълб в нагнетателния тръбопровод предизвиква завъртане в обратна посока, т.е. помпата започва да работи като турбина. Двигателят също се развърта в обратна посока, но не преминава в генераторен режим, заради отсъствието на източник на реактивна енергия.

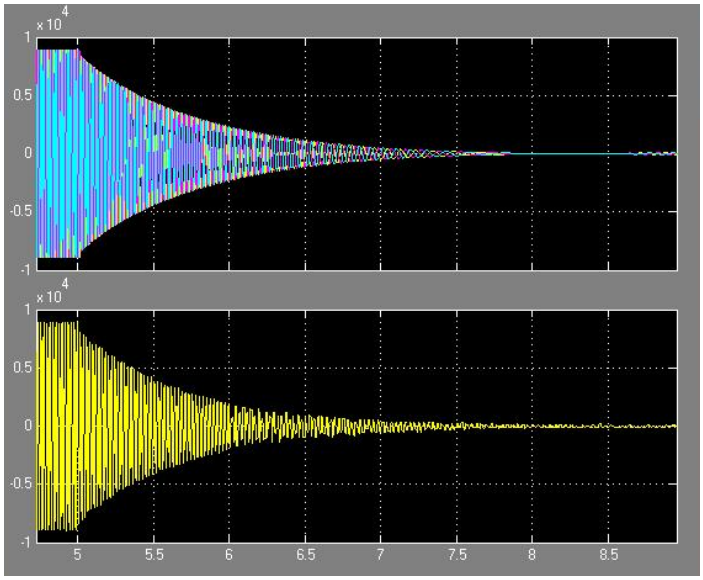
Времето, през което запасената във въртящите се маси на агретата енергия поддържа същата скорост на въртене определя максималното време за сработване на АВР. Ако това време се пресрочи и помпата влезе в „турбинен“ режим, асинхронният двигател ще бъде пуснат в режим на противовключване след подаване на напрежение, което при липса на електронна система за управление е недопустимо. Може да се очаква, че колкото по-бързо сработи АВР, толкова по-леки ще са преходните процеси.

4. МОДЕЛИРАНЕ НА ПРЕХОДНИТЕ ПРОЦЕСИ В ПОМПЕНАТА СТАНЦИЯ

Естеството на изследвания проблем не позволява информация за процесите да се събира от експериментални данни. Произволни и потенциално опасни комутации на такива отговорни съоръжения са недопустими. По тази причина, процесите са изследвани на база модели в МАТЛАБ – СИМУЛИНК.



Фиг.3. Модел на помпен агрегат.

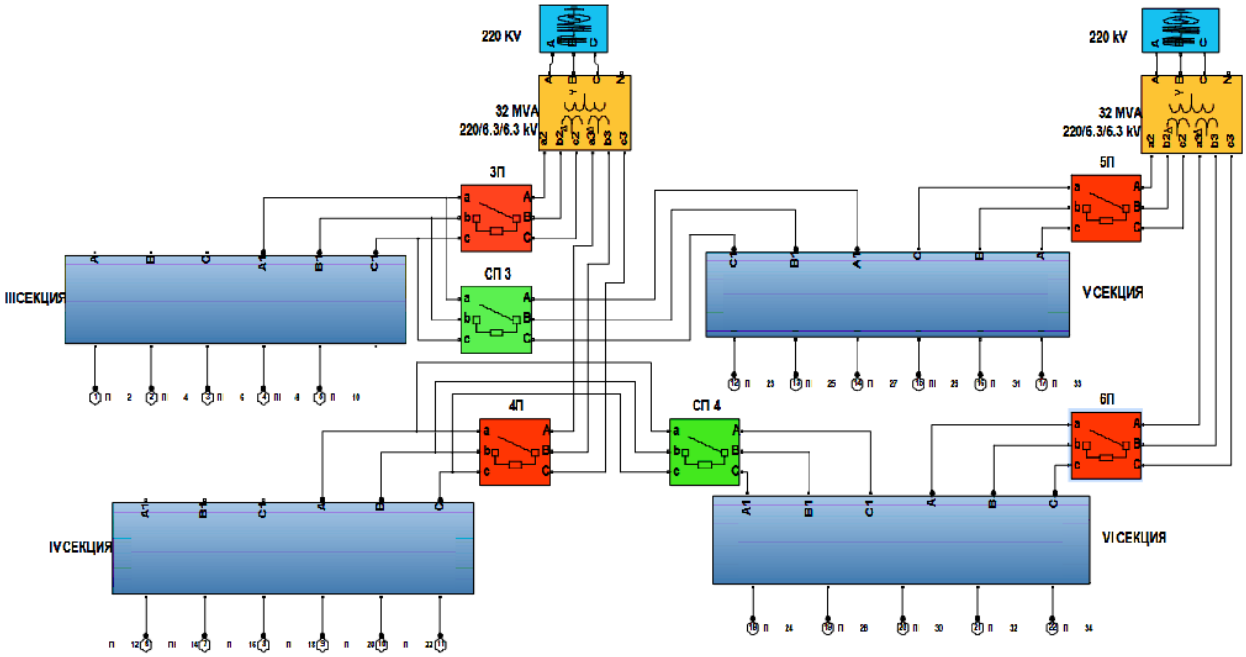


Фиг.4. Остатъчно напрежение на шините на двигателя при изключване на захранването. Резултати от модела (горе) и експериментални данни (долу).

За моделиране на помпения агрегат (фиг.3) е използван вградения модел на асинхронна машина, като е моделирана съпротивителната механична характеристика на помпата [2]. Адекватността на модела е проверена чрез сравнение на симулационни и експерименталните данни – фиг.4.

Моделът, с който са изследвани процесите при АВР в помпената станция е показан на фиг.5. Симулирани са процесите при задействане на всеки един от сек-

ционните прекъсвачи по отделно, както и на двата секционни прекъсвача едновременно. Симулациите са извършени при различно време за сработване на АВР – от 120 до 900 ms.

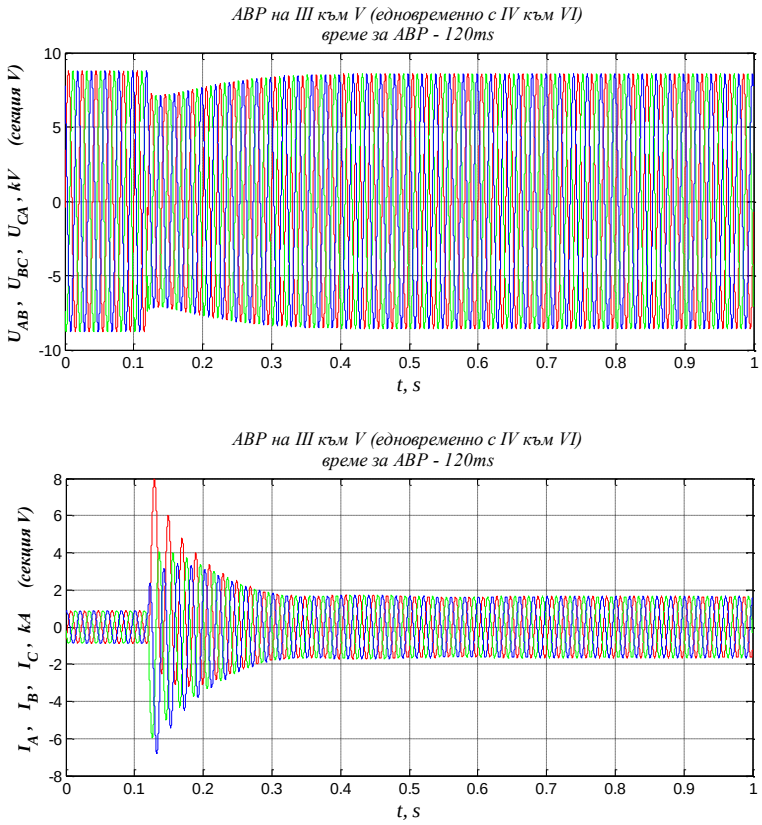


Фиг.5. Модел за изследване на процесите при АВР на помпената станция.

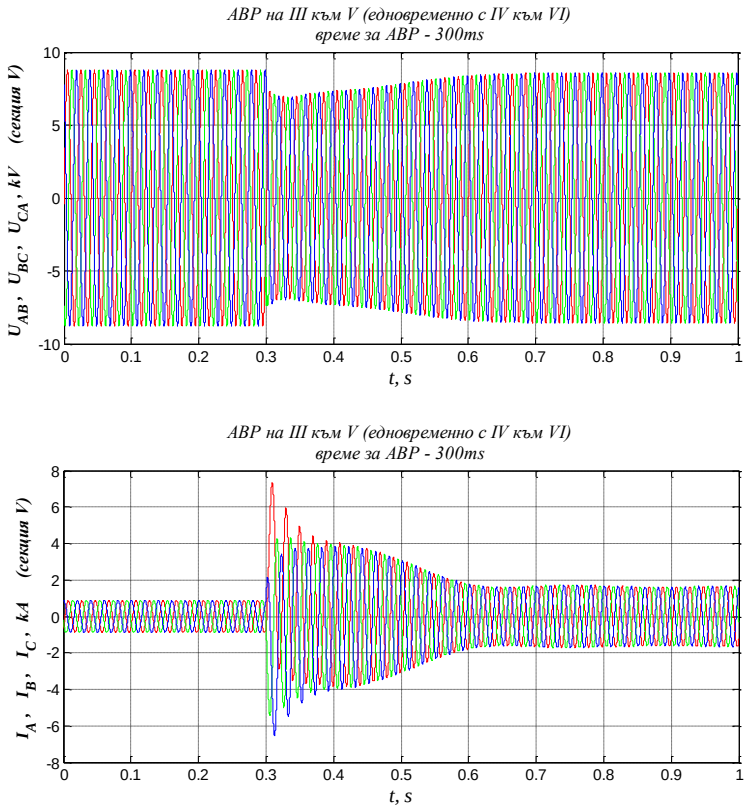
На показаните по-долу осцилограми са дадени симулационни резултати за изменението на напрежението на секциите и тока през секционния прекъсвач при едновременен АВР на две секции, т.е. симулира се отпадане на единия от захранващите трансформатори.

На фиг.6-фиг.8 са показани осцилограми при различна продължителност на безтоковата пауза. На база на симулационните резултати са оценени четири параметъра:

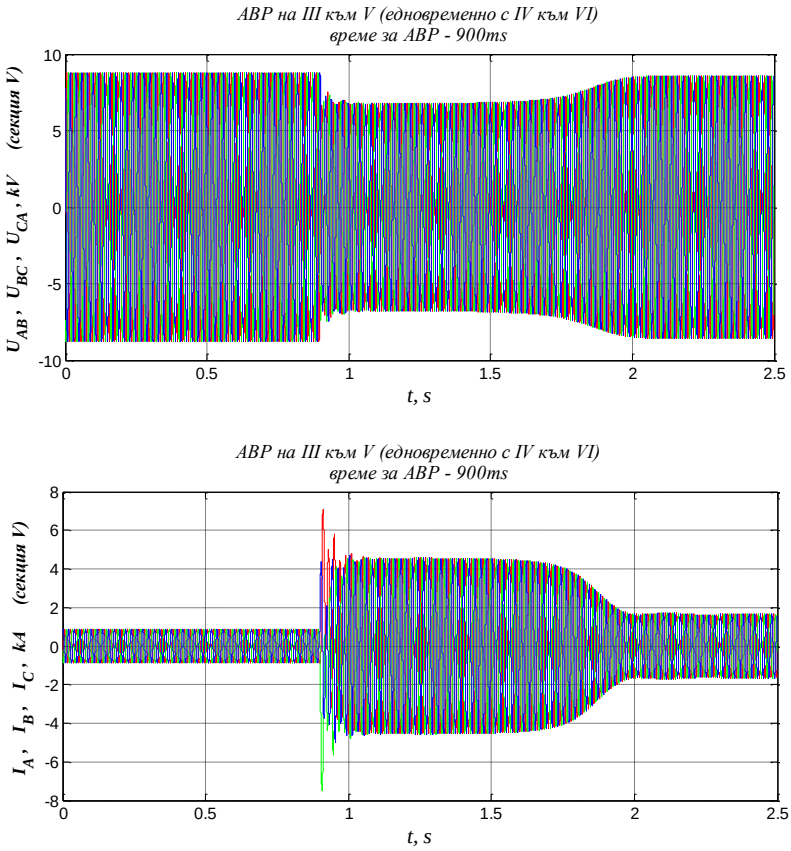
време за АВР	t, ms	Време за сработване на АВР
пад на напрежение	ΔU , oe	Максимално пропадане на напрежението, измерено в относителни единици спрямо номиналното
време за възстановяване на напрежението на секцията	Δt ,s	Време, необходимо за възстановяване на напрежението до 90% от номиналното
ударен ток	$Iy_{амп}$,kA	Максимален ток по време на преходния процес
преходен ток през пусковия процес	$I_{пуск}$, kA	Траен ток през време на преходния процес



Фиг.6. Осцилограми на напрежението и тока на V секция, при едновременен АВР на две секции и при пълно натоварване. Безтокова пауза - 120 ms



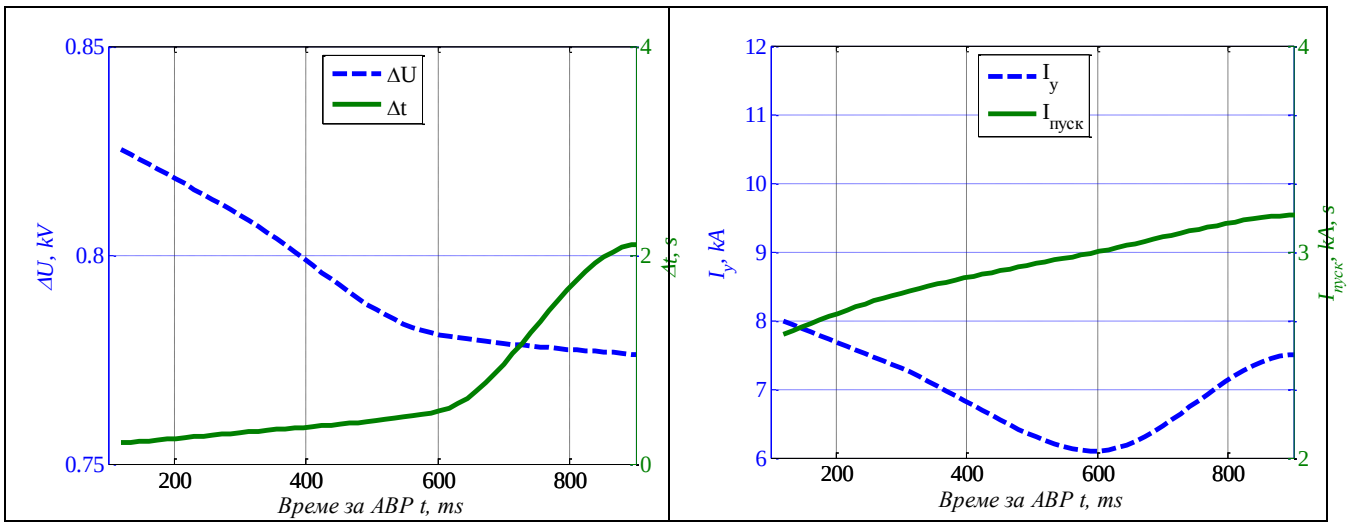
Фиг.7. Осцилограми на напрежението и тока на V секция, при едновременен АВР на две секции и при пълно натоварване. Безтокова пауза - 300 ms



Фиг.8. Осцилограми на напрежението и тока на V секция, при едновременен АВР на две секции и при пълно натоварване. Безтокова пауза - 900 ms

На база на горните фигури са обобщени данните за изменението на пада на напрежение, времето за възстановяване, ударния и преходния токове в зависимост от времето на АВР и са показани на фиг.9.

Големите токове на самопускане предизвикват пад на напрежение в захранващите трансформатори, който ограничава от своя страна нарастването на тока при удължаване на безтоковата пауза.



Фиг.9. Изменение на пада на напрежение, времето за възстановяване, ударния и преходния токове в зависимост от времето на АВР.

5. ИЗВОДИ

Максималната продължителност на безтоковата пауза, през която е възможен пуск на АВР е 1.5 секунди. След това стартирането на АВР не е възможно.

Остатъчното напрежение на секциите участващи в процеса на АВР има стойности 76 % от номиналното при едновременен АВР на две секции и стойност 87 % при АВР само на една секция, като съответно времената за възстановяване на напреженията се изменят от 2.2 до 0.8 секунди.

Максималната стойност на преходния ток в процеса на самопускане е 4 кА, а максималната продължителност е 2.2 s (не едновременно).

Получените резултати по отношение на пада на напрежение, времето за възстановяване на напрежението, ударния ток, преходния ток показват, че горе посочените величини не се изменят извън допустимите граници.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Иван Ангелов „Изпълняване на автоматично повторно включване при защита с импедансно реле RIS-2“ VI-та конференция на ЕФ „ЕФ-2014“, Годишник на ТУ-София, том 64, книга 4, 2014, стр. 23-28

[2] Gordana Janevska, “Mathematical Modeling of Pump System”, The 2nd Electronic International Interdisciplinary Conference September, 2-6, 2013, proceedings, pp. 455-458

[3] Nabb D. Mc, S. Bernard, S. Paquette and G. Fromm, „Transient Design Studies for Automatic Switching of Shunt Reactors on the Transelec System“, International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003 in New Orleans, USA

[4] Станимир Вичев „Релейна защита“ София, февруари 2008 г. http://elektroenergetika.tu-sofia.bg/.

[5] Матанов Н. Оценка на колебанието на напрежение в електроснабдителни системи на промишлени предприятия при пускане на мощни АД. Годишник на ТУ-София, том 63, книга 6, 2013, стр. 177-186

Автори: Пламен Ризов, доц. д-р, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*, Вълчан Георгиев, доцент към катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“, E-mail address: *vulchy@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015г. **Рецензент**: доц. д-р Константин Малчев

МЕТОДИ ЗА ОЦЕНЯВАНЕ ПРЕНОСА НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ

Димо Стоилов, Иван Загорски

Резюме: *Достъпът на трети лица до електропреносната мрежа въвежда необходимостта от разграничаване на разходите в мрежата и изследване на методите за определяне на цените за пренос от гледна точка на тяхната справедливост и ефективност. Тази статия представя обзор на съществуващите алтернативни методи за поделяне на разходите за пренос на електроенергията през електропреносните мрежи.*
Ключови думи: *методи за оценяване на пренос, вложени разходи, прирастни разходи, местни прирастни цени.*

METHODS FOR ELECTRICITY TRANSMISSION PRICING

Dimo Stoilov, Ivan Zagorchev

Abstract: *The third party access to transmission network causes a necessity for distinction of network costs and investigation of transmission pricing methods for fair and efficient payment of electricity transmission. This paper presents a survey on existing alternative methods for cost allocation for the transmission of electricity via transmission networks.*
Keywords: *transmission pricing methods, embedded costs, marginal costs, local marginal pricing.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Пренос на електроенергия по електропреносна мрежа означава провеждане на електромагнитни вълни по елементите на мрежата в резултат от едновременното вкарване на електроенергия в едни възли и изкарване на електроенергия от други възли под надзора на оператора на мрежата.

Собственикът/операторът на мрежата поддържа мрежата, координира нейното опериране и развитие. Обикновено той е доставчик на спомагателните услуги, но не доставя, а само посредничи при търговията на разполагаема мощност и електроенергия между двата типа ползватели на мрежата (производители и потребители - крайни или препродавачи). Те плащат разходите на оператора на мрежата, към които се добавят и прехвърляемите разходи за спомагателни услуги.

Оценяването на услугата пренос на електрическата енергия е един от най-дискутираните въпроси, свързани с либерализацията на пазара по света. Още преди предоставянето на достъп на трети лица до преносната мрежа са предложени много методи: [35], [42], [17], [33], [31], [25], [7], [41], [21], [5], [13], [16], [24] и др. Повечето от тях са споменати в обзора на Krause [40].

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

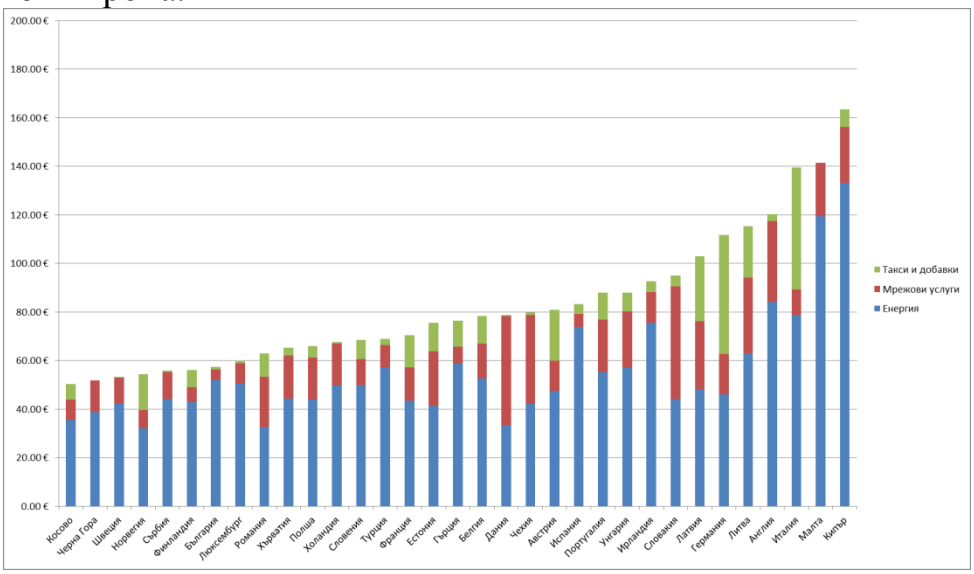
След предоставяне на платен достъп до преносните мрежи поредицата предложени методи продължава: [43], [44], [9], [2], [11], [45], [46], [14], [28], [23], [34], [3]. Появяват се все по-развити и по-сложни методи: [15], [19], [4], [29], [10], [26], [39], [32].

Цитираните източници са само част от над 200 по-важни публикации, касаещи плащането за ползване на преносната мрежа.

Преносът е естествен монопол и дейността на операторите е предмет на регулиране, а не на свободен пазар. Регулаторните органи надзират и периодично одобряват разходите или цените на операторите.

Повечето европейски страни заместиха плащането за ползване на мрежата (Use of System Charges - UoSC) с плащане за „достъп до мрежата“ (fee for the access to the network) [38].[1]

На фиг.1 са представени разходите за мрежови услуги на големи потребители на свободен пазар с годишна консумация от 20 000 до 70 000 MWh годишно в различни страни от Европа.



Фиг.1. Сравнение на разходите за мрежови услуги спрямо разходите за енергия

Най-често изтъкваните изисквания към ефективно оценяване на разходите за пренос са:

1. Стимулиране на икономическа ефективност на процеса пренос;
2. Адекватно компенсиране на разходите на мрежовите оператори;
3. Справедливо поделяне стойността на разходите между всички пазарни участници, използващи мрежата;
4. Обезпечаване надеждността на мрежата (преди всичко предотвратяване на претоварванията).

Първото изискване, за стимулиране на икономическата ефективност означава преследване на максимално общо благополучие (сума от принадена стойност на

[1] Освен плащане за достъп, заинтересуваните ползватели на мрежата в Европа плащат и физически права за пренос през участъци с недостатъчна преносна способност, най-често презгранични електропроводи. От своя страна операторите в Европа плащат за ползването на съседни мрежи, приходите/разходите за което социализират между всички местни консуматори, въпреки наличието на презгранично субсидиране [6], [18], [35], [36]. Тези плащания, както и плащането за присъединяване не са предмет на тази статия.

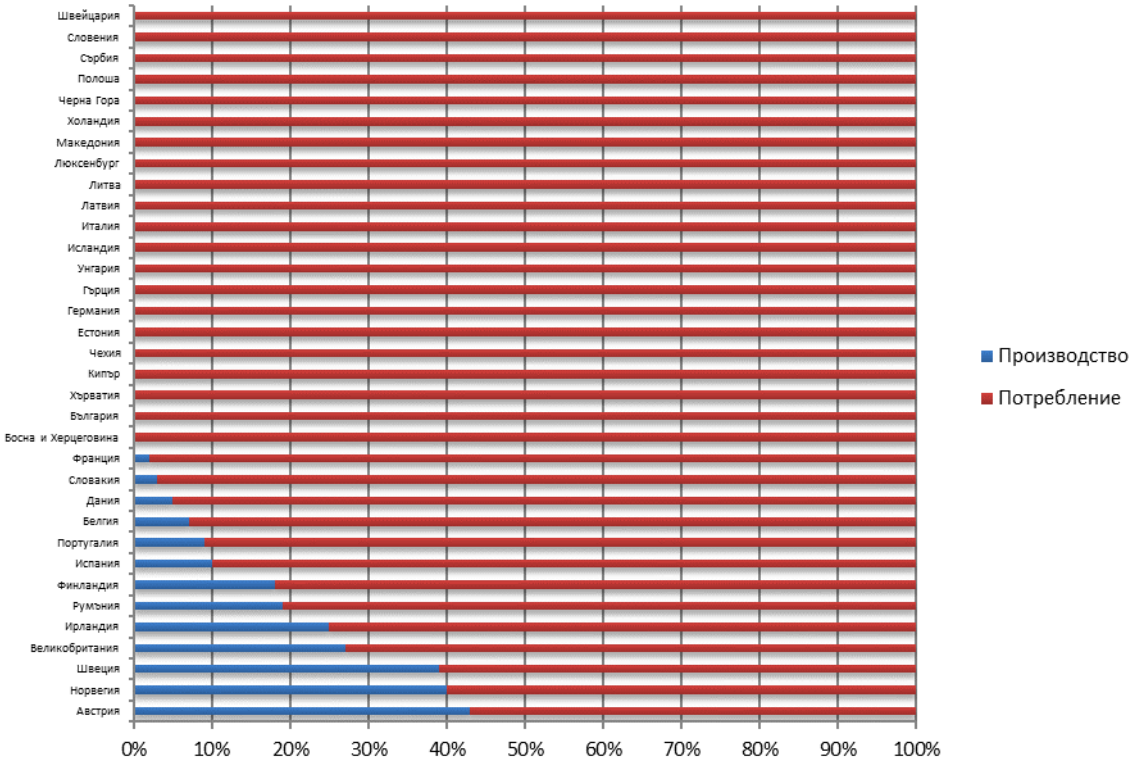
продавачи и купувачи). Отговорността за благополучието на продавача и купувачите се пада на регулиращия орган, а икономическата ефективност зависи от използвания метод за контрол на разходите и на цените.
Второто изискване, за адекватно компенсиране разходите на мрежовите оператори, е отговорност както на регулатора, така и на предаващия оператор. Икономистите и до сега нямат единен отговор дали да се възстановяват краткосрочните (short-term) или дългосрочните (long-term) разходи (expenses, costs) на оператора. В различните страни тези разходи варират от 3 до 10 % от общата стойност на електроенергията при крайните консуматори, в зависимост от състава на електропреносната мрежа и включваните други разходи в съответната страна. Около 90% от тези разходи са за възстановяване на първоначалните инвестиции и за текущо поддържане, които не зависят от натоварването на мрежата и само около 10% са зависими, защото са причинени от загубите на активна енергия в мрежата.
Третото изискване, за справедливо поделяне на общите разходи между купувачите на услугата пренос, е предмет на много дискусии и различни методи. Най-използваните се основават на товара в MW или на количеството електроенергия в MWh, което консуматорът изкарва от мрежата. Социализираното на разходите чрез еднаква цена е достатъчно справедливо плащане на пръв поглед, което в действителност не съответства на реалното ползване на мрежата. Например два потребителя, изкарващи еднакво количество енергия на различно разстояние от захранващия ги производител, биха заплатили еднаква сума, въпреки че използват различни елементи от мрежата.
Класическите методи за оценяване на услугата пренос на електрическа енергия образуват две основни групи, които разглеждаме последователно.

2. МЕТОДИ ЗА ОЦЕНЯВАНЕ ВЪЗ ОСНОВА НА ВЛОЖЕНИТЕ РАЗХОДИ

При тази група методи всички вложени разходи се сумират/обединяват (rolled-in or embedded) и след това се поделят между различните участници по определен показател, който характеризира метода.

2.1. МЕТОД НА ПОЩЕНСКАТА марка (Postage Stamp Method)

Това е най-простият и доста разпространен метод. Той се прилага както на пазари с отделни сделки за пренос (transaction based), така и за всички ползватели на мрежата без отделни сделки за пренос (non-transaction based). Подялбата се осъществява чрез цена в пари/MW, която се получава като отношение между необходимите годишни приходи (annualy required revenue - ARR) на оператора на електропреносната мрежа и годишния максимален товар на всички ползватели на преносната мрежа. Всеки от тях плаща ежемесечно сума, която е равна на произведението от цената и неговия максимален товар. Съществуват различни практики относно каква част от разходите се заплащат от производителите и каква от потребителите на електроенергията в страните групирани от Австрия до Франция на Фиг. 2. При повечето пазари (от Босна и Херцеговина до Швейцария) разходите се начисляват пряко на потребителите, които и без друго ще ги платят. Това решение е резултат от съображението за намаляване на разходите по сделките.



Фиг.2. Поделяне на заплащаните разходи за пренос на енергия между производители и потребители при различни Европейски пазари

2.2. МЕТОД НА ДОГОВОРЕНИЯ ПЪТ (Contract Path Method)

Методът представлява подобрение на предходния метод, защото макар и приблизително се определя използваната част от мрежата между двете точки на производство и потребление. Този метод се прилага за всяка сделка поотделно (transaction based). Операторът поделя разходите за условно избрания път до товарите на всички участници, които използват елементите от този път, така че цената в пари/MW не е еднаква, както при методът на пощенската марка. Приетото опростяване задоволява страните поради по-голямото съответствие между договореното и реалното ползване в сравнение с метода на пощенската марка. В действителност потокът на активната мощност преминава през всички контури в зависимост от свързаността на мрежата през времето на сделката. Поради силното влияние на паралелните потоци върху претоварването на елементи от мрежата и неточния икономически сигнал на „договорения път“ върху ползвателите на тези елементи, този метод вече е официално отречен в Европа и почти не се прилага и в САЩ.

2.3. МЕТОД ОТЧИТАЩ РАЗСТОЯНИЕТО (MW-km метод) (Distance Based MW-Mile/km Method)

При този метод подялбата на разходите се основава на цена в пари/MW*km или в пари/MW*mile (в страни, които не прилагат метрична система за дължини). Произведението от предаваната мощност и разстоянието между производителя и потребителя, най-често се измерва по права (въздушна) линия, а не по някоя

инфраструктура (шосейна, железопътна или електроенергийна мрежа). Методът се прилага за всяка сделка поотделно. Той има значителни недостатъци и при него отново са необходими сериозни допускания, защото енергията в мрежите не следва единствен път от генератор до консуматор, нито захранването е винаги от един източник. Тъй като не съществуват ясно дефинирани зависимости между географско разстояние и реални разходи, точността е малка, но както и при горните два метода простотата и яснотата става предпочитание за някои участници.

2.4. МЕТОД ОТЧИТАЩ РАЗСТОЯНИЕТО ВЪЗ ОСНОВА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ПОТОЦИ (Power Flow Based MW-Mile Method)

Този подобрен метод прилага реални изчисления на електрическите потоци по мрежата според предаваната по всяка сделка мощност. В изчислението на плащанията на участниците са отчетени както предаваната от тях мощност, така и изминатото от мощността разстояние. За целта се използва постояннотоков изчислител за потокоразпределение и поделяне на разходите спрямо преминаващите активни мощности. Изчисленията са за моментни товари и инжекции имитиращи няколко характерни периода, резултатите от които се сумират. Плащането от всеки ползвател на мрежата, се представя като:

$$CC_i = \sum_j EC_j \frac{|P_j(i)|}{\bar{P}_j} \quad \text{, пари,} \qquad (1)$$

където CC_i е задължението на ползвателя *i*, EC_j е разходът свързан с елемента j от мрежата, $P_j(i)$ е активната мощност преминаваща през елемента j, причинена от сделката на ползвателя *i* и $\bar{P}_j$ е максималната преносна способност на елемента *j* (капацитет за електрически линии и максимална мощност за трансформатори). При този метод не могат да се възстановят всички разходи, защото натоварването на елемента *j* винаги е по-малко от преносната способност, затова е необходимо предварително адаптиране.

Един **адаптиран метод**, изразен с уравнението:

$$CC_i = \sum_j EC_j \frac{|P_j(i)|}{\sum_s P_j(s)} \text{, пари} \qquad (2)$$

дели общите разходи за елемента *j* на сумата от мощностите, породени от всички сделки s на всички ползватели на мрежата. Така се постига по-представително и по справедливо поделяне на разходите.

Има варианти на метода, които освобождават от плащане причинителите на потоци с противоположна на преобладаващите посока, тъй като те намаляват сумарния поток.

Други методи от тази група са „трасиране на потоците“ според избрани пропорционални съотношения, „метод на еквивалентните двустранни обмени“, „метод на зет възела“. На тях не се спираме защото не са намерили практическо приложение.

3. МЕТОДИ ЗА ОЦЕНЯВАНЕ ЧРЕЗ ПРИРАСТНИ ЦЕНИ

При тези методи цената се съобразява не спрямо общо вложените разходи в мрежата, а спрямо прираста им при нарастването на определен показател (мощност, товар, мрежови елемент и пр.).

$$MC_i = \frac{dC(P)}{dP_i} \text{ , пари/MW} \quad (3)$$

Както вложените така и прирастните разходи могат да бъдат краткосрочни или дългосрочни. При краткосрочните периоди съставът и капацитетът на мрежата се приема за фиксиран, което означава неизменност на разходите и нулева прирастна цена. При дългосрочните се отчитат въвежданите в работа нови мрежови елементи или извеждането на остарелите. Съставът на мрежата не е постоянен, което води до изменящи се разходи и реална прирастна цена.

Икономическата теория след 1970 г. е приела, че дългосрочните прирастни цени са най-ефективни, защото осигуряват максимално обществено благополучие. Това е валидно за икономическо общество състоящо се от производители и потребители. При по-сложните икономически общества различните видове посредничества изкривяват този принцип.

Разглеждайки електроенергийната система като единна икономическа общност между производители, мрежови оператор и потребители през 1988 г. Schweppe, F., Caramanis, M., Tabors, R., Bohn, R. дефинират оптимални моместни (спот) цени $\rho_к(t)$, най-общият математичен израз за които е:

$$\rho_k(t) = \frac{\partial[TC]}{\partial d_k(t)} \text{ , пари/MWh/h,} \quad (4)$$

където: $\rho_к(t)$ е цената във възел k през времеви интервал (час) t, TC са общите дългосрочни разходи (total costs) за доставка на електроенергията до всички консуматори, $\partial d_k(t)$ е нарастването на товара d във възел k през периода t.

Тези цени са възлови и имплицитно включват разходите на производителите и на предаващия оператор, в това число разходите за загуби и оскъпяването заради използване на агрегати извън подредбата по заслуги при избягване на претоварвания, но не могат да отразят постоянните разходи.

През 1990г. Willam W. Hogan насочва теорията на оценяване от „договорен път“ към „договорена мрежа“ [42]. Първоначалната идея предвижда дългосрочно договаряне на „права за физически пренос“ на електроенергията от възел до възел. Впоследствие Hogan отрича ефикасността на правата за физически пренос и пледира за въвеждане на „финансови права за получаване на оскъпяването“, което възниква между два възела при избягване на претоварване чрез по-скъпи агрегати, отколкото подредените по възходяща цена.

През 1996 г. Hung-Po Chao и Stephen Peck [20] изследват и доразвиват модела за пазар на права за пренос както между два възела, така и по отделни клони.

Въз основа на тези теоретични модели през април 1998 г. е въведено оценяване чрез прирастни цени на електроенергията и спомагателните услуги според местоположението (Locational Marginal Pricing - LMP) в обединението наричано PJM, през септември 1999 - в обединението New York, през януари 2000 г. - в

California, през февруари 2002 - в Texas, през март 2003 - в New England и през април 2005 - в обединението Midwest [1], [20]. Възловите цени на електроенергията в тези обединения се изчисляват и обновяват на всеки пет минути според предлаганите от производителите цени на пазара за електроенергия и на пазара за спомагателни услуги. Пазарите за разполагаема мощност, за оперативен резерв и за права за приходи от теснини са отделни от споменатите пазари за енергия и услуги [27], [30].

Всяка прирастна възлова цена се състои от три съставки: за енергия, за загуби по мрежата и за едно "фалшиво" плащане. То е за енергия, но е предизвикано от използването на по-скъпи производствени агрегати при недостатъчна преносна способност. Това плащане е в допълнение на основното плащане за достъп (payment for open access to transmission network), предназначено да възстанови вложените в мрежата разходи на оператора. Този псевдо преносен разход е наричан с различни имена: местна рента (locational rent), рента при претоварване (congestion rent), търговски придатък (merchandising surplus), плащане за теснини (congestion charge), разходи за повторно диспечиране (redispatch costs), стойност на теснина (congestion cost), приход от теснина (congestion revenue) и т.н.

Прирастните цени според местоположението не осигуряват възстановяване на разходите на мрежовия оператор, както и разходите на производителите за пускане, спиране или работа на празен ход. За включване на тези разходи са създадени алгоритми и изчислителни комплекси под общото название „разширено оценяване чрез прирастни цени според местоположението" (Extended LMP) [8].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статията представя сбит обзор на многообразните методи за оценяване ползването на електропреносната мрежа. Класическите методи за оценяване въз основа на вложените краткосрочни или дългосрочни разходи са разпространени заради по-голямата им простота и яснота, но те не удовлетворяват задоволително изискванията за ефективност и справедливост. В най-развитите пазари на едро плащанията за достъп до мрежата се допълват с плащанията за електроенергия и спомагателни услуги, оценявани чрез прирастни цени, в комбинация с плащания за ползването на участъци с недостатъчна преносна способност. Усъвършенстването на методите и инструментариумът за оценяване продължава с цел пълно възстановяване на разходите в системата, при максимална справедливост и икономическа ефективност.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите благодарят на Министерството на Образованието и Науката и на Научно-Изследователския Сектор на Технически Университет – София за оказаната помощ чрез финансирането на научно-изследователски проект в помощ на докторанти № 152ПД0036-01 на тема „Ценови образци при интелигентни преносни и разпределителни мрежи".

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Andrew L. Ott, Experiences of PJM and Other US Markets in a Deregulated Environment What has worked and what are the challenges, May 27, 2014.

[2]. Aniss Fradi, Sergio Brignone, Bruce F.Wollenberg, Calculation of Energy Transmission Allocation Factors (ETA Factors), TPS, V16, May 2001.

[3]. A.R.Abhyankar, S.A. Soman, S.A.Khaparde Optimization Approach to Real Power tracing: An Application to Transmission Fixed Cost Allocation, IEE TPS, V21, Aug 2006.

[4]. Alireza Sedaghati, Cost of Transmission System Usage Based on an Economic Measure, IEE TPS, V21, May 2006.

[5]. A. Zobian, Ilic, M.D., Unbundling of transmission and ancillary services: I. Technical issues II. Cost-based pricing framework, IEEE TPS, V12, May 1997.

[6]. Dimo Stoilov, Luben Stoilov, Improving inter-transmission compensation in EU, Energy Policy 62 (2013) 282–291.

[7]. Einhorn, M., Siddiqi, R. (Eds.), 1996. Electricity transmission pricing and technology, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.

[8]. Extantion Locational Marginal Pricing Filling, MITSO, 2011-12-22, Docket_No._ER12-668-000.

[9]. Felix F.Wu, Yixin Ni, Ping Wei, 2000. Power transfer Allocation for open Access Using Graph Theory-Fundamentals and Applications in Systems Without Loopflow, IEE TPS, V15, August 2000.

[10]. Franko Sore, H Rudnick, J Zolezzi "Definition of an efficient Transmission System using Cooperative Game Theory" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 4, Nov. 2006.

[11]. Francisco Danitz, Hugh Rudnick, Juan Zolezzi and David Watts, Use Based Allocation Methods for Payment of Electricity Transmission Systems, IEEE-PES/CSEE International Conference on Power System Technology, Kunming, China October, 2002.

[12]. Fred M. Westfield, Practicing Marginal-Cost Pricing: A Review, 1966; {based on James R. Nelson (editor) (1964), Marginal Cost Pricing in Practice. Prentice-Hall Series in Management. Prentice-Hall Inc, New Jersey}

[13]. Galiana, F., Ilic, M., A mathematical framework for the analysis and management of power transactions under open access, IEEE TPS, V 13, May 1998.

[14]. Galiana F.D., Conejo A. J., and Gil H. A. 2003. Transmission Network Cost Allocation Based on Equivalent Bilateral Exchanges, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 18, No. 4, November 2003.

[15]. Georgios Stamtsis, Power transmission cost calculation in deregulated electricity market, Dissertation, December 2003.

[16]. E. Handschin, L. Muller, T.Nikodem, R.Palma, Comparison of Pricing Methodologies for Wheeling Transactions in Liberalized Energy Supply Systems, DRPT 2000.

[17]. Happ, H. H., Cost of wheeling methodologies transmission pricing, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, No. 1, 1994.

[18]. Hugo A. G., Galiana F.D., Conejo A. J., 2005. Multiarea Transmission Network Cost Allocation, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005.
[19]. Hugo A. G., Francisco D. Galiana, Edson L.da Silva, Nodal Price Control: A Mechanism for Transmission Network Cost Allocation, IEE TPS, V21, Feb 2006.
[20]. Hung-Po Chao, Stephen Peck, A market mechanism for electric power transmission, Journal of Regulatory Economics, Volume 10, Issue 1, July 1996]
[21]. J.A. Kavicky, S.M. Shahidehpour, Parallel Path Aspects of Transmission Modeling, IEEE TPS, V11, Aug 1996.
[22]. Johannes Pfeifenberger, Kathleen Spees, Adam Schumacher, A Comparison of PJM's RPM with Alternative Energy and Capacity Market Designs, The Brattle Group Inc., September 2009.
[23]. Julio Usaola, A transaction-based method for allocation of transmission grid cost and losses, Electric Power Systems Research, vol. 76, no. 6, 2006.
[24]. Jiuping Pan, Yonael Teklu, Saifur Rahman, Fellow, IEEE, and Koda Jun, Review of Usage-Based Transmission Cost Allocation Methods under Open Access, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000.
[25]. Marangon Lima, J.W., 1996. Allocation of transmission fixed charges: an overview, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, No. 3, 1409-1418.
[26]. Max Jungqueira, Luiz Carlos da Costa, Luiz Augusto Barroso, Gerson C.Olivera, Luiz Mauricio Thome, Mario Veiga Pereira, An Aumann-Shapley Approach to Allocate Transmission Service Cost Among Network Users in Electricity Markets, IEE TPS, V22, Nov 2007.
[27]. Michael D. Cadwaladeri, Paul Gribik, William Hogan, Susan Pope,_Enhanced LMP and FTR, 060910.
[28]. Miloš Pantoš, David Grgič, Ferdinand Gubina, New Transmission Service Pricing Technique Based on Actual Power Flows, IEEE Bolonga Power Tech Conference, June 2003.
[29]. M. Oloomi-Buygi, and M. Reza Salehizadeh, Transmission Pricing based on Voltage Angle Decomposition, World Academy of Science, Engineering and Technology 17, 2006.
[30]. Paul R. Gribik, William W. Hogan, and Susan L. Pope, Market-Clearing Electricity Prices and Energy Uplift, 12 31 2007.
[31]. Pérez-Arriaga I.J., Rubio Odériz, F.J., Marginal pricing of transmission services: An analysis of cost recovery, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, No. 1, Feb. 1995.
[32]. Rohit Bhakar, V. S. Sriram, Narayana Prasad Padhy, and Hari Om Gupta, Probabilistic Game Approaches for Network Cost Allocation, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 1, February 2010.
[33]. Ross R.Kovacs, Allen L.Leverett, A load Flow Based Method for Calculating Embaded, Incremental and Marginal Cost of Transmission Capacity, TPS, V9, Feb 1994.

[34]. S. Abdelkader, Efficient computation algorithm for calculating load contributions to line flows and losses, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 153, No.4, pp. 391-398, July 2006.
[35]. Schweppe, F., Caramanis, M., Tabors, R., Bohn, R., 1988. Spot Pricing of Electricity, Kluwer Academic Publishers, Boston.
[36]. Stoilov, D., Stoilov, G., 2006. Inter-Transmission Compensation: Part I- An Open Issue, Proceedings of Balkan Power 2006 Conference, Ohrid, Macedonia.
[37]. Stoilov, D., Stoilov, G., 2006. Inter-Transmission Compensation: Part II- Network Use and Loss Assessment Method. Proceedings of Balkan Power 2006 Conference, Ohrid, Macedonia.
[38]. Stoilov, D., Dimitrov, Y., Francois, B., 2011. Challenges facing the European power transmission tariffs: The case of inter-TSO compensation. Energy Policy, vol. 39, issue 9, September 2011, p. 5203-5210.
[39]. Sudha Balagopalan, S. Ashok, and K. P. Mohandas, An Integrated Model for Transmission Sector using Cooperative Game Theory, 16th National Power Systems Conference, December, 2010.
[40]. Thilo Krause, Evaluation of Transmission Pricing Methods for Liberalized Markets, A literature Survey, EEH_PSL_2003_001.
[41]. Tsukamoto Y., Iyoda I., 1996. Allocation of Fixed Transmission Cost to Wheeling Transactions by Cooperative Game Theory, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 2, May 1996.
[42]. William W. Hogan, 1990-1992. Contract Networks For Electric Power Transmission: Technical Reference, September 1990, Revised February 1992.
[43]. William W. Hogan, 1998. Independent System Operator: Pricing And Flexibility In A Competitive Electricity Market, February 1998.
[44]. Yan, Yonghe, A multi-agent based approach to transmission cost allocation, Dissertation, May 2000.
[45]. Zolezzi J., Rudnick H., 2002. Transmission Cost Allocation by Cooperative Games and Coalition Formation, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 17, November 2002.
[46]. Zolezzi J., Rudnick, H. 2003. Consumers coordination and cooperation in transmission cost allocation, IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna-Italy, June 2003.

Автори: Димо Стоилов, доц. д-р, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*; Иван Загорчев, маг. инж. докторант, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *i.zagorchev@ker.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Мария Кънева

ФИЗИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ХИДРОАГРЕГАТ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ И УСТОЙЧИВОСТ НА ЕЕС

Рад Станев, Емил Рачев, Любен Кръстев, Илия Маджаров, Цветомир Асенов, Иво Домишлярски, Кристиан Иванов

Резюме: *Настоящата статия представя нова конструкция, схема и реализация на физически модел на хидроагрегат за изследване на електромеханични преходни процеси и устойчивост на електроенергийните системи. Направен е сравнителен анализ на съществуващите похвати за моделиране на агрегатите във водно електрическите централи (ВЕЦ). Предложен е нов подход и решение, което позволява изследването на широк набор от генераторни и двигателни режими по синхронен и асинхронен принцип с помощта на един хидроагрегат.*
Ключови думи: *физическо моделиране, електромеханични преходни процеси, устойчивост на ЕЕС, водно електрически централи, хидроагрегат, синхронен генератор, асинхронен генератор*

PHYSICAL MODEL OF HYDRAULIC TURBINE GENERATOR UNIT FOR TRANSIENT PROCESSES AND POWER SYSTEM STABILITY STUDIES

Rad Stanev, Emil Rachev, Lyuben Krastev, Iliya Madzharov, Tsvetomir Asenov, Ivo Domishlyarski, Kristian Ivanov

Abstract: *This article presents a new design, scheme and realization of physical model of hydroelectric unit for transient processes and power system stability studies. A comparative analysis of the existing approaches for modeling of turbine generator units in hydraulic power plants (HPP) is performed. A new approach and solution which enable estimation of majority of generator and motor synchronous and asynchronous states using one unit are proposed.*
Keywords: *physical modeling, electromechanical transient processes, power system stability, hydro power plants, hydraulic turbine generator, synchronous generator asynchronous generator*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електроенергийната система (ЕЕС) представлява една от най- сложните системи, създавани от човечеството [1-8]. Тази система се характеризира със сложни взаимовръзки между отделните елементи, което обуславя поведение на системата, което е неприсъщо на нейните единични елементи. Еволюционното развитие на ЕЕС води понастоящем до формирането на големи, пространствено разпределени, сложно преплетени, аналогово- цифрови структури, чието изследване е неотменна задача от поддържането на устойчивата съвместна рабо-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

тата. Поради характера на изследвания обект и тежестта на последствията в случай на неблагоприятно развитие на определен преходен процес, натурните изпитвания не са приложими [1-4,7]. Това налага изследванията на преходните процеси и устойчивостта на ЕЕС да се провеждат с помощта на модели, представящи характерните свойства на елементите и. Съществена роля в анализа на поведението на ЕЕС има моделирането на генериращите източници и в частност моделирането на хидроагрегатите във ВЕЦ. Значимо е и влиянието, което оказва синхронният и асинхронният товар при осъществяването на режимите и развитието на преходните процеси в ЕЕС.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

Възприето е представянето на действителните физическите обекти да се осъществява с помощта на *описателни*, *физически* и/или *математически* модели [1-4,7].

Описателните модели дават най- обща представа за състава на ЕЕС и същността на процесите, протичащи в нея [7].

Математическите модели заменят действителните физически обекти с математични описания и алгоритми. Понастоящем са получили най- широко разпространение, поради безспорните им предимства по отношение на приложимостта им при структурни подходи за анализ на системи с голям брой, различни по вид елементи, липсата на пространствено- времеви ограничения, икономическата си ефективност, бързината, лекотата и удобствата при представяне на получените резултати и др. [1-23].

Физическите модели заменят процесите в действителните физически обекти с експерименти, които се провеждат върху специализирани умалени обекти в лабораторна среда. Тези модели са ограничени в пространството, времето, свързаността си, способността си да осигурят подобие и др., но имат съществено предимство, че са непосредствени и представят по достъпен и нагледен начин процесите в действителните физически обекти и системи.

С помощта на разнообразни математически модели са решени широк кръг от съществуващи задачи при анализа на поведението на хидроагрегатите [14-19] и на генераторите в ЕЕС като цяло [1,2,4,7-11,20-23]. В контекста на управлението, устойчивостта и преходните процеси в ЕЕС най- широко се прилагат математически модели, почиващи на двуосната теория на синхронната машина с някоя от формите на уравненията на Парк [1,2,4,5,7,20-22], основно поради своята адекватност и приложимост в системи с голям брой елементи. По-точния, но и по-натоварващ от изчислителна гледна точка метод на крайните елементи се прилага в отделни частни случаи, основно свързани с конструктивни изследвания на електрическите машини [9,25].

Физическите моделни изследвания на електромеханичните процеси в хидроагрегатите в ЕЕС срещат значителни затруднения, най-вече поради невъзможността за постигане на пълно подобие между моделния и действителния физически обект [1]. Хидроагрегатът се състои от първичен двигател, който е механично свързан с електрическа машина. Първичният двигател може да бъде моделиран като се ползва малка водна турбина или електрически двигател [1,2]. Мнозинството от моделите за изследване на процесите в ЕЕС, ползват втората

възможност [8,12,13]. Тази реализация носи някои значими удобства, но от друга страна трудно може да представи в пълнота същината на процесите във водната турбина, турбинните регулатори и хидравличната част. Досега у нас не са реализирани модели за изследване на електромеханични преходни процеси и устойчивост на ЕЕС чрез хидроагрегати с водна турбина, извън тези, в областта на хидроинженерството [24]. В изследванията и обучението по проблематиката на преходните процеси и устойчивостта на ЕЕС, е силно застъпено ползването на сложни аналитични зависимости и работата със симулационен софтуер. Същевременно по естествен път се поражда необходимост от непосредствени и нагледни лабораторни изследвания с умалени физически модели.

Настоящата статия има за цел да представи разработката на нова конструкция и схема на физически модел на хидроагрегат за изследване на електромеханични преходни процеси и устойчивост на ЕЕС.

3. ИЗИСКВАНИЯ КЪМ МОДЕЛА

От съществена важност за моделният хидроагрегат е способността му да бъде приложим, в колкото може по- широк кръг от условия, като:

- позволява работа на електрическата машина по асинхронен и синхронен принцип;
- позволява работа на агрегата в генераторен и двигателен режим;
- дава непосредствен достъп до роторната и статорната намотка на електрическата машина, осигурява наблюдаемост и управляемост на параметрите и онагледява устройството и принципа на работа на електрическата машина и водната турбина.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ

За реализиране на модела следва да бъде определена конфигурацията на хидравличната схема.

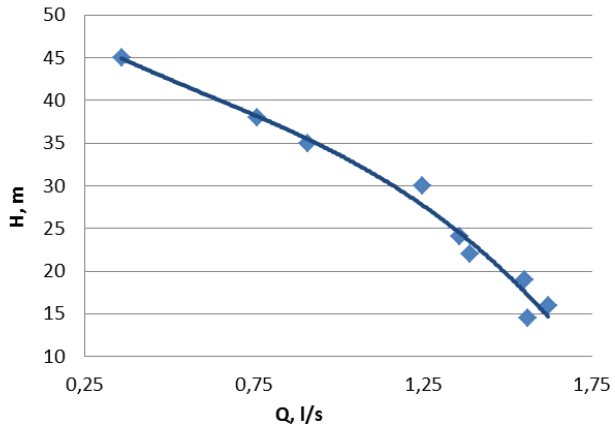
Затворените схеми намират най- широко приложение. При тях електрическа помпа, захранена от водосъдържател (резервоар) нагнетява водата и захранва моделната турбина, след което отработената вода от турбината се връща във водосъдържателя. Това решение се отличава с малка консумация на вода (основно за покриване на изпарения и загуби), но изисква допълнително оборудване, което може да бъде икономически обосновано при по-големи мощности и/или голяма часова използваемост на оборудването.

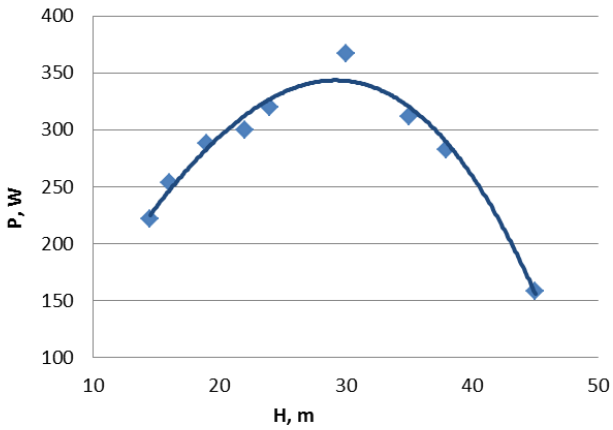
Табл.1

Параметри на източника

t, s	V, m3	Q, l/s	H, m	P_t, W
3,60	0,0056	1,56	14,5	221,5
3,00	0,0048	1,62	16	253,8
2,90	0,0045	1,55	19	288,3
3,65	0,0051	1,39	22	299,4
2,70	0,0036	1,36	24	319,6
3,30	0,0041	1,25	30	367,1
3,76	0,0034	0,91	35	311,8
6,40	0,0048	0,76	38	282,7
9,93	0,0036	0,36		158,6

Отворените схеми ползват еднократно водата, постъпваща от напорния водопровод, след което тя се отвежда. Решението е приложимо за модели с малка мощност и малка продължителност на моделния експеримент.





Фиг.1. Зависимост *H=f(Q)*

Фиг.2. Зависимост *Pt=f(H)*

Предвид характера на изследванията и обичайната продължителност на изследваните процеси (от няколко десетки секунди до няколко минути) разработеният модел ползва отворена схема със захранване от водната инсталация. Моделът предвижда възможност за разширение и работа по затворена хидравлична схема в случай на възникване на нужда от провеждането изследвания с по- голяма продължителност и/или мощност.

Табл.1, фиг.1 и фиг.2 показват характеристиките на първичния източник на захранващата водна инсталация в лаборатории „Устойчивост на електроенергийните системи“ и „Преходни процеси в електроенергийните системи“ към Електротехнически факултет на ТУ- София. Напорът *H, m* е определен чрез манометър, по приблизителната зависимост 1 bar = 10,197 m. Дебитът *Q* е определен по обемния метод, с помощта на съд за вода и хронометър, където *V* е обема, *t*- времето.

Теоретичната хидравлична мощност P_t, W е

$$P_t = \rho g Q H,\ W, \tag{1}$$

където $\rho \approx 1000 kg/m^3$ е плътността на водата; $g \approx 9{,}80665\ m/s^2$ е земното ускорение.

- **Турбина**

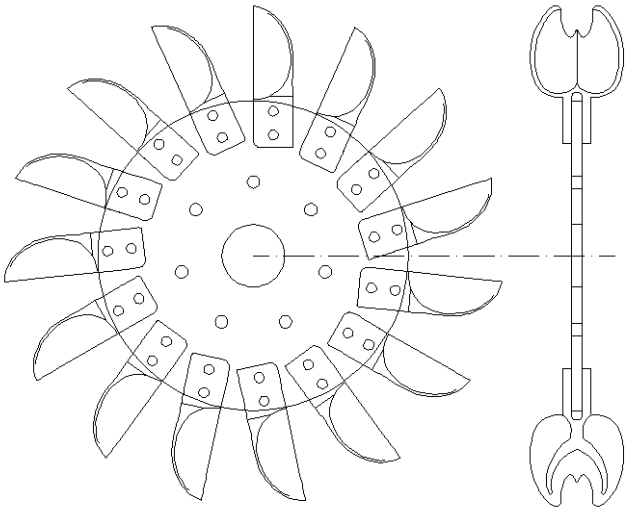
Отчитайки параметрите на първичния източник и набора електрически режими, в които се иска да работи, моделната турбина следва да позволява работа при малки дебити (Q=0,3- 1,5 l/s), средни напори (H=20-60m) и широк диапазон от обороти (n=500-1600 об./мин.). От разгледаните видове турбини най- подходящи параметри имат турбините тип Пелтон.

Като се изхожда от приблизителната зависимост

$$D_n = k_1 \sqrt{\frac{H_n}{n}},\ \text{m}, \tag{2}$$

където $k_1 \approx 37...41$; H_n, m е нетния напор, а $n, об./мин.$ са номиналните работни обороти на въртене на турбината е избрана турбина за микро ВЕЦ RISELEKTRO PT200/162/1500 (фиг.3) с максимален външен диаметър на работното колело $D_0 = 200mm$, основен диаметър $D_1 = 162mm$, разчетен диаметър на струята $d_0 = 16mm$, максимална мощност на вала $P_{\max} = 1500W$, максимален нетен напор $H_{\max} = 100m$, брой на работните лопатки $z = 15$.

Изработен е полимерен корпус с възможност за присъединяване на две дюзи и прозрачна част за наблюдение в предната и горната част. Дюзите (фиг.4) са с параболична форма и диапазон на изменение на диаметъра на струята $d_0 = 5 - 12mm$.



Фиг.3. Работно колело

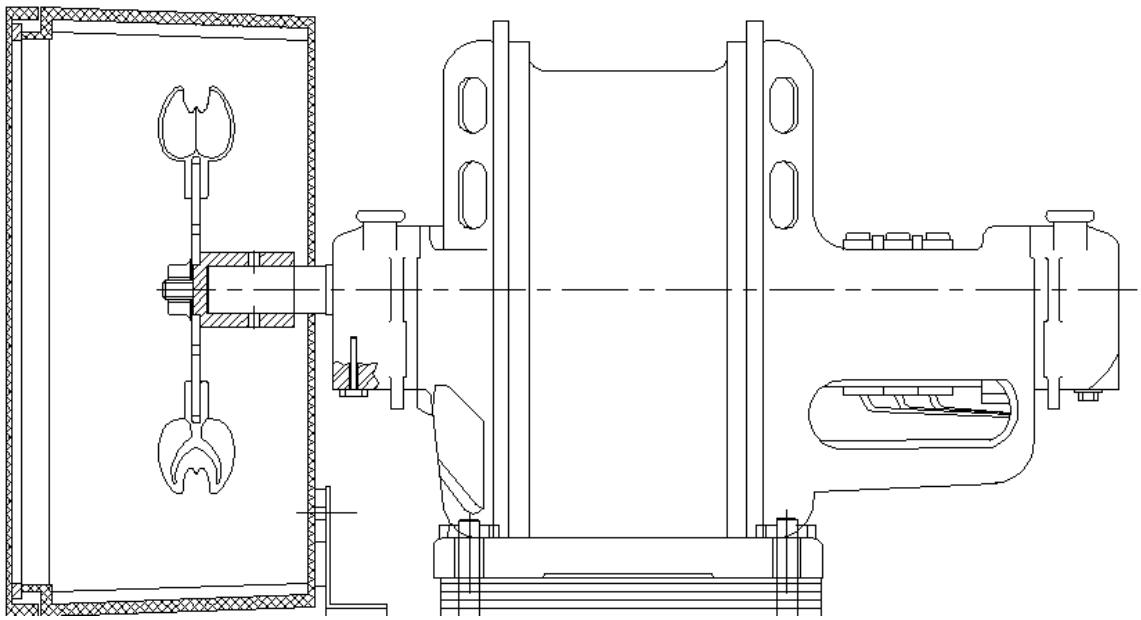
Фиг.4. Дюза и работно колело

- **Електрическа машина**

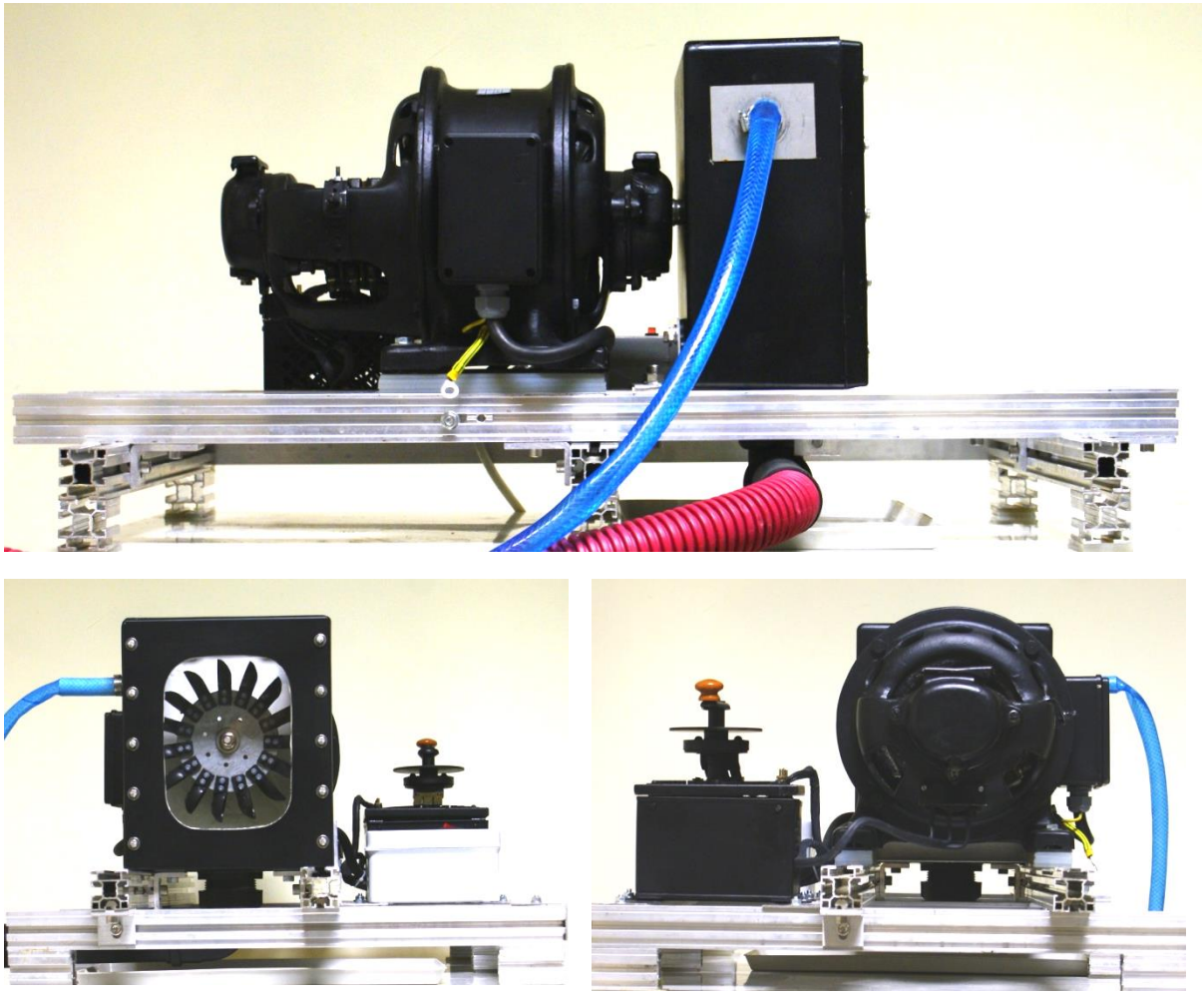
Електрическата машина следва да позволява работа съобразно многообразието от изисквания, поставени по-горе към нея. Избрана е асинхронна машина с трифазен навит ротор, открит тип със следните параметри: Номинално статорно напрежение: 380 V; Брой на фазите: 3; Номинална активна мощност в двигателен режим: 1450W; Номинална изходна механична мощност в двигателен режим: 1100W; Номинални асинхронни обороти в двигателен режим: 1400 об./мин; Номинални синхронни обороти: 1500 об./мин; Брой чифтове полюси: 4 бр.; Номинално роторно напрежение: 70 V; Номинален роторен ток: 10A

- **Съединяване на агрегата**

Хидравличната турбина и електрическата машина са свързани непосредствено с помощта на фланшов съединител. фиг.5 и фиг.6 представят сборния чертеж и съответно общия вид на агрегата.



Фиг.5. Сборен чертеж

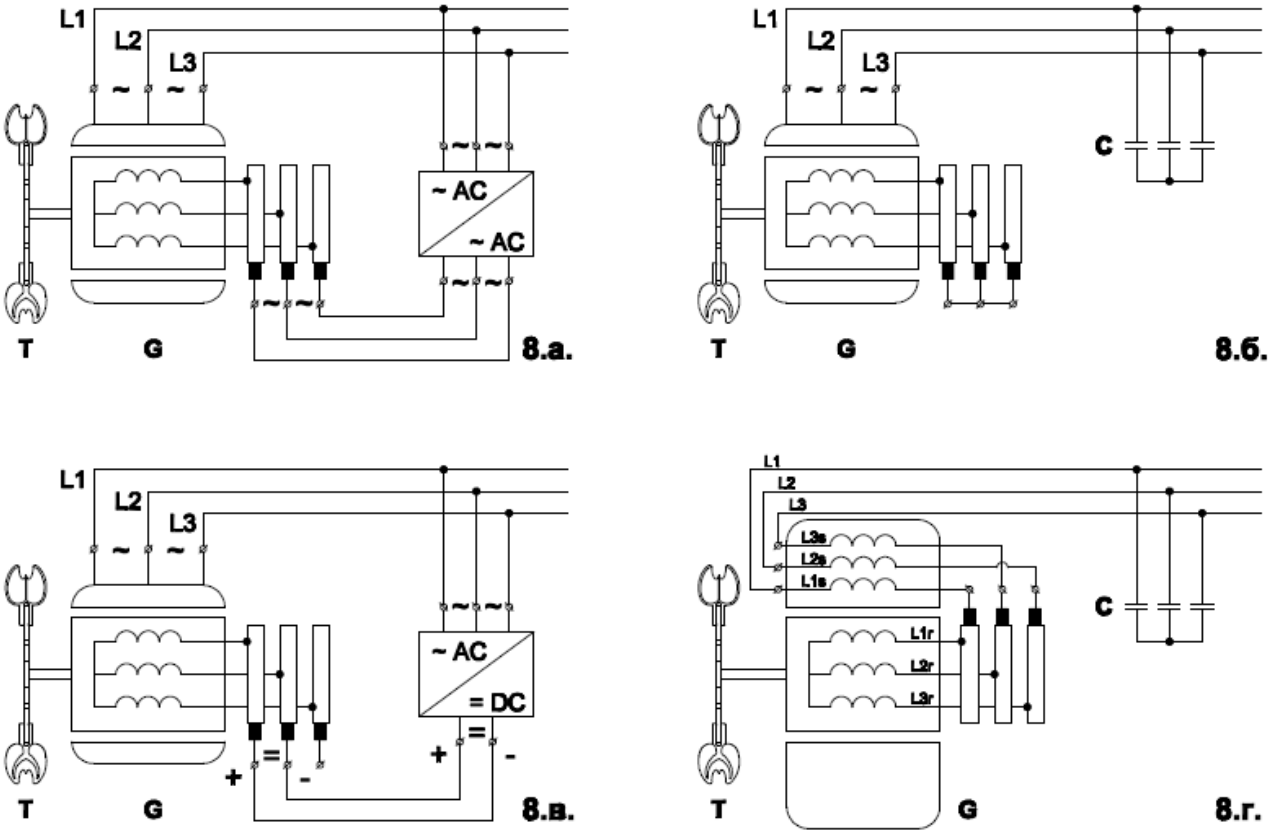


Фиг.6. Общ вид

3. РЕЖИМИ НА РАБОТА

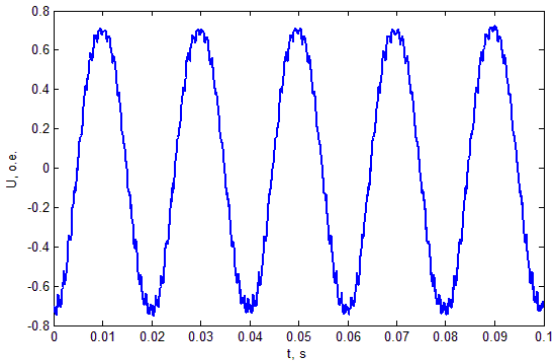
Моделният хидроагрегат е пригоден да работи, както в генераторни, така и в двигателни режими. В *генераторен режим* формираната от турбината механична мощност $P_{мех.}$ се подава на вала на електрическата машина, където мощността се преобразува в електрическа P_e. Моментът на електрическата машина M_e е отрицателен (спирачен). В *двигателен режим* формираната от електрическата машина механична мощност $P_{мех.}$ се подава на вала на турбината, която се върти в посока обратна на тази при генераторен режим. Атакуващият флуид противодейства на въртенето на вала на електрическата машина т.е. моментът на вала на турбината $M_{турб.}$ е отрицателен. Преминаването от генераторен в двигателен режим се осъществява механично чрез обръщане на работното колело или електрически чрез промяна на реда на фазите.

Генераторните режими, които могат да бъдат експериментално изследвани с помощта на разработения агрегат са като синхронен генератор (СГ) с променливотоково възбуждане (Фиг. 8.а.), асинхронен генератор (АСГ) с накъсо съединен ротор (Фиг. 8.б.), синхронен генератор с постояннотоково възбуждане (Фиг. 8.в.), последователно свързан синхронен генератор със собствено възбуждане (Фиг. 8.г.). При работа в режим на синхронен генератор с постояннотоково възбуждане е приложена нестандартна схема, при която две от роторните намотки са захранени от постояннотоков източник.

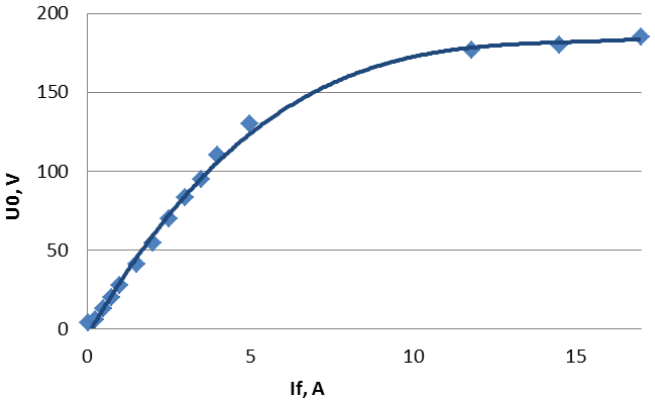


Фиг.8. Схеми на работа: а) СГ с променливотоково възбуждане; б) АСГ; в) СГ с постояннотоково възбуждане г) СГ с последователно възбуждане

Поради това, че машината не е първоначално замислена за работа по подобен начин, моделния агрегат позволява работа без значими насищания при статорни фазни напрежения до около 150 V.



Фиг.9. Зависимост на статорното напрежение U_0 от роторния ток I_f

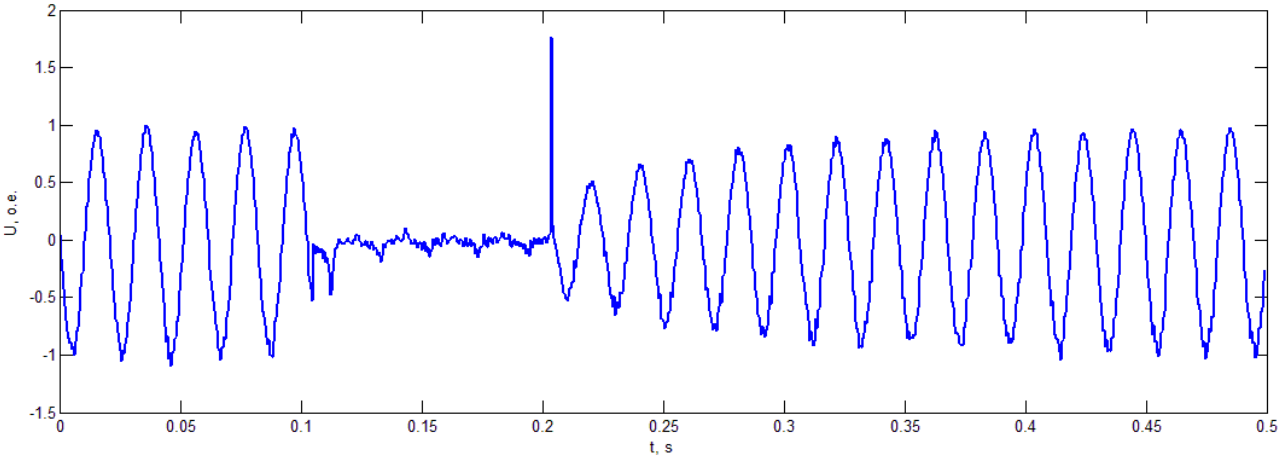


Фиг.10. Измерено напрежение на статора

Двигателните режими, които могат да бъдат изследвани са: асинхронен двигател с навит ротор и пускови съпротивления, асинхронен двигател с накъсо съединен ротор, двигател с променливотоково възбуждане на ротора от управляем инвертор, двигател с постояннотоково възбуждане на ротора.

4. РЕЗУЛТАТИ

С помощта на моделния агрегат са изследвани множество режими и преходни процеси. Фиг. 11 представя развитието на преходния процес при близко късо съединение с преходен характер.



Фиг.11. Напрежение на статора при близко късо съединение

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена е нова конструкция, схема и реализация на многофункционален моделен хидроагрегат за изследване на преходни процеси и устойчивост на ЕЕС. Решението дава възможност за експериментални изследвания на широк набор от преходни процеси при синхронни и асинхронни режими на работа с помощта на един и същ физически модел. Направените експерименти показват, че разработката може да намери широко приложение при физическите моделни изследвания на преходните процеси, устойчивостта и управлението на поради своята гъвкавост, удобство и многофункционалност.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват своите благодарности на РИС ЕЛЕКТРО ООД за финансирането на настоящия проект.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Богатев К. (1959), ***Устойчивост на електрическите системи***, Държавно издателство „Техника“, София 1959 г.

[2] Богатев К. (1970), ***Преходни процеси в електрическите системи***, Държавно издателство „Техника“, София 1970 г.

[3] Нотов П. (1975), ***Преходни процеси в електроснабдителните системи***, Държавно издателство „Техника“, София 1975 г.

[4] Нотов П., К. Герасимов (1997), ***Преходни процеси в електроенергийните системи***, Издателство на Технически университет- София, София 1997 г.

[5] Нотов П., С. Неделчева (2009), ***Електроенергетика***, част първа, Издателство на Технически университет- София, София 2009 г.

[6] Нотов П., С. Неделчева (2009), ***Електроенергетика***, част втора, Издателство на Технически университет- София, София 2009 г.

[7] Герасимов К., Й. Каменов (2007), ***Моделиране в електроенергийните системи***, Изд. Авангард Прима, София 2007 г.

[8] Цолов А., (2003), ***Ръководство за лабораторни упражнения по автоматиззация на електроенергийните системи***, БПС, София 2003 г.

[9] Zaharinov K., D. Sotirov, P. Rizov, A. Krumov, A. Tzolov, et. al. (2002), ***FEM`s Application for Determination the Variations of the Induction Machine Resistance Because of Electrical Alterations***, 10th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, 2002

[10] Крумов, А., А. Цолов, П. Ризов, ***Математическо моделиране на системата за собствени нужди 6kV в АЕЦ “Козлодуй“***, Енергиен форум 2001, Варна, юни 10-12, том II, стр. 142-145.

[11] Крумов А., ***Математическо моделиране на електромашинни агрегати за собствени нужди на електрическите централи задвижвани от асинхронни двигатели с дълбоки канали в ротора***, Изв. ТУ, София, 2000 г.

[12] Овчаров А., А. Крумов, Л. Петканчин, ***Ръководство за лабораторни упражнения по електрическа част на електрически централи***, Издателство на Технически университет- София, София 1994 г.

[13] Овчаров А., А. Крумов, Д. Тодоров, ***Ръководство за лабораторни упражнения по електрическа част на електрически централи и подстанции***, Издателство на Технически университет- София, София 2009 г.

[14] Puleva T., L. Petkanchin (2006) ***Modeling of the hydro-generator local network operation and load disturbance rejection***, International Journal of Nuclear Governance, Economy and Ecology, Vol. 1, №1, pp. 96-108.

[15] Нотов, П., Р. Станев, и колектив, ***Математическо моделиране на електромеханичните процеси във ВЕЦ при предаварийни и аварийни състояния***

на електроенергийната система, сп. Енергетика, 2009 бр. 1, стр. 24-30

[16] Acakpovi A., E. Hagan , F. Fifatin, ***Review of Hydropower Plant Models***, International Journal of Computer Applications, Vol. 108- 18, December 2014

[17] Sanchez-Garcia, H.M.; Asiain-Olivares, T.I.; Ruiz-Vega, D., ***Updating the automatic voltage regulators of a micro network power system simulator***, in *North American Power Symposium (NAPS), 2010* , vol., no., pp.1-8, 26-28 Sept. 2010

[18] Prillwitz, F., S. E. Al-Ali, T. Haase, H. Weber, L. Saqe, ***Simulation Model of the Hydro Power Plant Shkopeti***, 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, September 9 - 13, 2007

[19] Kishor N., S. Singh, A. Raghuvanshi, ***Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control***, Energy Conversion and Management, Elsevier,Volume 47, Issues 18–19, November 2006, pp. 3119–3137

[20] IEEE Guide: ***Test Procedures for Synchronous Machines***, IEEE Std 115 1995, IEEE, Nueva York, N. Y., EUA.

[21] ***Methods for Determining Synchronous Machines from Test***, IEC International Standard No. 34-4, 1995.

[22] Kirtley J., ***Introduction to Power Systems- Synchronous Machine and Winding Models***, Massachusetts Institute of Technology, DEECS, 2011

[23] Gerasimov K. K., Y. E. Rangelov, Ch. K. Ivanov, Y. L. Kamenov., ***MATLAB Based Software for AVR and PSS Tuning***, AUPE, Vol. 4, №1, 2005. pp. 145-150.

[24] Обретенов В., Ц. Цалов, К. Димитров, К. Ангелов, ***Стенд за изпитване на Пелтонови водни турбини***, ЕМФ 2003, т.I, стр.167-172, Варна, 2003.

[25] Chan T., W. Wang, L. Lai, (2010), ***Field Computation and Performance of a Series Connected Self-Excited Synchronous Generator***, IEEE PES General Meeting, 2010, pp.1-6, 25-29 July 2010, doi: 10.1109/PES.2010.5589765

Автори: Рад Станев, доц. д-р инж., BWL, катедра „Електроенергетика”, ТУ-София, E-mail address: *rstanev@tu-sofia.bg; Емил Рачев*, гл. ас. д-р инж., катедра „Електрически машини”, ТУ-София, E-mail address: *ehra@tu-sofia.bg; Любен Кръстев*, маг. инж.*; Илия Маджаров*, бак. инж.*; Цветомир Асенов*, бак. инж.*; Иво Домишлярски*, бак. инж.*; Кристиян Иванов*, бак. инж.*;*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Димитър Богданов

УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕТО В ЕВРОПЕЙСКИЯ СЪЮЗ

Теодора Терентева, Димо Стоилов, Никола Николов, Иван Загорчев

Резюме: *Тази статия представя основни знания за управление на електропотреблението, кратък исторически преглед на развитието на отзива на търсенето в САЩ и Европа, както и съвременното състояние на политиката за управление на товарите в Европейския съюз. Вместо към отзив на товарите при изменение на цените в реално време едновременно в преносната и разпределителните мрежи, сега политици и бизнес насочват управлението на потреблението към агрегиране на консуматорите и участие (на агрегатора) в пазара на едро, където действат ежечасови или половин часови цени за електроенергия.*
Ключови думи: *Управление на потреблението, отзив на търсенето, отзив на товарите*

DEMAND SIDE MANAGEMENT IN EUROPEAN UNION

Teodora Terenteva, Dimo Stoilov, Nikola Nikolov, Ivan Zagorchev

Abstract: *This paper presents basic knowleges on Demand Side Management, breaf historic revew of the demand respons development in USA and Europe, as well as the present policy for demand response in the European Union. Business and politics guide demand response towards aggregation of loads for the aggregators' participation in the wholesale market instead of towards simultaneous real time pricing in transmission and distribution networks.*
Keywords: *Demand Side Management, Demand response, Load response*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Управление на потреблението (Consumption control или management) е широкообхватно понятие, което включва всички форми на въздействие върху консумацията на енергия: i) мерки за енергоспестяване (energy saving mesures), които най-често са мерки за енергийна ефективност (Energy Efficiency Mesures), ii) мерки за парично спестяване (Money Savings), които най-често са мерки за изместване на периодите на консумация (Load Shifting), iii) мерки за балансиране на електроснабдителната система (Demand-Supply Balancing) и пр. [1], [2]. След планиране, проектиране и внедряване на предпоставките за някаква мярка, тя се прилага в реално време и тогава се използва понятието **управление на товарите** (Load Management или Load Control).
Ако не се разграничава товара в MW от потреблението в MWh се употребява

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

събирателното понятие **управление откъм търсенето** (Demand Side Management-DSM), което означава управление на онази част от електроенергийната система, която е разположена зад електромера на потребителя, сиреч управление на устройствата за преобразуване на електрическата енергия откъм страната на консуматора. Когато това управление е в резултат от реакция на консуматора към изменението на цените се използва понятието **отзив на търсенето** (Demand Response-DR). Често понятието „търсене“ (demand) е синоним на „товар“ (load) затова “отзив на търсенето“ е синоним на „отзив на товара“ (load response)
Ефектите от управление на потреблението са многообразни [3]. Най-често се цитира потенциала за намаляване на върховите товари [4]. Според [5]: *‘Потенциалът от отзива на потребителите на електроенергия в Европейския съюз е огромен: върховият товар може да бъде намален с 60 000 MW или около 10 % от общия върхов товар в Европа.’*

2. КРАТКА ИСТОРИЯ НА УПРАВЛЕНИЕТО НА ПОТРЕБЛЕНИЕТО

Управление на товарите/потреблението съществува откакто съществуват електроенергийни системи. Това управление придобива жизнено значение в периоди на недостиг на производствени мощности, независимо от първопричината за възникване на дефицита. В такива случаи следва понижаване на честотата или превишаване на договорения междусистемен внос или понижаване на напреженията. По-голям дефицит може да предизвика разпадане на ЕЕС на части и погасяване на големи райони. За да се предотвратят тежките технически и икономически последствия в такива случаи се прилага дозирано ограничаване или прекъсване на част от потребителите. В зависимост от степента на технологичните и комуникационни възможности се прилага ръчно или автоматично пряко изключване на захранващите електропроводи (Direct Load Control - DLC, или Curtailment) или степенувано изключване на групи от изводи или определяне на квоти/дажби по време и мощност (Rationing) или друга форма за непряко управление на товарите. За тях Theodore Hesser and Samir Succar казват:*‚Ръчното изключване на товарите не представлява „ефективност (оптималност) по Парето‘. ‘Автоматичното честотно или напреженово разтоварване представлява груба/силова форма на управление на товара‘* [6].
До към петдесетте години на миналия век малко електроенергийни компании са договаряли предварително ценови отстъпки или други условия с прекъсваемите потребители. Тогавашните форми на ограничаване на товарите са предшественици на съвременните форми на ограничаване на товара (Demand Limiting - DL), управляване на товара (Demand Management - DM), отзив на товара (Demand Response - DR).
Първоначално европейците се стремили да намаляват върховите натоварвания и по този начин да спестяват влагане на инвестиции във върхови агрегати, които имат малка използваемост. Като пионери на автоматичното ограничаване на върховите товари се смятат швейцарските инженери от държавната електрическа компания Swiss electric power monopoly, които са изпращали вълна/импулс по захранващите електропроводи, който е изключвал съответния товар (перални машини или бойлери). Този прост, но ефикасен начин се е из-

ползвал около 50 години [4].
Към средата на миналия век на електроснабдителните компании се предлагат прости устройства за проследяване на товара (simple demand-drag indicators - Schleppzeiger), чрез които се регистрира максимално използваната мощност от отделни консуматори. Към 1960 г. небезизвестната швейцарска компания Landis and Gyr произвежда и предлага електромери ‘Duomax‘, които могат да изключват машини или други захранвани уреди, когато мощността им надвиши определена величина. По същото време широко се разпространяват електромери, които позволяват прилагане на различни цени през различни часове от денонощието или сезона. От края на 60-те години до началото на 80-те са прилагани сравнително прости и евтини устройства, в т.ч. радио управляеми подгреватели на вода или помещения, но компютърните технологии се появяват и разпространяват едва след поевтиняването на електрониката. По това време започват да се внедряват мерки за енергийна ефективност като първоначални форми на политика за енергоспестяване и намаляване на разходите за енергия.
Към средата на 80-те компании като RSW, Mensch & Technik, Borer, Janitza и др. започват да разработват и въвеждат компютърно управляване на товари като алтернатива на върховите производствени мощности в Европа и в отговор на разрастващите се анти ядрени движения. Тези фирми постоянно усъвършенстват изделията и алгоритмите за управление на товарите. Понастоящем около 50 европейски компании предлагат различни форми на интелигентни (intelligent, smart) устройства и системи за управление на товарите, в съчетание с масово разпространяване на хитри (smart) електромери. Много индустриални или търговски или обществени потребители, както и правителствени агенции прилагат различни способи за ограничаване на върховите товари, което им създава големи финансови ползи.
Въпреки наличието на теоретични трудове, поради относително ниските цени на енергията, мерките за управление на товарите в САЩ остават примитивни и започват да се развиват едва след енергийния недостиг от 1997 г. и уроците на Калифорнийската криза през 2000 г. и последващите няколко години [4]. През 1978 Sanford V. Berg публикува сравнение и анализ на ползите и разходите между пасивно и активно управление на товарите [7]. Той нарича използването на устройства за прекъсване на определени товари в мястото на потребление „въвеждане на дажби“ (rationing) или „активно управление“ (active load management) или „пряко управление на товара“ (direct load management), например чрез часовник или чрез радиосигнал или високочестотен импулс по мрежата или ниско честотна вълна, също предавана по мрежата или по телефонен кабел. Той нарича пасивно (passive) управлението на товари чрез прилагане на върхови цени (peak load pricing-PLP) като инструмент за енергоспестяване и/или преместване на товара.
Оттогава насам започват дискусии и опитно въвеждане на различни системи от тарифни цени, които по-късно започват да се наричат с общо понятие „динамични цени“. Първоначално се прилага терминът „Demand-side management - DSM“, който по-късно се трансформира в „отзив на търсенето“ (Demand response) [8], [9], въпреки че за първи път то е въведено още през 1938 г. от Bolton

D. J. [10].

DSM се отнася преди всичко към усилията и мерките, които прилагат електроенергийните и газови компании, за да изменят товарите чрез стимули към енергийна ефективност главно при частните потребители [11].

След 2000 година в САЩ се разпространиха много опитни програми за отзив на потребителите чрез различни динамични цени и усъвършенстване на инфраструктурата за измерване на електроенергията (advanced metering infrastructure -AMI). Например в [12] е представена теорията за стимулиране отзива на товарите чрез цени (The Theory of Demand Side Price Incentives). Най-естественият, но за съжаление най-последният, е методът за стимулиране чрез „цени в реално време" (ЦРВ) (real-time pricing of electricity - RTP). ЦРВ са различни за всеки час и всеки ден, но се колебаят много в зависимост от цените на едро. Това не означава, че консуматорите трябва да купят цялото си количество по ЦРВ, защото те могат да договорят дългосрочни доставки на определени цени, а разликите до своите нужди да купуват/продават по ЦРВ. И докато ЦРВ тепърва ще се внедряват в пазарите, то в тях вече действат по-прости методи.

Най-популярен е методът за две или три цени според зони/участъци/блокове от време за ползване през денонощието и през годината (time-of-use - TOU). Тези две или три цени се комбинират с една постоянна съставка[1], пропорционална на максималния петнадесет минутен товар по време на годишния или сезонен общ максимален товар. (Към тях са включени други съставки: зелена добавка, местни такси, добавка за разчистване на ядрени централи и пр.).

Противоположен е методът за тарифи с прекъсване, което значи, че консураторът поема задължение по всяко време при поискване (най-често с шапка на общата продължителност) да намалява или прекратява ползването на електроенергия. За консумираната енергия по време на поискано и изпълнено намаление плаща по-ниска цена (получава отстъпка - rebate), но ако не изпълни задължението си, заплаща консумираната енергия 30 пъти по-скъпо.

Елементи на ЦРВ има и методът известен под името „цена при критически връх" (critical peak pricing – CPP). Обикновено това е една допълнителна цена в зоналната тарифа, която се въвежда с предизвестие от оператора при прогнозирано или настъпило критично натоварване. Методът съдържа „шапка" на общото времетраене от 50 до 100 часа през годината. Има разновидност с две критични върхови цени, които се избират според затруднения случай.

Последен е методът известен под названието „програми за намален товар" (demand-reduction programs - DRPs). При него на удостоверени потребители предварително се определя един базисен товар, наричан „базова линия" (base line). Удостоверени са големи индустриални потребители, присъединени към мрежа с напрежение над 100 kV, както и електроснабдителни компании, които участват в пазара на едро със сумарния товар от всичките си възли по границата с тази мрежа. Те предлагат на балансиращия пазар цена за намаление на товара до базовата линия и ако регионалният оператор приеме предложението, то се разп-

[1] У нас трите цени за консумирана електроенергия се комбинираха с постоянна съставка, известна като „такса електромер", която бе отменена през 2006 г.

лаща като равностойно на предложението на производителите за повишаване на мощността на производстствен агрегат за определено време.
По този начин се изкривява смисъла на понятието "отзив на товара", а потребителите се мотивират към корупция. *'Всяка парадигма, съгласно която се продава редукция на товара спрямо базова линия ще избутва прилагането на преки ценови въздействия (critical peak and real-time pricing) върху еластичните товари. Прилагането на такъв изкривен отзив ще работи против истинското равнопоставяне на потребителите и производителите. Има значителен риск от създаване на условия за прилагане на много недостоверни отзиви, вместо прилагане на истински цени в реално време и реална еластичност при консуматора. Така консуматорите могат да получават свръх плащане, което не заслужават.'* [13].
Въпреки ясно оформено съзнание за икономическа несъстоятелност на последния метод, в резултат от многогодишни дискусии, в т.ч. цитата от [13], Федералната комисия за енергийно регулиране в САЩ е разрешила прилагането на този метод [2].
В края на 2009 г. PJM предлага на FERC въвеждане на допълнителна форма на отзив на товара, наричана *„отзивчив към цената товар"(Price responsive demand - PRD)* [14]. Тази форма на отзив допълва досегашната. Тя се основава на *„динамични цени на дребно"(Dynamic retail rates - DRR).* Това означава цени на дребно, които следват измененията на цените на едро. Така крайните консуматори на дребно ще могат да реагират на измененията на цените, но за разлика от консуматорите на едро няма да получават заплащане за намалението на своя товар според съществуващия отзив. Те ще получават ползи от намаленото потребление при високи цени и обратно - увеличено потребление при ниски цени.
Освен споменатите до тук, в PJM се прилагат още две форми на отзив на товара: *Програма за авариен отзив на товара* (*Emergency Load Response Program)* и *Програма за отзив на товара преди авария (Pre-Emergency Load Response Program)* [15]. Те се прилагат за общия товар на електроразпределителна компания, получен като сума от товарите в определени отнапред възли на преносната мрежа.
Характерният за PJM пазар на производствена мощност (Capacity Market) задължава всяка електроснабдителна компания да обезпечи разполагаема работна и резервна мощност през следващите три години в размер, определен според модела за сигурно електроснабдяване на местните потребители, захранвани от мрежата на съответната компания. Още по-характерно е, че за разполагаема мощност се приемат и доказаните намаления на товари, в резултат от мерки за отзив на товарите.
Предложеният в [16] Моментен пазар на електроенергия предхожда разнообразието на отзивите на товарите, прилагано в PJM. Моментният пазар е ефикасна среда за прилагане на цени в реално време, които се актуализират всяка минута според фактическите измерени мощности и топология на ЕЕС. При такъв пазар

[2] Заповед (FERC Order No. 745, March 2011), която е отменена от United States Court of Appeals For The District Of Columbia Circuit на 23 май 2014, но се преразглежда след обжалване

може да бъде постигнато оптимално управление на товара според личните интереси на всеки потребител.
През 2011 г. се появява ново понятие: *"диспечиране на товара" (demand dispatch)* [17]. Чрез него се изразява свойството *'товарът да следва производството'* в допълнение на основното понятие *„диспечиране на снабдяването" (Supply Dispatch),* което изразява: *„производството следва товара"*. Това допълнение е предизвикано от разгръщането на прекъсваемите възобновяеми източници. То позволява участие на потребителите в оптимизацията на общественото благополучие при уравняване на търсенето и предлагането на пазара на електроенергия.
Изследванията, разработките и публикациите относно управлението на товарите нарастват и се усъвършенстват заедно с развитието на електроенергийните и информационни технологии. Например в [18] авторите правят аналогия между смарт мрежа и интернет. Те видоизменят наричания CIMEG образец за управление на местна мрежа (local area grids-LAGs) във виртуален енергиен буфер между потребителя и снабдителя (a virtual energy buffer between customers and suppliers), прилагайки управление на товара основано на образци за движение на динамичните данни (dynamic data driven paradigms).
Успоредно с усъвършенстването на методите и средствата за управление на товарите се проявяват нови технологични и организационни проблеми, някои от които са свързани с разпространението на много пресекваеми генератори из разпределителните мрежи, други с отказ от ядрена енергетика, трети със намаляването на емисиите на въглероден двуокис. Това усложнява задачите за надеждност и сигурност на електроснабдяването [19], [20] и предизвиква радикални промени в енергийните пазари, характерен пример за което е Германия [21]. При бъдещото опериране на електроенргийните системи се очаква увеличаване на случаите когато уравнителните цени на пазара на едро ще се установяват от предложенията на консуматорите, които са по-ниски от предложенията на производителите на върхова енергия.

3. КРАТЪК ПРЕГЛЕД НА СЕГАШНОТО СЪСТОЯНИЕ ПО УПРАВЛЕНИЕ НА ПОТРЕБЛЕНИЕТО В ЕВРОПЕЙСКИЯ СЪЮЗ

В Директива 2009/72/ЕС от 13 юли 2009 г., относно общите правила за вътрешния пазар на електроенергия, управлението на потреблението е определено като синоним на енергийната ефективност в смисъл на *общ подход, насочен към намаляване на енергийното потребление или върховите товари чрез инвестиционни мерки или договори за прекъсваемо електроснабдяване, ако това е най-ефективния способ, отчитайки положителното въздействие върху опазване на природата и върху мрежите.* Директивата равнопоставя провеждането на търг за нови мощности с търг за мерки по енергийна ефективност/отзив на товарите. Равнопоставени са също усилването на мрежите с използването на разсъредоточени агрегати или с отзив на товари.

Директива 2012/27/EU от 25 октомври 2012 г. относно енергийната ефективност разглежда *отзивът на търсенето като важен инструмент за повишаване на енергийната ефективност, значително увеличаващ възможността на потребителите да намалят или изместят потреблението. Отзивът на търсенето може да се основава на ценови сигнал при крайните потребители или на автоматизация на сградните инсталации. Условията за и достъпът до отзив на търсенето трябва да бъдат подобрени, в т.ч. за малките потребители. ... Държавите членки трябва да обезпечат националните регулаторни органи… да проявят общ подход за пестене на енергия както при снабдяването с енергия, така и при крайните консуматори…да осигурят, че мрежовите тарифи и регламенти стимулират енергийната ефективност и подкрепят динамичното оценяване на мерките за отзив на крайните товари… да има стремеж за обединяване на пазара и за еднакви възможности за достъп до него на изричните производители и на източниците при потребителите (товари, проявяващи се като производител и потребител - протребител).*

Директивата определя фигурата на обединител/aggregator/ като доставчик на услуга за комбиниране на краткосрочните товари на много потребители за продажба или за търгуване на организиран енергиен пазар.

Директивата задължава държавите членки да отстранят пагубни за ефективността и отзива на товарите съставки в цените за производство, предаване, разпределение, снабдяване или участие на балансиращ пазар и доставка на спомагателни услуги. ... държавите членки трябва да обезпечат мрежовите оператори да стимулират участието на консуматорите в подобряване ефективността на мрежата и чрез техния отзив.

Държавите членки трябва да обезпечат националните регулаторни органи да насърчават участието на потребителите в пазара на едро и дребно чрез своя отзив, успоредно на производителите.

Операторите на предавателната и разпределителни мрежи трябва да оценяват равнопоставено техническите възможности и доставянето на спомагателни услуги от различен произход: отзив на товар или активиране на агрегати.

…държавите членки трябва да поддтикват достъпа и участието на отзива на товарите в пазарите за балансиране, резерви и други спомагателни услуги чрез своите регулаторни органи и мрежови оператори.

Мрежовите тарифи или тарифите на дребно могат да поддържат динамично оценяване на мерките за отзив на товара при крайните потребители като:

(a) цени според времето за ползване (time-of-use tariffs);
(b) цени при критически връх (critical peak pricing);
(c) цени в реално време (real time pricing); и
(d) отстъпка при намаляваяне на товара през върха (peak time rebates).

До 30 април 2014 г. и на всеки три години след това Държавите членки трябва да представят на Европейската комисия Национален план за действията по

енергийна ефективност. Освен това всяка година до 30 април държавите членки трябва да представят ежегоден доклад за напредъка по постигане на националните цели по енергийна ефективност. Освен другото чрез доклада Държавите членки ще информират Европейската комисия за предприетите мерки съгласно член 15 за осъществяване и развитие на отзива на товарите.

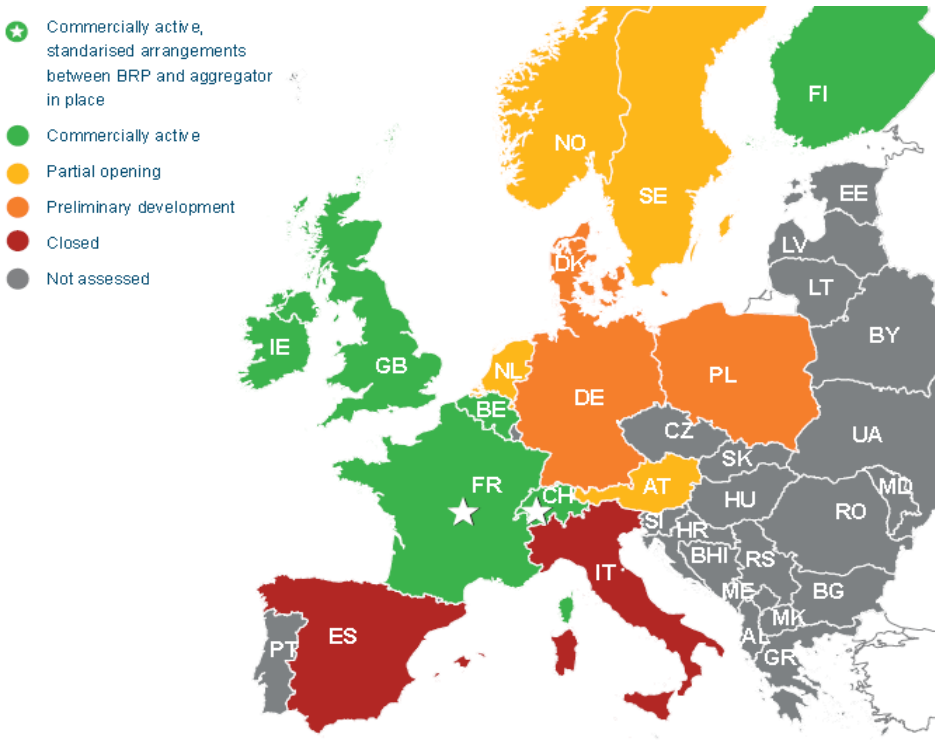
Разглеждайки картата на фиг.1 за отзив на товарите в европейските страни през 2015 г. виждаме, че България е в групата на неоценяваните държави [22]. Защо ли? Анализирайки Националния план за действие за енергийна ефективност 2014-2020 г. установяваме, че България не извършва действия по отзив на търсенето на електроенергия [23]. Вместо „отзив на търсенето/товара“ докладът използва термина „оптимизация на потреблението“, така както и българския превод на Директива 2012/27/EU[3]. Терминологичната грешка е само симптом за неразбиране на този значим проблем, заменено в доклада с формални пожелателни фрази, прикриващи истината.

Анализирайки обстойните проучвания в [5], [22], [24], [25], [26], [27] и др. могат да се направят много изводи за състоянието и близкото бъдеще на отзива на товарите в Европа. За съжаление проучванията не третират процесите при прилагане на цени в реално време при крайните консуматори, а третират само цени в реално време при пазара на едро или „real-time tariffs” при пазара на дребно, което е твърде различна материя от цени в реално време едновременно в преносната и в разпределителните мрежи. Очевидно менението на персонала на Европейската комисия и позициите на бизнеса са повлияни от развитието на отзива на товарите в САЩ. Европа изглежда е готова да повтори тамошните грешки по заплащане на отзива на товарите на балансиращите пазари. Изглежда също, че европейците ще платят най-напред за създаването и обогатяването на новия вид посредници, наричани обединители (*aggregators),* и едва след много години ще насочат развитието на електроенергийните пазари към цените в реално време при всички крайни консуматори: *‘…the demand response framework provided in the Electricity Directive and in the Energy Efficiency Directive will enable and promote technologies which allow the* ***aggregation of the energy consumption*** *of many individual consumers' on a voluntary basis. This can open up the market to exploit the potential of demand response, putting demand on an equal footing with supply in the* (wholesale) *market.’* [5].

4. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управлението на потреблението извървя дълъг път през своята 130 годишна история: от грубото ръчно или автоматично изключване на захранващи изводи от подстанциите, през селективно изключване на прекъсваеми товари чрез електромеханични устройства, до усъвършенстваните методи в съвременните смарт мрежи, използващи модерни информационни технологии.

[3] http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:BG:PDF.



Фиг.1. Илюстрация на степента на дейностите по отзив на товари в европейските държави

Вместо чрез отзив на товарите към цени в реално време едновременно в преносната и разпределителните мрежи сега политици и бизнес насочват управлението на потреблението към агрегиране на консуматорите и участие (на агрегатора) в пазара на едро, където действат ежечасови цени.

Управлението на потреблението в България все още стои на стадий автоматично честотно разтоварване (АЧР) и списъци от групи за циклично изключване. Необходими са систематизирани мерки за научна, практическа и бизнес дейности, чрез които да се използват предимствата на отзива на товарите.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите благодарят на НИС при ТУ–София за помощта чрез финансирането на научно-изследователски проект в помощ на докторанти № 152ПД0036-01 на тема „Ценови образци при интелигентни преносни и разпределителни мрежи”.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Теодора Терентева, Мария Кънева, Димо Стоилов, Концепции и цели на управление на потреблението на електрическа енергия, Годишник на ТУ-София, 2013;
[2]. Clark W. Gellings and William M. Smith, Integrating Demand Side Management into Utility Planning, Proceeding of IEEE, Vol 77, No 6, 1989;
[3]. Moritz Paulus, Frieder Borggrefe, Economic Potential of Demand Side Management in an Industrialized Country – The Case Of Germany, IAEE European conference, 2009;
[4]. Brett D. Steele and Theo Breitenstein, The History and Evolvement of Electrical Peak Load Control Systems in Europe and the U.S., 14 01 2010;
[5]. Delivering the Internal Electricity Market and Making the Most Public Intervention, EC C(2013) 7243, Brussels, 5.11.2013;
[6]. Fereidoon P. Sioshansi, Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy, Academic Press, 2012;
[7]. Sanford V. Berg, Load Management: Rationing vs Peak load demand, 1978;

[8]. Joseph Eto, The Past, Present and Future of the US Utility Demand side management programs, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory-LBNL, 1996;
[9]. Fredrik Ygge, Hans Akkerman, Arne Anderson, A Multi-Commodity Market Approach to Power Load Management, 1998;
[10].Bolton D. J., Electricity Demand and Price, 1937, Journal of the Institution of Electrical Engineers, Volume 82, Issue 494, February 1938;
[11].William Steinhurst, The Electric Industry at a Glance, National Regulatory Research Institute, 2011;
[12]. Severin Borenstein, Michael Jaske, Arthur Rosenfeld, Dynamic Pricing, Advanced Metering, and Demand Response in Electricity Markets, University of California Energy Institute, Paper CSEMWP-105, October 2002;
[13]. James Bushnell, Benjamin F. Hobbs and Frank A. Wolak, When it comes to demand response is FERC its Own Worst Anemy, The Electricity Journal, Vol. 22, Issue 8, October 2009;
[14].Price Responsive Demand, 6.04.2013, PJM.com;
[15].PJM Open Acess transmission Tariff 2014, par. 8.1 Emergency Load Response and Pre-Emergency Load Response Program Options, page 1975;
[16].Stoilov D., Stoilov G., Stoilov L., Momentary Power Market, Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Electro/Information Technology, Iowa State University, May 18-20, 2008;
[17].Demand Dispatch-Intelligent Demand for a More Efficient Grid, US DoE, 08 11 2011;
[18].L. H. Tsoukalas, and R. Gao, From smart grids to an energy internet: Assumptions, Architectures and Requirements, DRPT, 2008;
[19].Ralph Masiello, Farnaz Farzan, Jessica Harrison, Kristie DeIuliis, Markets 3.0 - The impact on Market behavior of Integrated Demand Side Resources, IEEE Paper 11-7-2011;
[20].Marija D. Ilic, and Jonathan Donadee, Distribution Pricing and Tariff Structure: Tne Ongoing US Reforms, Power Engineering Society, IEEE General Meeting - PES , pp. 1-2, 2011;
[21].Shaping the Electricity Market of the Future, German Advisory Council on the Environment (Sachverständigenrat für Umweltfragen – SRU), Nov. 2013;
[22].Mapping Demand Response in Europe Today, Smart Energy Demand Coalition (SEDC), 2015;
[23].Национален план за действие за енергийна ефективност 2014-2020 г., Министерство на икономиката и енергетиката, юли 2014;
[24].Electricity demand response and Security of supply in EU, Seventh Framework Program, Project 213744, Deliverabaly 5.8.5, May 2010;
[25].Claire Bergaentzle, Cedric Clastres, Haikel Khalfallah, Demand-Side Management and European Environmental and Energy Goals, 2013;
[26].Zita-Vale, Demand response in the smart grid - the path towards widespread consumers' active participation, Clemson, July, 2015;
[27].Designing fair and equitable market rules for demand response aggregation, A Eurelectric paper, March, 2015;

Автори: Теодора Терентева, докторант, маг. инж., катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: terenteva@*tu-sofia.bg*; Димо Стоилов, доц. д-р, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*; Никола Николов, ас. маг. инж., катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *n_nikolov@tu-sofia.bg*; Иван Загорчев, докторант маг. инж., катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *i.zagorchev@ker.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Мария Кънева

КОМПЕНСИРАНЕ НА КАПАЦИТИВНАТА МОЩНОСТ В ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕТО НА ИНТЕГРИРАНАТА СИСТЕМА ЗА НАБЛЮДЕНИЕ ПО ГРАНИЦАТА С РЕПУБЛИКА ТУРЦИЯ

Борислав Бойчев

Резюме: *В работата е извършено опитно измерване на параметрите на електрическата енергия на периметрова сигнално-охранителна система и са установени характера и количеството на генерираната реактивна енергия. Предписани са мерки за компенсиране на върнатата реактивна енергия и е изчислен срока на откупуване на вложените инвестиции.*
Ключови думи: *електроснабдяване, реактивна енергия, качество на електрическата енергия*

CAPACITIVE ELECTRIC POWER COMPENSATION IN ELECTRIC SUPPLY OF INTEGRATED MONITORING SYSTEM IN THE BORDER WITH REPUBLIC OF TURKEY

Borislav Boychev

Abstract: *In the work was performed experimentally measurement of parameters of the electric power of Perimeter Electronic Security system and are established the type and quantity of generated reactive energy. Prescribed are measures for compensation of the returned reactive energy and is calculated payback period of the investment.*
Keywords: *electric supply, reactive power, electric energy quality*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Понятията реактивна мощност и енергия присъстват задължително в променливотоковите електроснабдителни системи. Преносът на реактивна енергия е свързан с редица нежелани ефекти - увеличени загуби, намалена разполагаема мощност.

В същото време е много трудно да се минимизира реактивната мощност в електроснабдителните системи. По тази причина по-често се говори за необходимост от нейното балансиране. Нивото на напрежение и стабилността на електроснабдителната система зависят от баланса на реактивна енергия.

В инженерната практика са разработени широк спектър от устройства, използвани в миналото и понастоящем, чието предназначение е да компенсират реак-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

тивни товари или могат да компенсират реактивна мощност в допълнение към основните си функции.

Капацитивната реактивна мощност представлява проблем за много консуматори с класически тип товари, особено в България. Такъв проблем възниква, когато електроснабдителната система включва дълги кабелни линии, а товаровият график е с продължителни периоди на работа с минимално натоварване.

При пълно или почти пълно натоварване на съоръженията, индуктивният характер на товарите преобладава и от мрежата се консумира реактивна мощност (индуктивна реактивна мощност). При минимални товари, кабелните линии остават под напрежение и техният капацитет води до връщане на реактивна енергия в мрежата (капацитивна реактивна мощност).

Най-често прилаганият способ, който може да бъде определен като класически, е свързването към определена точка на електроснабдителната система на реактивен елемент – индуктивност или капацитет, в зависимост от характера на компенсираната реактивна мощност.

В практиката се прилагат различни решения:

- Постоянно включен реактивен елемент.
- Превключване на групи от реактивни елементи (стъпално управление).
- Постоянно включена индуктивност и превключване на групи от капацитети, или постоянно включен капацитет и управление на индуктивността.

2. ДЕФИНИРАНЕ НА ПРОБЛЕМА

Захранването с електрическа енергия на елементите от “Интегрираната система за видеонаблюдение на Българо-Турската граница” се осъществява от кабелни линии 20 kV, новоизградени комплектни трансформаторни постове (КТП) и кабелни линии ниско напрежение. Съгласно предписанията на „ЕВН България Електроразпределение" АД, точките на присъединяване към общата електроразпределителна мрежа и измерването на електрическата енергия се осъществява на стоманорешетъчните стълбове на мрежа 20 kV собственост на ЕВН, където е монтирано табло за измерване на консумираната електрическата енергия.

Всички трансформаторни постове са снабдени с комутационна апаратура 20 kV, трансформатори 25 kVA - 20/0,4 kV, табла ниско напрежение (ТНН) и допълнителни групи с вентилни отводи, монтирани на входа 20 kV.

КТП са производство на „МИГ-23“ ЕООД и са поставени на предварително изготвени фундаменти по конструктивен проект на производителя. Трансформаторните постове са заземени със заземители с преходно съпротивление $R_з \leq 4\ \Omega$.

Захранването на трансформаторните постове се осъществява от новоизградени кабелни линии 20 kV с кабели САХЕкТ 3х1х50 мм^2 с дължина между един и пет километра.

Захранването на елементите от системата се осъществява от кабелни линии ниско напрежение.

Камерите са монофазни консуматори с консумация 0,1 kW, като същите се зах-

ранват магистрално от трифазни кабелни линии с кабели САВТ 4х25 мм^2 с разпределение по фази. С отделни КЛ НН се захранват комуникационните постове до камерите за видеонаблюдение.

Кабелите са положени в изкопи с размери в 1,1/0,4 м.

Предвид голямата дължина и малкото натоварване на кабелните линии се създават условия за връщане на реактивна енергия в мрежата на EVN.

Само за м. май 2015 г. за обекти с. Белеврен, с. Сливарово, с. Резово, с. Белеврен-1, с. Граничар и с. Горно Ябълково е върната реактивна енергия на стойност 33 000 лв.

След обстойното запознаване с конфигурацията и проблемите при работата на електрозахранването на обекта и постоянния във времето товар, става ясно, че най-ефективно ще бъде монтирането на реактори на страна средно напрежение 20 kV.

Реакторите са с мощност посочена в т. 1 и следва да бъдат монтирани в близост до КТП, след изготвяне на проектна документация по част електрическа.

3. НЕТНА СЕГАШНА СТОЙНОСТ

Нетната сегашна стойност (от англ. Net Present value – NPV) представлява сума текущите стойности на приходите и разходите (изразени в парични потоци) за даден период от време, приведени към днешна дата. Този показател е базова количествена характеристика при анализа на инвестиционни проекти, тъй като той отчита периода за възвращаемост на първоначалните инвестиции. Количествено нетната сегашна стойност (NPV) се определя като сума от приходите (положителни парични потоци) и разходите (отрицателни парични потоци) за всеки период на инвестицията. Обикновено периодът на инвестицията е 1 година, но понякога се разглежда половин година, ¼ година или няколко месеца в зависимост от спецификата на сферата на приложение на този показател.

След изчисляване на паричните потоци за всеки период, се определят съответните им приведени стойности (PV - Present Values), т.е.

$$PV = \frac{R_t}{(1+i)^t},$$

където:

t – броят на времевите периоди за отчитане на паричния поток – в години;

i – Възвращаемост за разглеждания период на инвестицията от финансови пазари с съпоставим риск на инвестицията, която се определя от текущото състояние на пазара (rate of return или discount rate);

R_t – чист (нетен) паричен поток (парични приходи – парични разходи) за период t.

Ако се разглеждат *N* на брой периода, то нетната сегашна стойност се изчислява по формулата:

$$NPV = \sum_{t=1}^{N} \frac{R_t}{(1+i)^t} - R_0 ,$$

където R_0 са първоначалните инвестиции и те участват със знак „-„ отдясно в израза, тъй като по същество те представляват вид разходи.

4. ОПИТНИ РЕЗУЛТАТИ

Анализирани са 5 обекта и съответната информация е обобщена в табл.1, където като изходни данни са въведени: дължината на линията, върнатата реактивна енергия за месец, окончателната мощност на реактора, цената на върната единица реактивна енергия, общо върнатата реактивна енергия за месец и цената на реактора комплект.

Таблица 1

Обект	Дължина на линията, км	Върната реактивна енергия за месец, kVArh	Окончателна мощност реактор, kVar	Цена на върната реакт. Ен/я,лв/ kVarh	Общо върната реакт. Ен/я,лв/ месец	Цена на реактора комплект, лв
Обект 5 с. Белеврен	3.8	48,033	70	0.12532	6,019	36,000
Обект 4 с. Сливарово	2.4	52,002	70	0.12532	6,517	36,000
Обект 4-1 с. Белеврен	4.15	76,203	110	0.12532	9,550	37,000
Обект 6 с. Граничар	2.5	50,475	70	0.12532	6,326	36,000
Обект 10 с. Горно Ябълково	1.705	31,008	45	0.12532	3,886	35,000

В табл.2 е представена възвращаемостта на първоначалните инвестиции R0 по месеци, като тези инвестиции участват със знак “-“ във формулата за нетната сегашна стойност, тъй като по същество те са първоначален разход за инвеститора:

$$NPV = \sum_{t=1}^{N} \frac{R_t}{(1+i)^t} - R_0$$

Таблица 2

Възвращаемост за един период = 1 месец													
1 м.	2 м.	3 м.	4 м.	5 м.	6 м.	7 м.	8 м.	9 м.	10 м.	11 м.	Коеф. на въз-вра-щае-мост	NPV за срока на отку-пу-ване	Срок на отку-пува-не, мес.
6 019	6 019	6 019	6 019	6 019	6 019	2 622					0,02	0,16	6,44
6 517	6 517	6 517	6 517	6 517	5 950						0,02	0,40	5,91
9 550	9 550	9 550	9 550	703							0,02	0,06	4,07
6 326	6 326	6 326	6 326	6 326	6 326	653					0,02	0,29	6,10
3 886	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886	117	0,02	0,05	10,03

От получените резултати в табл.2 се вижда, че при внедряване на предложеното решение за компенсиране на капацитивната мощност в електроснабдителната система, сроковете за откупуване на реакторите са от 5 до 11 месеца, като през последния месец всеки от тях ще работи на печалба.

5. ИЗВОДИ

Отчитайки голямата дължина и малкото натоварване на кабелните линии се създават условия за връщане на реактивна енергия в мрежата на EVN. Само за м. май 2015 г. за петте обекта е върната реактивна енергия на стойност 33 000 лв. Всичко това създава необходимост от разработване на система за компенсиране на реактивната енергия. По тази причина е разработен проект за преработка на електрозахранването на обектите по границата с р. Турция. Резултатите от него показват, че ще се редуцира върнатата реактивна енергия в мрежата на EVN и съответно сумите за заплащането и. Сроковете за откупуване на направените инвестиции за отделните обекти е между шест и девет месеца.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Василев Н., Сидеров С, Електроснабдяване на промишлени предприятия, С., Техника 1991.

[2] Wolfgang Hofmann, Jurgen Schlabbach, Wolfgang Just., “Reactive Power Compensation: A Practical Guide, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, ISBN: 978-0-470-97718-7

[3] Gueorgiev V., N. Matanov, B. Bojchev, V. Gospodinov, Energy Efficiency of Different Approaches for Compensation of Capacitive Loads, in proceedings of XVI-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2009, June – 2009, Burgas, Bulgaria, vol.II. pp. 123-129.

[4] Hennig Gremmel, ABB Switchgear Manual, Cornelsen Verlag, Berlin, 10th revised edition, ISBN 3-46448236-7

[5] Наредба №1 от 18.03.2013г за регулиране на цените на електрическата енергия, Обн. ДВ. бр.33 от 5 Април 2013г., изм. и доп. ДВ. бр.17 от 28 Февруари 2014г., изм. и доп. ДВ. бр.4 от 16 Януари 2015 г.

Автор: Борислав Бойчев, ас. д-р, катедра „ЕСЕОЕТ”,Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *bojchev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Симона Петракиева

АНАЛИЗ НА ПРОЕКТ ЗА ПРИСЪЕДИНЯВАНЕ НА НОВИ ГЕНЕРАТОРИ КЪМ ЕЛЕКТРОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНАТА СИСТЕМА В ОБЛАСТ ВИТИЯ

Реджеп Шакири, Везир Реджепи, Димитър Богданов

***Резюме**: В този доклад е представено изследване на възможността за присъединяване на нови генератори към подстанция „Вития“ в Косово. Описан е подходът за съставяне на модел на разпределителната мрежа в района и новата ВЕЦ, която ще бъде присъединена. Моделът е направен за режим в който има максимален товар в подстанция “Вития” 7696.8 kW (на 21.01.2015 по време на върховия товар за зимния сезон) с цел де се оцени влиянието на присъединяване на разпределена генерация към мрежа средно напрежение. Предвидено е бъдеще анализът на мрежата на Косово ще бъде направен със софтуерът NEPLAN за да се постигне оптимална конфигурация и да бъдат изпълнени изискванията на ENTSO-E. Представени са резултати за очакваното подобряване на профила на напреженията и намаляване на загубите в мрежата в резултат от присъединяване на предвиждана за присъединяване към подстанция „Вития“ ВЕЦ с максимална мощност 900 kW.*
***Ключови думи:** разпределителни, мрежи, ВЕИ, профил, напрежение, синхронен, генератор, подобряване, загуби, товар.*

CASE STUDY OF CONNECTION OF NEW GENERATORS TO THE ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEM OF VITIA

Rexhep Shaqiri, Vezir Rexhepi, Dimitar Bogdanov

***Abstract**: Object of study in this article is the project for connection of generators to the substation in Vitia in Kosovo. This article describes the simulations of the hydropower plant (HPP), when the load in the substation “Vitia” was 7696.8 kW (on 21.01.2015 during the winter maximal load) in order to emphasize the importance of the connections of generators in medium voltage level. The analysis of the Kosovo electric power system by means of NEPLAN software model was developed in order to achieve optimal performance of the grid and compliance with the ENTSO-E requirements. This article describes the impact of hydropower plant Vitia with power 900 kW on improving the voltage profile and reduction of losses.*
***Keywords:** distribution networks, renewable energy resources, voltage profile, synchronous generator, improvement, losses, load.*

1. INTRODUCTION

The task of the electric power system design and operation is to supply the customers with qualitative electric power, with a high degree of reliability, but economically ac-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

cepted. The generation, transmission and distribution are three main components of the electric power system. Kosovo power system consists of power plants, the transmission grid, regional networks, distribution networks, and consumers of electricity. The electrical power system of Kosovo mainly operates power plants using coal resources for electricity production thus has lack of renewable energy resources. In result of that there is increased interest of investment in the field of the alternative resources, such as hydro power plants (HPPs). The impact of the connection of generators to the distribution system, respectively in the Vitia substation will be analyzed in some aspects. The connection of the new generators can affect the stability of the system, voltage profile, losses and the quality of the energy and the reliability of the electrical power supply in the distribution system.

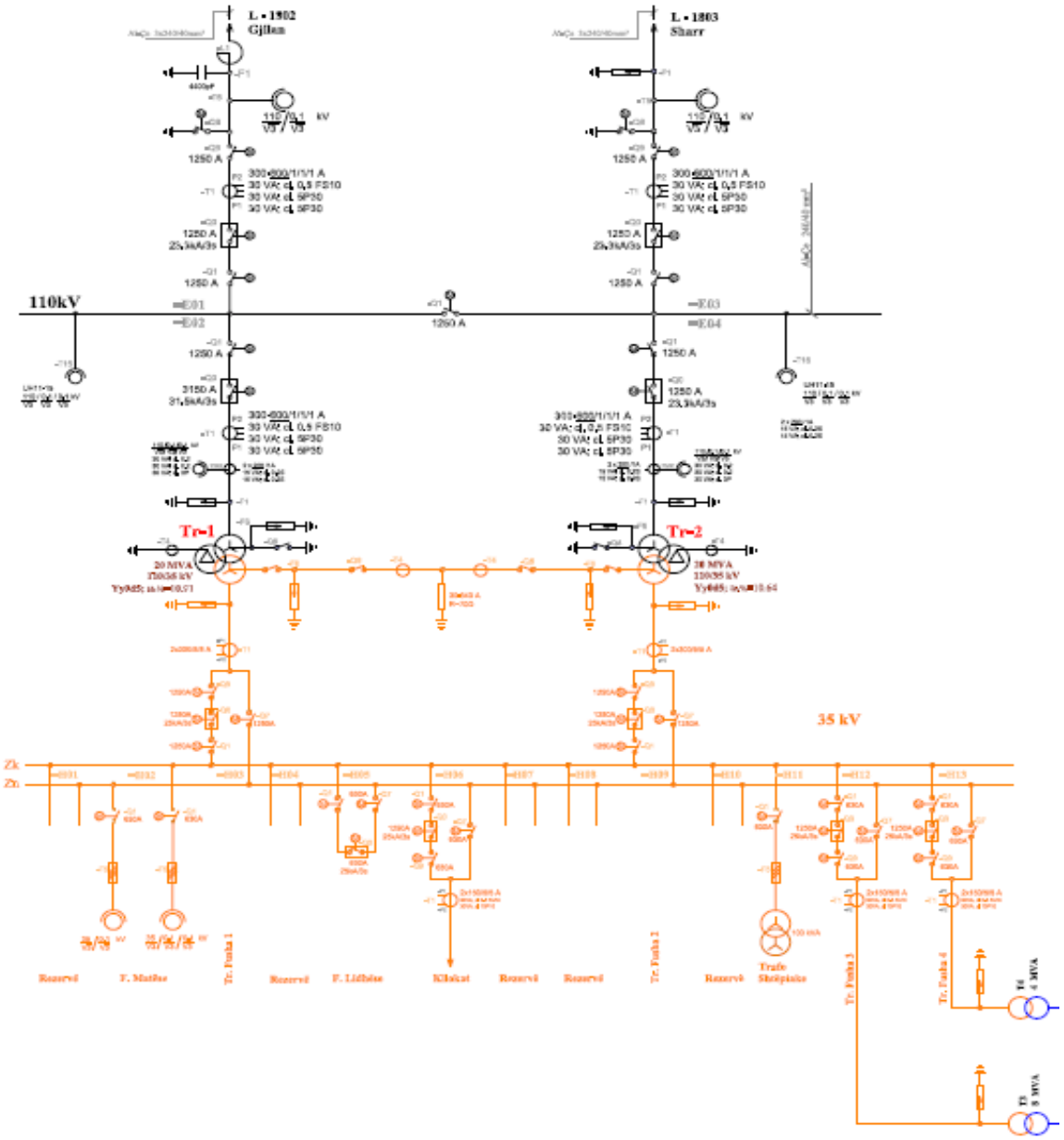


Fig.1. Single line diagram of "Vitia" substation -110/35 kV

2. EFFECTS OF NEW GENERATORS CONNECTED TO THE EXISTING NETWORK

The connection of a generation to an electrical network has impact on its operation. The connection of a generator to the system will result in some changes of the net-

work characteristics. New and existing generators connected to the network have to fulfill the requirements for: frequency stability, voltage deviation, voltage waveform, voltage symmetry, power factor, operational earthling and insulation levels defined in the Kosovo network operational plans and vision for further development [8].

3. THE CURRENT STATE OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM OF KOSOVO

The transmission system and market operators of Kosovo are responsible for the operational planning and supervision of the main grid, for grid maintenance and grid development. The main grid in Kosovo includes approximately 188,49 km of 400 kV transmission lines, 231,88 km of 220 kV transmission lines, 735,45 km of 110 kV transmission/distribution lines, 400/220 kV - 1 substation, 400/110 kV - 2 substations, 220/110 kV - 3 substations, and 110/35 kV, 110/10 kV - 29 substations. Kosovo system is connected to Macedonia, Serbia and Albania transmission systems on 400 kV, 220 kV and 110 kV by overhead power lines.

In the Kosovo electric power system the generation units are: Thermo power plant in Kosovo A (A3-150 MW, A4-150 MW, A5-150 MW) is in total 450 MW and Kosovo B (B1-300 MW and B2- 300 MW) is in total 600 MW, generator A1 and A2 are not in operation. While HPPs in the electric power system are: "Ujman" (U1, U2) is 32 MW, "Lumbardh" (B1 and B2) is 8 MW.

There are also several small hydro power plants with capacities such as: "Burim" (G1 and G2) 0.47 MW, "Dikance" (G1 and G2) -1, 32 MW, "Radavc" (G1 and G2) - 0.28 MW and "Decani" (G1, G2, G3 and G4) - 35 MW [9].
Presented below is the single line diagram of "Vitia" substation (fig.1 and fig.2).

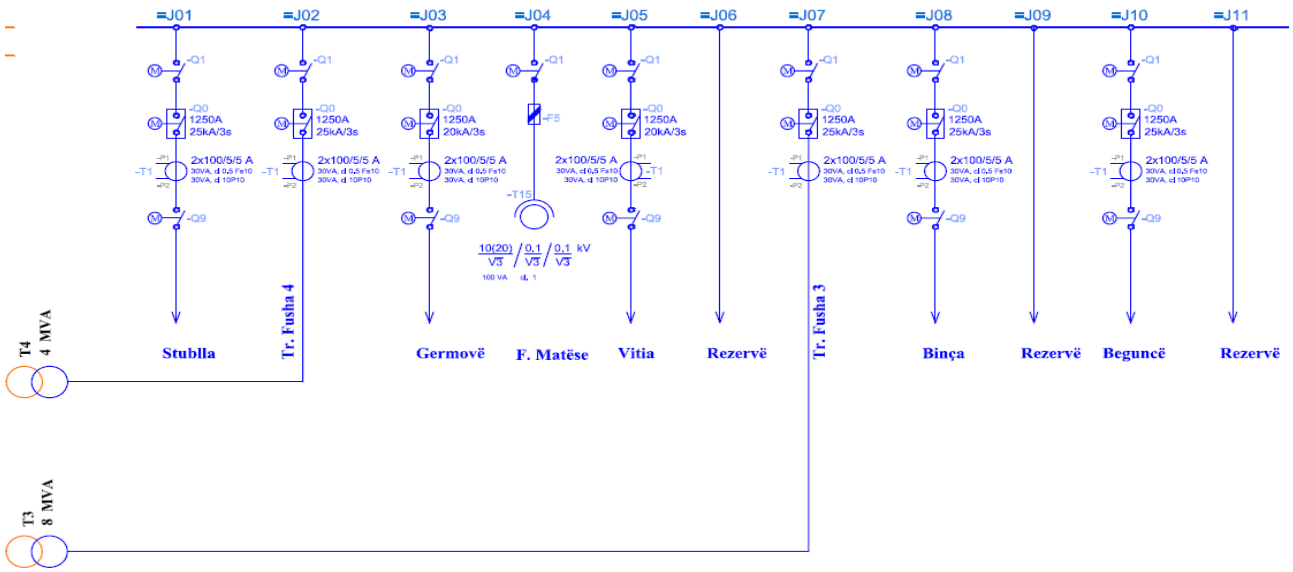


Fig.2. Single line diagram of "Vitia" substation - 35/10 kV

The current situation of the maximum load during winter in the substation "Vitia" (7696.8 kW) is presented below in fig.3.

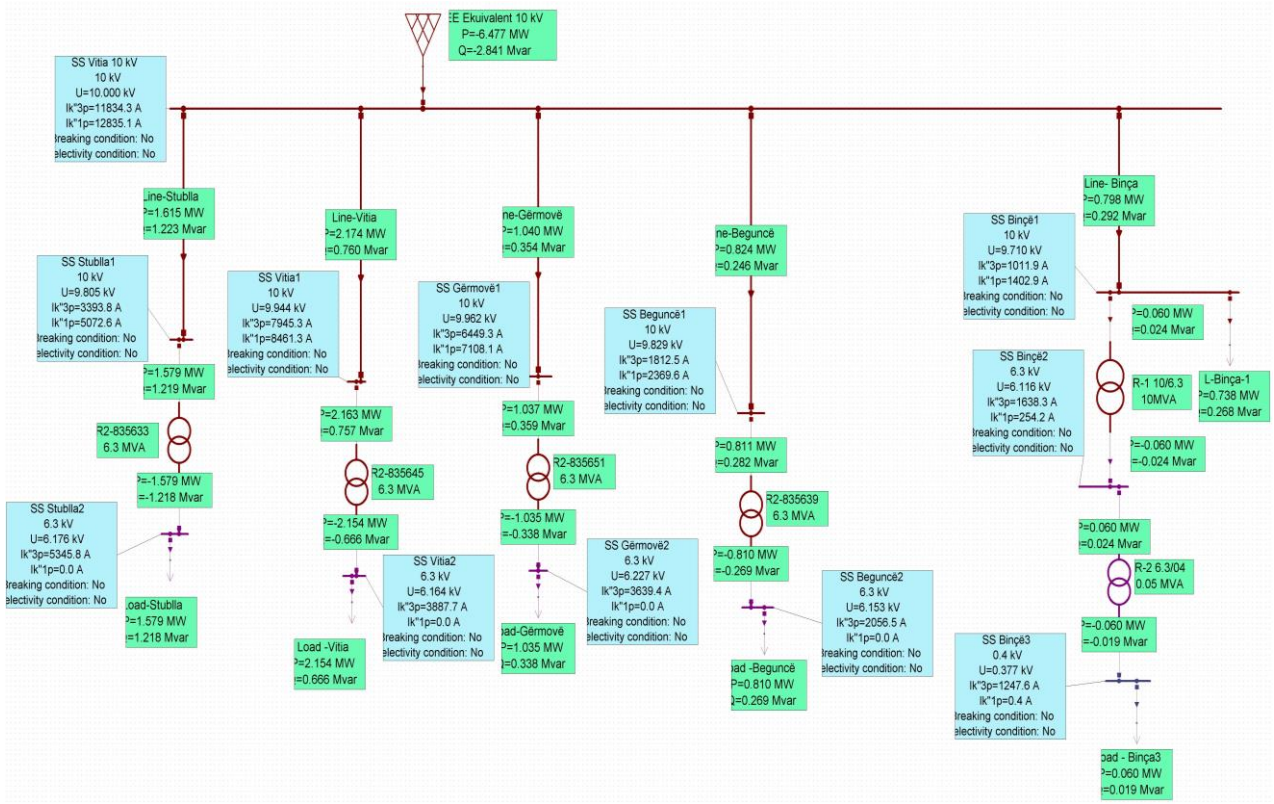
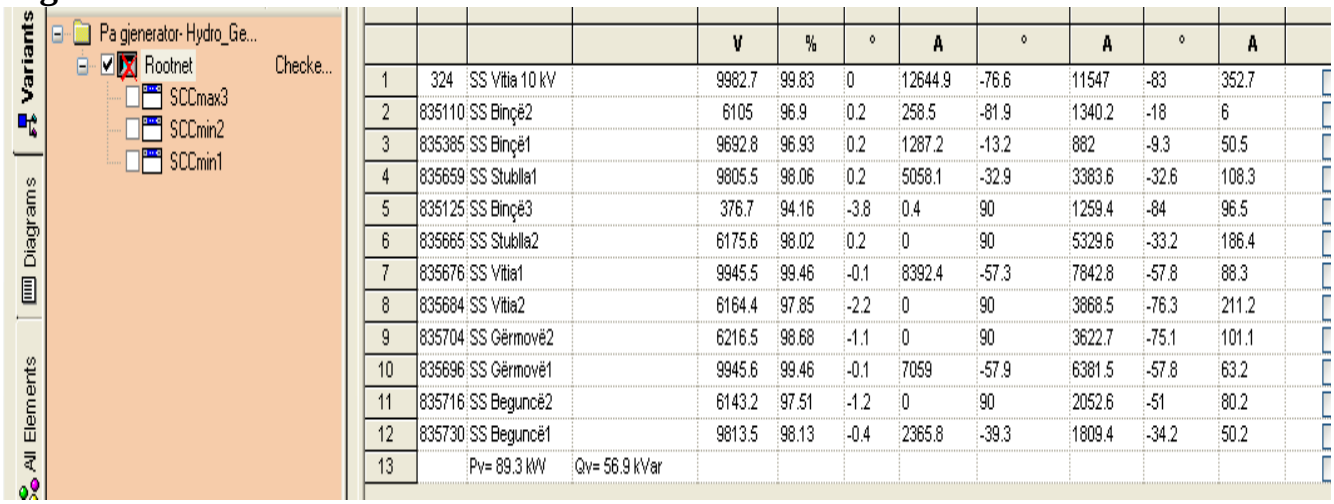


Fig.3. Current situation of the load in substation "Vitia" - maximal load of 7696.8 kW



				V	%	°	A	°	A	°	A
1	324	SS Vitia 10 kV		9982.7	99.83	0	12644.9	-76.6	11547	-83	352.7
2	835110	SS Binçë2		6105	96.9	0.2	258.5	-81.9	1340.2	-18	6
3	835385	SS Binçë1		9692.8	96.93	0.2	1287.2	-13.2	882	-9.3	50.5
4	835659	SS Stubllа1		9805.5	98.06	0.2	5058.1	-32.9	3383.6	-32.6	108.3
5	835125	SS Binçë3		376.7	94.16	-3.8	0.4	90	1259.4	-84	96.5
6	835665	SS Stubllа2		6175.6	98.02	0.2	0	90	5329.6	-33.2	186.4
7	835676	SS Vitia1		9945.5	99.46	-0.1	8392.4	-57.3	7842.8	-57.8	88.3
8	835684	SS Vitia2		6164.4	97.85	-2.2	0	90	3868.5	-76.3	211.2
9	835704	SS Gërmovë2		6216.5	98.68	-1.1	0	90	3622.7	-75.1	101.1
10	835696	SS Gërmovë1		9945.6	99.46	-0.1	7059	-57.9	6381.5	-57.8	63.2
11	835716	SS Begunçë2		6143.2	97.51	-1.2	0	90	2052.6	-51	80.2
12	835730	SS Begunçë1		9813.5	98.13	-0.4	2365.8	-39.3	1809.4	-34.2	50.2
13		Pv= 89.3 kW	Qv= 56.9 kVar								

Fig.4. The voltage profile in substation Vitia when the load is 7696.8 kW, during the winter 21.01.2015

4. LOSSES OF ACTIVE POWER IN DISTRIBUTION NETWORKS

The total losses of active power ΔP in the distribution network with n branches is obtained as sum of losses ΔPi in the specific branches.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i \qquad \Delta P = \sum_{k=1}^{n} R_k \left(\sum_{j=k}^{n} I_j \right)^2 \tag{4.1}$$

where: I_1, I_2, … I_n the load current per consumer; Z_1, Z_2, … Z_n the impedance of respective length for (I_1, I_2, I_3, … , I_n); cosφ$_1$, cosφ$_2$ … cos φ$_n$ the power factor for each consumer.

$$Z_k = R_k + jX_k \ (k=1, 2, 3 \ldots n). \tag{4.2}$$

The total active power losses in the distributor (ΔP) are computed:

$$\Delta P = R_1(I_1+I_2+ \ldots +I_n)^2 + R_2(I_2+I_3+ \ldots +I_n)^2 + R_k (I_k+I_{k+1}+\ldots+I_n)^2 + R_n I_n^2. \tag{4.3}$$

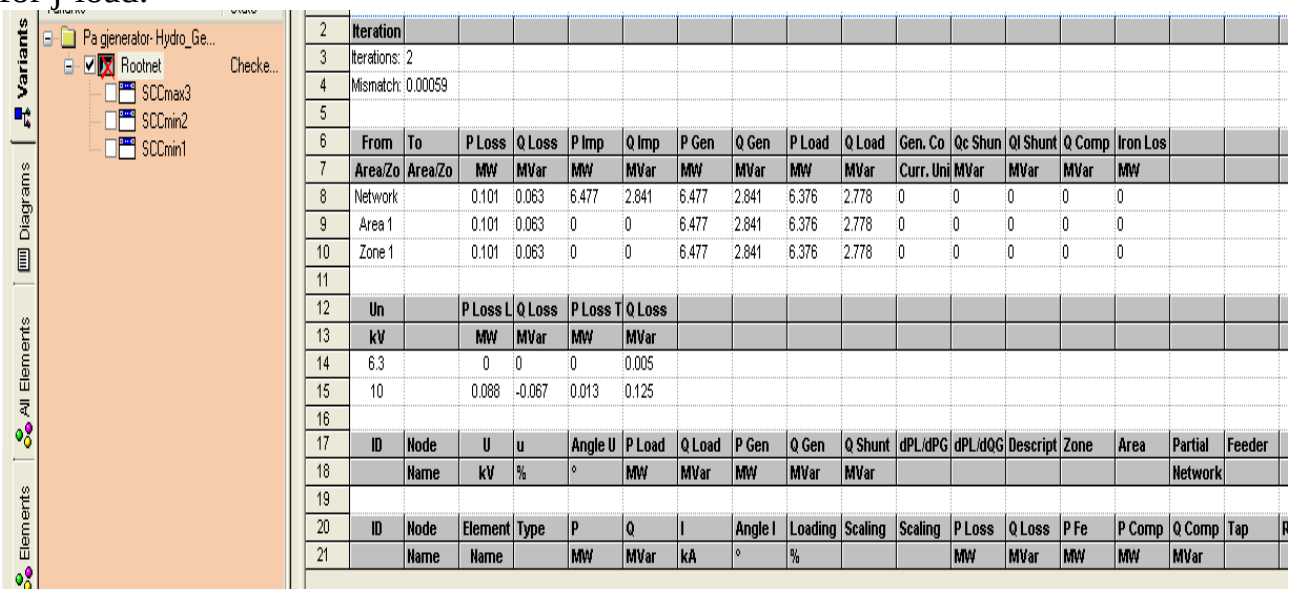
The load current (I_j) injected into a bus j is calculated as:

$$I_j = \frac{P_j}{V_j \cos\varphi_j} \tag{4.4}$$

Substituting equation (4.4) into equation (4.1) we obtain:

$$\Delta P = \sum_{k=1}^{n} R_k \left(\sum_{j=k}^{n} \frac{P_j}{V_j \cos\varphi_j} \right)^2 , \tag{4.5}$$

where, *n* is the number of busses in the distributor, V_j and P_j are voltage and power at bus *j* respectively R_k the resistance of the distributor branch k, $\cos\varphi_j$ the power factor for j-load.



2	Iteration																	
3	Iterations: 2																	
4	Mismatch: 0.00059																	
5																		
6	From	To	P Loss	Q Loss	P Imp	Q Imp	P Gen	Q Gen	P Load	Q Load	Gen. Co	Qc Shun	Ql Shunt	Q Comp	Iron Los			
7	Area/Zo	Area/Zo	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	Curr. Uni	MVar	MVar	MVar	MW			
8	Network		0.101	0.063	6.477	2.841	6.477	2.841	6.376	2.778	0	0	0	0	0			
9	Area 1		0.101	0.063	0	0	6.477	2.841	6.376	2.778	0	0	0	0	0			
10	Zone 1		0.101	0.063	0	0	6.477	2.841	6.376	2.778	0	0	0	0	0			
11																		
12	Un		P Loss L	Q Loss	P Loss T	Q Loss												
13	kV		MW	MVar	MW	MVar												
14	6.3		0	0	0	0.005												
15	10		0.088	-0.067	0.013	0.125												
16																		
17	ID	Node	U	u	Angle U	P Load	Q Load	P Gen	Q Gen	Q Shunt	dPL/dPG	dPL/dQG	Descript	Zone	Area	Partial	Feeder	
18		Name	kV	%	°	MW	MVar	MW	MVar	MVar						Network		
19																		
20	ID	Node	Element	Type	P	Q	I	Angle I	Loading	Scaling	Scaling	P Loss	Q Loss	P Fe	P Comp	Q Comp	Tap	R
21		Name	Name		MW	MVar	kA	°	%			MW	MVar	MW	MW	MVar		

Fig.5. The losses in substation Vitia-110/35/10 kV when the load is 7696.8 kW

Equation (4.5) shows that the power losses are inversely proportional to the power factor squared and the minimum losses are obtained at cos φ_j=1.

$$\Delta P_{\min} = \sum_{k=1}^{n} R_k \left(\sum_{j=k}^{n} \frac{P_j}{V_j} \right)^2 , \tag{4.6}$$

Considering as a reference, we obtain the power losses in per unit:

$$(\Delta P^* = \Delta P / \Delta P_{\min}), \tag{4.7}$$

$$\Delta P^* = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{\cos^2 \varphi_j} . \tag{4.8}$$

The impedance of the network is determined by the formula:

$$Z_{up} = \frac{U^2}{S_{SC}} \tag{4.9}$$

$R_{up} / Z_{up} \approx 0.3$ for 6 kV; $R_{up} / Z_{up} \approx 0.2$ for 20 kV;
Impedance of line depends on the R/km, X/km, and from length of the line:

$$R_L = \frac{\rho l}{A} \tag{4.10}$$

A - cross section of the conductor; ρ - specific resistance of the conductor [Ω m]; l - length of the conductor (m).

The inductances of cable L_1 [H/km] and reactance of cable X_1 [Ω/km]:

$$X_1 = \omega L_1 = 2\pi f L_1 . \tag{4.11}$$

Impedance of tr-r should be calculated based on short circuit of voltage u_{sc}:

$$Z_T = u_{sc} \cdot \frac{U^2}{S_n}, \tag{4.12}$$

where U-operating phase to phase voltage without loading in the transformer, Sn=apparent power TR(kVA), u_{sc} = short circuit voltage. Generally, $R_T << X_T$, appr. 0.2 X_T, so Z_T can be identified approximately as X_T.

Since transformers are inductive in nature they consume the power with lagging power factor. But the key input for estimating distribution transformer energy loss is the transformer load that determines the power factor and energy consumed. Therefore, there is no measured load record for distribution transformers when the feeder is supplying the energy. The loss due to distribution transformer is of significance as it contributes to some percentage of total input units. Attempts may be made to minimize these losses.

Losses are broadly classified as:

i. *No load losses* (W_i): Taking place in iron /core part comprising of hysteresis Losses and eddy current losses in the Core considered to be constant irrespective of load.

ii. *Winding losses or load loss* (W_{wdg}): Taking place in the winding part. As a function of load current, can be divided into (I^2R) loss and stray losses. The stray losses are caused by eddy-currents that produce stray electromagnetic flux in the windings, core, core clamps, magnetic shield and other parts of the transformer.

iii. *Other losses* (W_{other}): dielectric loss, load unbalance, improper maintenance of the distribution boxes, joints connections resistance.

The most important losses are W_i and W_{wdg}.

5. VOLTAGE PROFILE OF THE ELECTRICAL POWER SYSTEM OF KOSOVO

The network voltage is an important quality criterion especially in distribution networks where customers are connected. To ensure the proper operation of equipment connected to the grid, standards regarding the network voltage at the customer connection point have been approved.

A current through a line causes a voltage drop $\overline{\Delta V}$ between the two ends of the line. In general the voltage drop is formulated as in (5.1) which depend both on the real I_p and imaginary I_q part of the current I and the line resistance R and line reactance X of the line impedance Z:

$$\overline{\Delta V} = \overline{IZ} = \left(I_p + jI_q\right)\left(R + jX\right) = \left(RI_p - XI_q\right) + j\left(RI_q + XI_p\right). \tag{5.1}$$

Thus both the real part ΔV_p as in (5.2) and the imaginary part ΔV_q as in (5.3) of the voltage drop are contributing to the total voltage drop over the line in (5.4):

$$\Delta V_p = RI_p - XI_q . \tag{5.2}$$

$$\Delta V_q = RI_q + XI_p \tag{5.3}$$

$$\overline{\Delta V} = \Delta V_p + j\Delta V_q = \sqrt{\Delta V_p{}^2 + \Delta V_q{}^2} \cdot e^{j \arctan\left(\frac{\Delta V_q}{\Delta V_p}\right)} \tag{5.4}$$

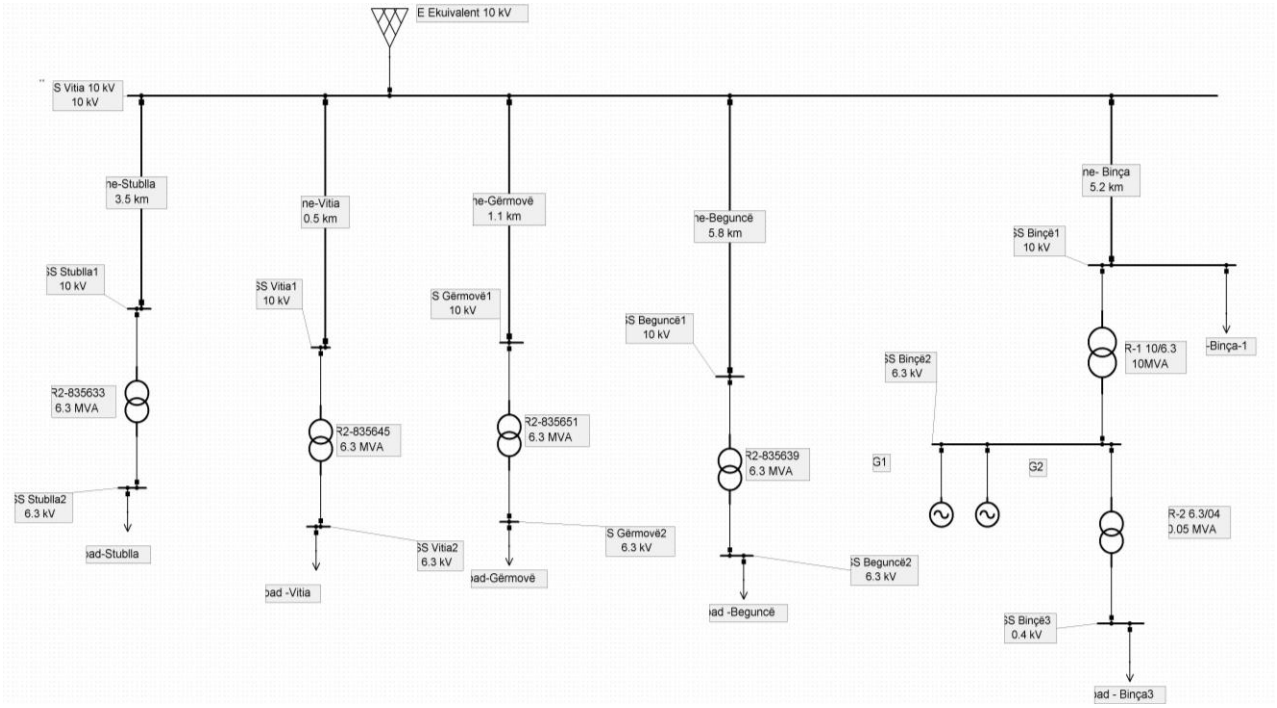


Fig.6. Connection of new generators in the region of Vitia.

To convert the power to current the voltage at the receiving end Vr is used as reference. Hence, active and reactive currents are determined as depicted in (5.5):

$$\bar{I} = \frac{\overline{S^*}}{\overline{V_r}} = \frac{P - jQ}{\overline{V_r}} = I_p - jI_q . \tag{5.5}$$

So, the voltage drop depending on the current as in (5.1) could be reformulated to a voltage drop, which depends on the apparent power and the voltage at the receiving end as in (5.6).

$$\overline{\Delta V} = \overline{IZ} = \frac{\overline{S^*}}{\overline{V_r}} \cdot \overline{Z} == \frac{1}{\overline{V_r}}\left[(RP + XQ) + j(XP - RQ)\right]. \tag{5.6}$$

Active power flows affect more significantly the voltage in medium and low voltage distribution networks. Thus the infeed of the active power from distributed generator (DG) units connected to distribution networks increases the voltage at the connection point and along the whole feeder, where the DG unit is connected. This voltage rise can become an issue especially in situations when the active power generation by DG units exceeds the active power consumption by the loads and the voltage increases above the chosen set point at the substation where the highest voltage is assumed.

6. NEW ENERGY SOURCES

It is known that connection of the generators has effect on the voltage profile, power flow, losses, stability and short circuit current levels. The influence will depend on the number, type, location and size of generators. The distributed generators are mainly designed to be connected directly to the distribution network near load centers.

Regarding the utilization of alternative renewable energy sources, Kosovo is not in the appropriate levels. Approximately only 4 % of the electricity produced in Kosovo is from renewable energy sources. As Kosovo has signed the treaty for electricity and according to Directive 2009/28/EC1 on the promotion of the use of energy from renewable sources (the "Renewable Energy Directive") established mandatory targets to

be achieved by 2020 for a 20% overall share of renewable energy in the EU and a 10% share for renewable energy in the transport sector.
Based on this, as well as the target of fulfillment the standards of EU for the renewable energy, it is foreseen to construct a hydropower plant in the region of Vitia with power 900 kW. The current situation in "Vitia" substation when generators are connected is presented below in fig.7.

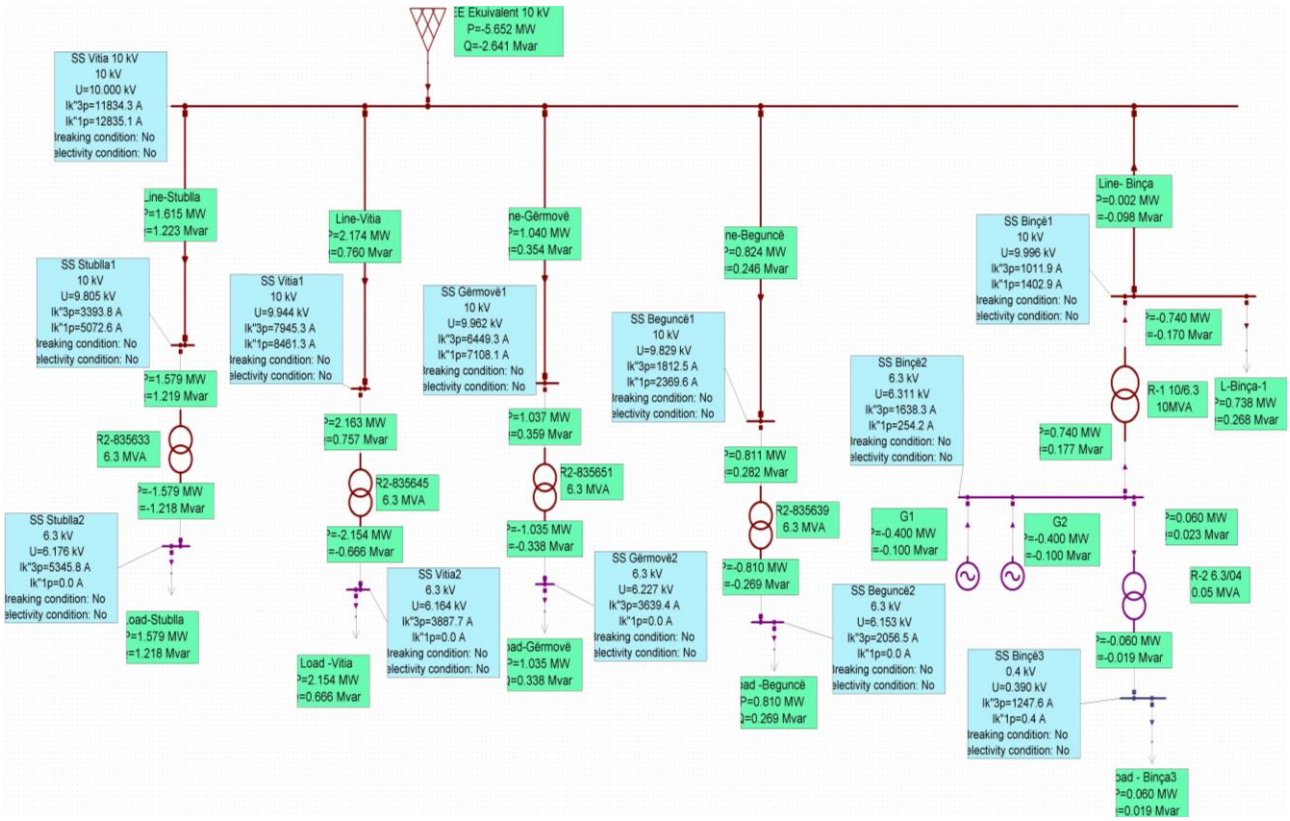
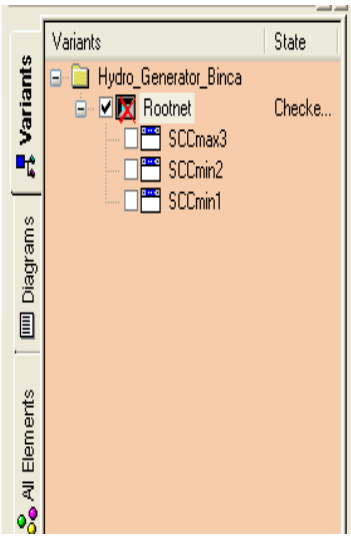
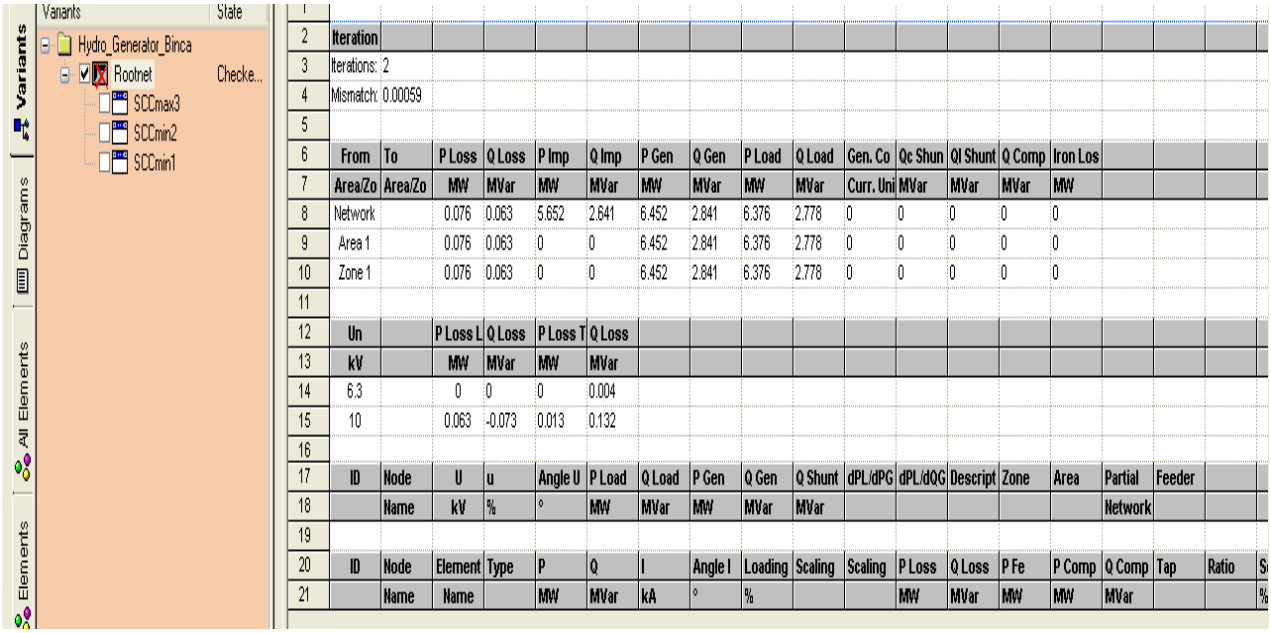


Fig.7. The situation of "Vitia" substation -110/35/10 kV when new generators are connected



	ID	Node	Description	U	u	U Angle	Ik"1p min	Ik"1p min Angle	Ik"3p min	Ik"3p min Angle	Ib
				V	%	°	A	°	A	°	A
1	324	SS Vitia 10 kV		10002.1	100.02	0	12833.7	-76.3	11832.3	-82.6	361.3
2	835110	SS Binçë2		6313.5	100.21	0.6	254.2	-83.8	1634.8	-36.5	75.4
3	835385	SS Binçë1		9999.1	99.99	0.1	1401.5	-28.7	1010.3	-27.9	43.9
4	835659	SS Stubilla1		9805.5	98.06	0.2	5072.5	-32.6	3393.7	-32.2	118.7
5	835125	SS Binçë3		390.3	97.59	-3.2	0.4	90	1247.7	-85.1	93.1
6	835665	SS Stubilla2		6175.6	98.02	0.2	0	90	5345.7	-32.8	186.4
7	835676	SS Vitia1		9945.5	99.46	-0.1	8460.8	-57	7944.8	-57.1	135.5
8	835684	SS Vitia2		6164.4	97.85	-2.2	0	90	3887.5	-76.2	211.2
9	835704	SS Gërmovë2		6228.9	98.87	-1.1	0	90	3639.2	-75	100.9
10	835696	SS Gërmovë1		9965.1	99.65	-0.1	7107.8	-57.6	6449	-57.3	63.1
11	835716	SS Beguncë2		6155.8	97.71	-1.2	0	90	2056.5	-50.9	80
12	835730	SS Beguncë1		9833.3	98.33	-0.4	2369.6	-39.1	1812.5	-34	50.1
13		Pv= 77.5 kW	Qv= 63.9 kVar								

Fig.8. The voltage profile in "Vitia susbtation" -110/35/10 kV when new generators are connected



Iteration

Iterations: 2

Mismatch: 0.00059

From	To	P Loss	Q Loss	P Imp	Q Imp	P Gen	Q Gen	P Load	Q Load	Gen. Co	Qc Shun	Ql Shunt	Q Comp	Iron Los
Area/Zo	Area/Zo	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	Curr. Uni	MVar	MVar	MVar	MW
Network		0.076	0.063	5.652	2.641	6.452	2.841	6.376	2.778	0	0	0	0	0
Area 1		0.076	0.063	0	0	6.452	2.841	6.376	2.778	0	0	0	0	0
Zone 1		0.076	0.063	0	0	6.452	2.841	6.376	2.778	0	0	0	0	0

Un		P Loss L	Q Loss	P Loss T	Q Loss
kV		MW	MVar	MW	MVar
6.3		0	0	0	0.004
10		0.063	-0.073	0.013	0.132

ID	Node	U	u	Angle U	P Load	Q Load	P Gen	Q Gen	Q Shunt	dPL/dPG	dPL/dQG	Descript	Zone	Area	Partial	Feeder
	Name	kV	%	°	MW	MVar	MW	MVar	MVar						Network	

ID	Node	Element	Type	P	Q	I	Angle I	Loading	Scaling	Scaling	P Loss	Q Loss	P Fe	P Comp	Q Comp	Tap	Ratio
	Name	Name		MW	MVar	kA	°	%			MW	MVar	MW	MW	MVar		

Fig.9. Losses in "Vitia" substation -110/35/10 kV when new generators are connected

Comparison of the voltage profile and losses in Vitia substation when generators are connected and not connected are presented on fig.10 and fig.11.

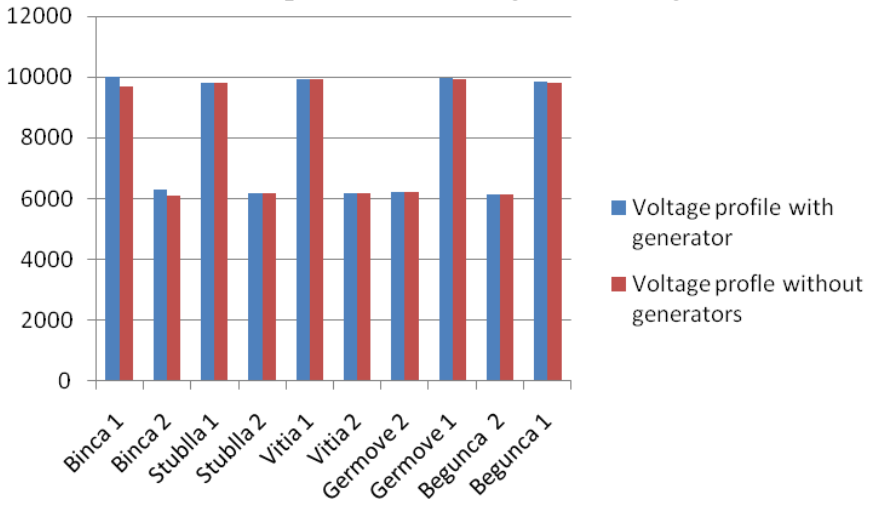


Fig.10. Comparison of the voltage profile when generators are connected and not connected in "Vitia" substation -110/35/10 kV

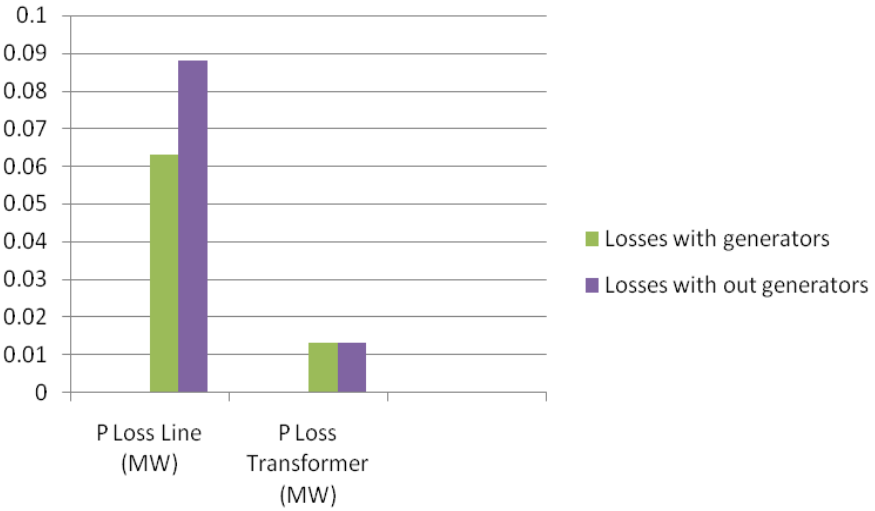


Fig.11. Comparison of the losses when new generators are connected and not connected in "Vitia" substation -110/35/10 kV

7. CONCLUSIONS

In this paper is presented the impact of the distributed generators when they are connected to the distribution network of region Vitia. From the presented simulation results a conclusion can be made that the distributed generators can greatly influence the node voltages. The results show that new generators to be connected to substation "Vitia" will have an impact on network voltages and losses. Voltage profile problem in the presence of distributed generation is much prominent than in the case without them. Based on the current energy situation in Kosovo, the installation of HPPs plays a significant role in increased security besides the supply of customers, as well as to meet the criteria for the share of alternative (renewable) energy in the energy mix of Kosovo. Connection of new generators in Vitia substation has impact on the voltage profile of "Binca 1" and "Binca 2". The construction of the particular new HPP with hydro generators will play a significant role, including security of the power system, quality of energy, increased generating capacity, as well as increased security of the customer's electrical power supply. The connection of DGs close to the consumers reduces the losses in the distribution systems (in transmission grid loses can be reduced as well). The connection of new DGs in parts of the grid operated by design as distributive schemes, impede rearrangement of the protection schemes and their adjustments in case of the partially reverses power flows, that may occur. The connection of new generators to substation "Vitia" is important as an option for grid reserve and grid restoration generation, in cases of commutations, outage of grid components and in case of planned outages of other generation facilities in the power system as well.

REFERENCES

[1]. P. Kundur, ***Power System Stability and Control***, McGraw-Hill, Inc.

[2]. Ismail Kasikci, ***Short circuits in Power System***.

[3]. T. Van Cutsem, C. Vournas, ***Voltage Stability of Electric Power Systems***.

[4]. I. Dobson, H. Glavitsch, C. Liu, Y. Tamura, ***Voltage Collapse in Power Systems***, 1992.

[5]. P. M. Anderson, A. A. Fouad, ***Power System Control and Stability***, IEEE Press, 2003.

[6]. Mohamed Talal Mohamed Elmatana, ***The Effect of Distributed Generation on Power System Protection***, University of Exeter, 2010.

[7]. Benoît de Metz-Noblat, Frédéric Dumas, Christophe Poulain, ***Calculation of short-circuit currents***, publ. no. 158, Schneider Electric, 2005.

[8]. KOSTT (Kosovo transmission system and market operator), ***Data from KOSTT*** –transmission system and market operator, (www.kostt.com).

[9]. Rexhep Shaqiri, Dimitar Bogdanov, ***Connection of New Generators in the Electrical Power System of Kosovo,*** International Burch University, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, ISBN 978-9958-834-36-3.

[10]. Rexhep Shaqiri, Dimitar Bogdanov, ***Connection of new generators to the "Prizreni 2" substation and their impact on the levels of short circuit currents***. VI-th Conference Faculty of Electrical Engineering "EF 2014", 15-17 September 2014, Sozopol, Bulgaria, ISSN 1311-0829.

Authors: Rexhep Shaqiri, PhD student, Chair of electrical power engineering, Faculty of Electrical Engineering, TU-Sofia, E-mail address: *rexhep_shaqiri@hotmail.com*; Vezir Rexhepi, PhD student at the Faculty of Electrical Engineering, Chair of electrical power engineering, TU-Sofia, Bulgaria, E-mail address: *vezir.rexhepi@gmail.com*; Dimitar Bogdanov, assoc. Professor, PhD, Chair of electrical power engineering, Faculty of Electrical Engineering, TU-Sofia, E-mail address: *dbogdanov@tu-sofia.bg*

Received 15.12.2015 **Reviewer:** Assoc. prof. PhD Rad Stanev

ОЦЕНКА КОМПОНЕНТИТЕ НА ПЪЛНАТА МОЩНОСТ И ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ЗАГУБИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИТЕ СИСТЕМИ ПРИ НАЛИЧИЕ НА СМУЩЕНИЯ ОТ НЕСИМЕТРИИ И ВИСШИ ХАРМОНИЦИ

Петко Петков, Димитър Димитров

Резюме: *Поради редица технико-икономически съображения в индустриалните предприятия се наблюдава ръст на мощностите на производствените агрегати, имащи несиметричен и нелинеен характер. Това води до циркулиране на неактивни мощности в електроенергийните системи, като пулсираща и деформационна. Тяхното присъствие предизвиква влошаване качеството на електрическата енергия и увеличаване на електрическите загуби в системите. В настоящият доклад се разглежда възможност, свързана с оценка компонентите на пълната мощност, показателите за качество на електрическата енергия и предизвиканите загуби в електроенергийните системи при наличие на смущения от несиметрии и висши хармоници.*
Ключови думи: *несиметрия, висши хармоници, качество на електрическа енергия, електрически загуби, енергийна ефективност*

ASSESSMENT OF THE APPARENT POWER COMPONENTS AND ELECTRICAL LOSSES IN POWER SYSTEMS IN THE PRESENCE OF DISTURBANCES BY LOAD UNBALANCE AND HARMONICS

Petko Petkov, Dimitar Dimitrov

Abstract: *For a number of technical and economic considerations in industrial plants there is an increase in capacity of asymmetrical and non-linear production aggregates. This further leads to circulation of inactive power components in power systems such as unbalanced and distortion powers. Their presence causes deterioration in the quality of electrical energy and increases the electrical losses in the systems. The present paper considers the possibility of evaluation the components of the apparent power, quality indicators of electrical power and electrical losses in power systems in the presence of disturbances by harmonics and unbalance, applying the total current space vector theory and the instantaneous power theory.*
Keywords: *unbalance, harmonics, quality indicators of electrical power, electrical losses, energy efficiency*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В електроенергийните системи на индустриалните предприятия, освен присъствието на активна и реактивна мощност, при наличие на смущения от несимет-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

рии и висши хармоници се формират и циркулират още и неактивни мощности, като така наречените, пулсираща и деформационна мощности. Тяхното наличие в електроенергийните системи води до влошаване качеството на електрическата енергия, понижаване на експлоатационните характеристики на електрооборудването и завишаване на електрическите загуби при пренос, разпределение и потребление на електрическата енергия. Появата на тези смущения в електроенергийните системи се предизвиква основно от наличието на различни несиметрични потребители, както и от мощни нелинейни, в електрическо отношение, товари, каквито се явяват в значителна част, полупроводниковите преобразуватели. Минимизиране на негативното влияние на тези смущения е свързано с използването на различни методи и технически средства, което по същество представлява ограничаване на циркулиращите в системата неактивни мощности. Определяне на тези мощности с прилагането на класическите подходи [1,2] е свързано с редица трудности и неточности. Това се отнася и за предизвиканите от тях електрически загуби, особено при тяхното детерминиране по отношение общите формирани загуби в електроенергийната система.

В настоящата разработка се разглежда един подход, свързан с определяне на компонентите на пълната мощност при наличие на смущения от несиметрия и висши хармоници, детерминиране на получените електрически загуби, предизвиквани от отделните компоненти на пълната мощност, като: активна, реактивна, пулсираща и деформационна. Този подход е реализиран с помощта на теорията на изобразяващия вектор в съчетание с теорията на моментната мощност. В теоретичен план, при разработка на предлагания подход не са прилагани компромисни допускания, поради което, по същество, отсъства методична грешка при определяне компонентите на мощностите и реализираните от тях електрически загуби. Така представеният подход е предназначен за трифазни четири проводникови мрежи, но може да се приложи и за трифазни трипроводникови, каквито преобладаващо се явяват корабните. Разработеният и предлаган в този доклад подход е подходящ при осъществяване анализ и оценка състоянието на електроенергийните системи, работещи в условия на такива смущения и още, при прилагане на мониторинг, свързан с реализиране на енергийна ефективност в тях.

2. ТЕОРЕТИЧЕН АНАЛИЗ

В трифазните четирипроводникови мрежи, по отношение на токовете, протичащи през тях е справедливо равенството:

$$i_R + i_S + i_T = i_N \ , \qquad (1)$$

където: i_R, i_S, i_T и i_N представляват фазните токове и тока през четвъртия проводник.

За да се приложи теорията на изобразяващият вектор трябва сумата от фазните токове да бъде равна на нула. Следователно, в този случай, трифазната четирипроводникова мрежа трябва еквивалентно да се преобразува в трифазна трипроводникова, а именно:

$$i_R^* + i_S^* + i_T^* = 0, \tag{2}$$

при което:

$$i_R^* = i_R - i_N/3; \quad i_S^* = i_S - i_N/3; \quad i_T^* = i_T - i_N/3.$$

За фазните напрежения на трифазната четирипроводникова мрежа също е изпълнена зависимостта:

$$u_R + u_S + u_T = 0, \tag{3}$$

От зависимостите (1) и (2), съгласно [3] могат да се формират изобразяващи вектори на тока и напрежението,като например за тока,той има вида:

$$\bar{I}(t) = \frac{2}{3}(i_R^* + a i_S^* + a^2 i_T^*), \tag{4}$$

където: a и a^2-представляват оператори, завъртащи съответните токове на 120° и 240°.

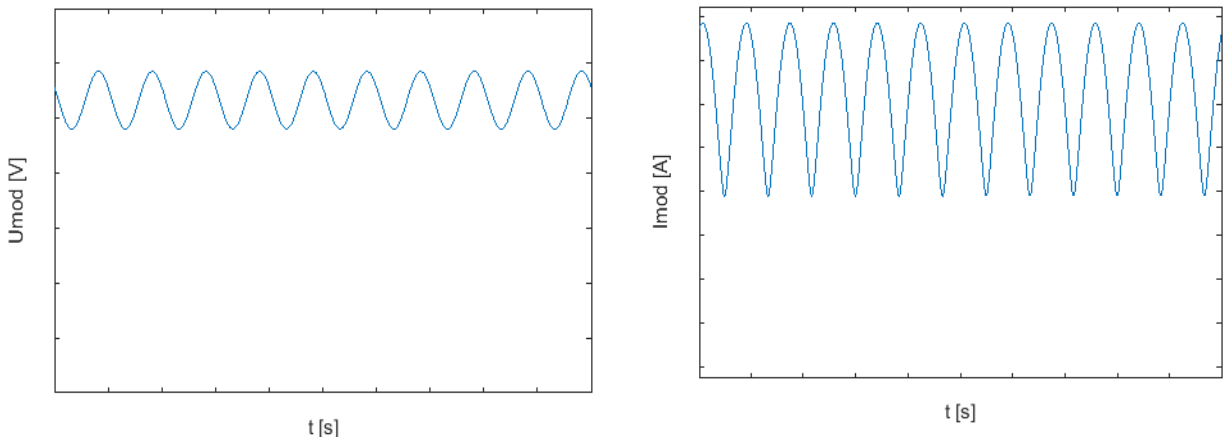
Изобразяващият вектор на напрежението се представя по същия начин както при тока. Модулите на изобразяващите вектори на тока и напрежението в неподвижни координатни системи „a,b,c" и ортогонална „α, β" могат да се представят със следните зависимости:

$$\left|\bar{I}(t)\right| = \sqrt{\frac{2}{3}(i_R^{*2} + i_S^{*2} + i_T^{*2})} = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}, \tag{5}$$

$$\left|\bar{U}(t)\right| = \sqrt{\frac{2}{3}(u_R^2 + u_S^2 + u_T^2)} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \tag{6}$$

при което: i_α , i_β, и u_α ,u_β –представляват моментните стойности на токовете и напреженията, представени в ортогонална координатна система „α, β".

При наличие на смущения в трифазната система модулите на изобразяващите вектори $|U(t)|$ и $|I(t)|$ не са константни величини във времето, както това е показано на фиг.1а) и б).



а) *б)*

Фиг.1. Модули на изобразяващите вектори

Коефициентите на несинусоидалност по ток и напрежение се определят, съгласно БДС EN 50 160, след като се извърши хармоничен анализ на кривите на

тока и напрежението. Коефициентите на несиметрия по ток и напрежение се определят, съгласно горния стандарт, след като се обработят модулите на изобразяващите вектори на тока и напрежението и се работи само с първия хармоник на кривата на съответния модул, както това е показано в [4].

Съгласно [5], пълната мощност на една електроенергийна система може да бъде представена с израза:

$$S = \sqrt{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}\sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2} \tag{7}$$

като електрическите величини, напрежение и ток, участват с техните ефективни стойности.

Теорията на моментната мощност [6] дава основание да се оцени характера на уравновесеност на трифазните електрически системи. Както е известно, при уравновесените системи, моментната мощност остава постоянна величина във времето, докато при неуравновесените, изменението на тази мощност е показател за наличие на смущения в трифазната мрежа. Уравновесеността на трифазната електроенергийна система е свързана със скоростта на изменение на потребяваната енергия, т.е. с изменение на трифазната моментна мощност във времето.

Най-общо моментната пълна мощност S(t), като изобразяващ вектор може да бъде представена във вида:

$$\overline{S}(t) = p(t) + jq(t) \tag{8}$$

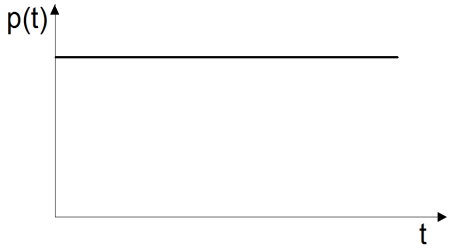
при което: p(t) и q(t) представляват реалната и имагинерната компоненти на пълната мощност. Изменението на компонентата p(t) във времето, носи информация за моментната мощност на трифазната система и от там за потребяваната трифазна активна мощност „P" . След определяне на първия хармоник на p(t) се намира и пулсиращата мощност „N", съгласно [7].

В ортогонална координатна система αβ, компонентите p(t) и q(t) се определят с изразите:

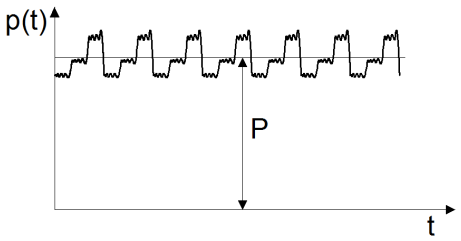
$$p(t) = \frac{3}{2}(u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta), \tag{9}$$

$$q(t) = \frac{3}{2}(u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta) \ . \tag{10}$$

Реалната компонента на изобразяващия вектор на пълната мощност на една напълно уравновесена система има вида, показан на фиг.2, а на неуравновесена, на фиг.3



Фиг.2. Уравновесена система



Фиг.3. Неуравновесена система

Активната и реактивната мощности на трифазната система могат да бъдат определени от моментните им стойности:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt \ , \quad Q = \frac{1}{T}\int_0^T q(t)dt \, . \tag{11}$$

След определяне на активната „P", реактивната „Q" и пулсиращата „N" съставки на пълната мощност „S", съгласно (7) се определя и деформационната мощност „D" ,а именно:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2 - N^2} \, , \tag{12}$$

по подход, включващ пълния набор от висши хармоници, генерирани от наличието на нелинейни товари.

Техническите електрически загуби, реализирани в електроенергийните системи се определят основно от големината и характера на електрическите товари. Тези загуби върху реалната компонента на импеданса на електроразпределителната система, изразени чрез изобразяващия вектор на пълния ток може да се представят във вида:

$$\overline{\Delta p}(t) = \frac{3}{2} R_\Sigma \left| \bar{I}(t) \right|^2 , \tag{13}$$

където:

- R_Σ - представлява активното електрическо съпротивление на импеданса на електроразпределителната мрежа;
- $|\bar{I}(t)|$ - модул на изобразяващият вектор на пълния ток;
- $\overline{\Delta p}(t)$ – представлява мярка, която авторите си позволяват да нарекат моментна мощност на загубата и дава информация за загубите на електрическа енергия, определени от всички компоненти на пълния ток, протичащ в електроразпределителната мрежа.

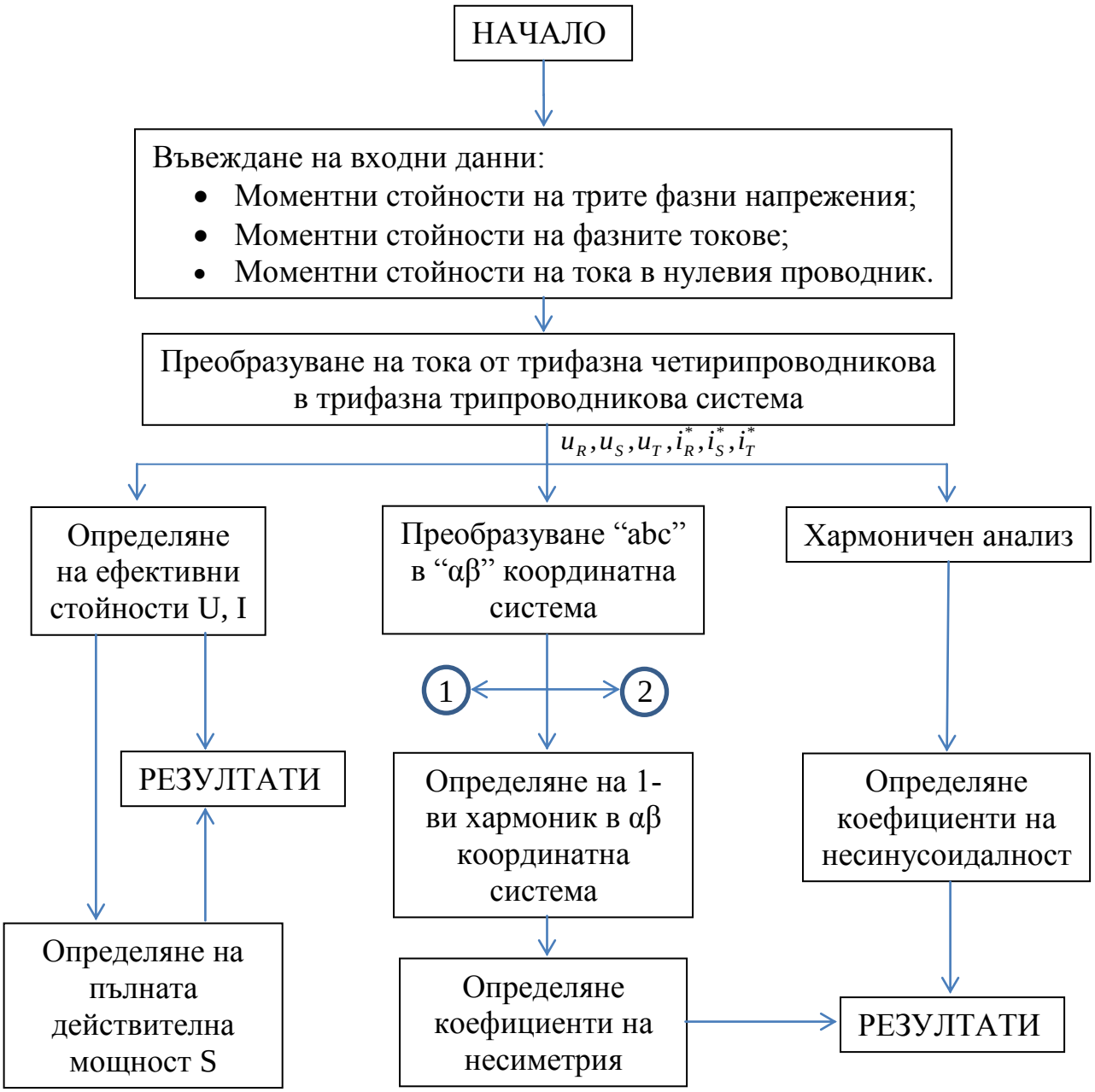
Количественото съотношението на загубите от различните причинители може да се изрази, използвайки израза:

$$\Delta P = \frac{1}{T}\int_0^T \Delta p(t)dt \, . \tag{14}$$

В експлоатационен режим структурата на електроснабдителната мрежа се променя динамично, което означава, че в точката на измерване еквивалентното активно електрическо съпротивление R_Σ също се променя. От израз (13) се вижда, че моментната мощност на загубата $\Delta p(t)$ е пропорционална на $|\bar{I}|^2$. Поради динамичното изменение на R_Σ оценката на загубите в енергийната система, породени от компонентите на пълния ток, се определя в процентно съотношение от пълните загуби в електроенергийната система ΔP, които се приемат при всички обстоятелства за 100%. Подхода за определяне на частта от загубите, породени от наличието на смущения от несиметрии, висши хармоници,както и от потребяваната активна и реактивната мощност в системата, е аналогичен на разгледания по-горе подход, с детерминиране компонентите на пълната мощност.

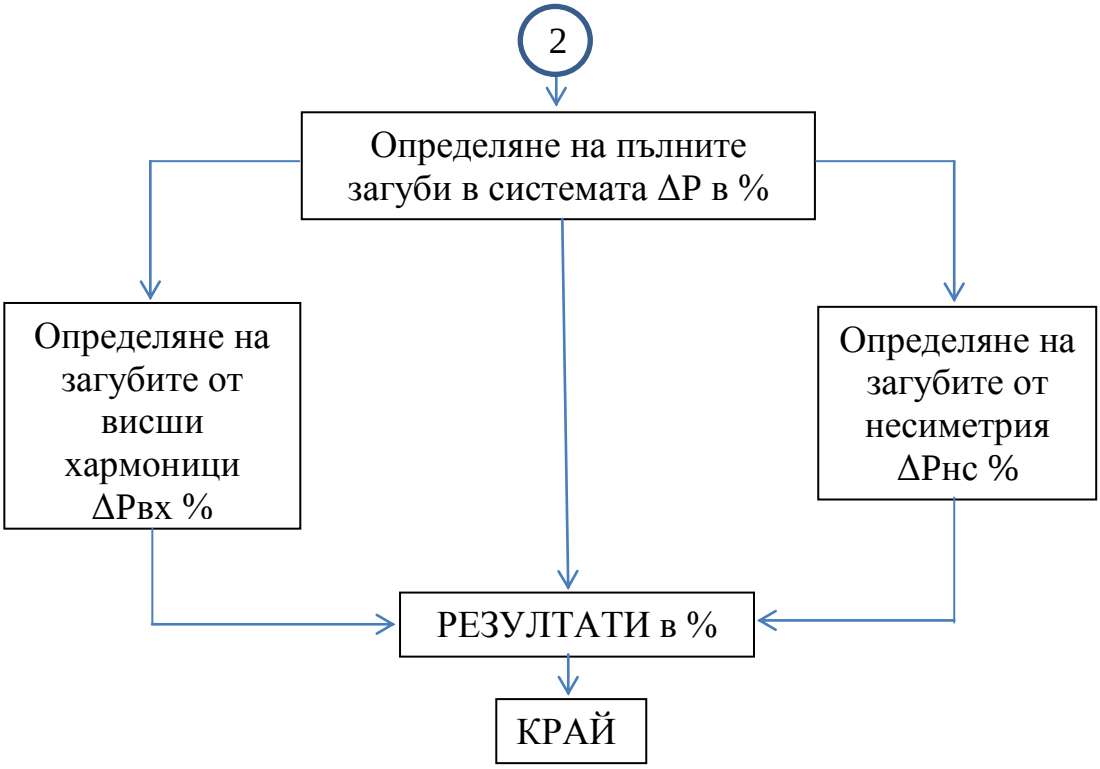
3. ИНФОРМАЦИОННА ТЕХНОЛОГИЯ

Алгоритмът за определяне компонентите на пълната мощност и електрическите загуби в електроенергийните системи, при наличие на смущения от несиметрии и висши хармоници е показан като блокова схема на фиг.4 и е разработен в среда MATLAB.



Фиг.4. Алгоритъм за определяне коефициентите на несиметрия и несинусоидалност на тока и напрежението – основно тяло на информационната технология за определяне компонентите на пълната мощност и електрическите загуби в електроенергийните системи, при наличие на смущения от несиметрии и висши хармоници

Фиг.5. Алгоритъм за определяне компонентите на пълната мощност.



Фиг.6. Алгоритъм за определяне съотношението на загубите в електроенергийните системи

4. РЕЗУЛТАТИ

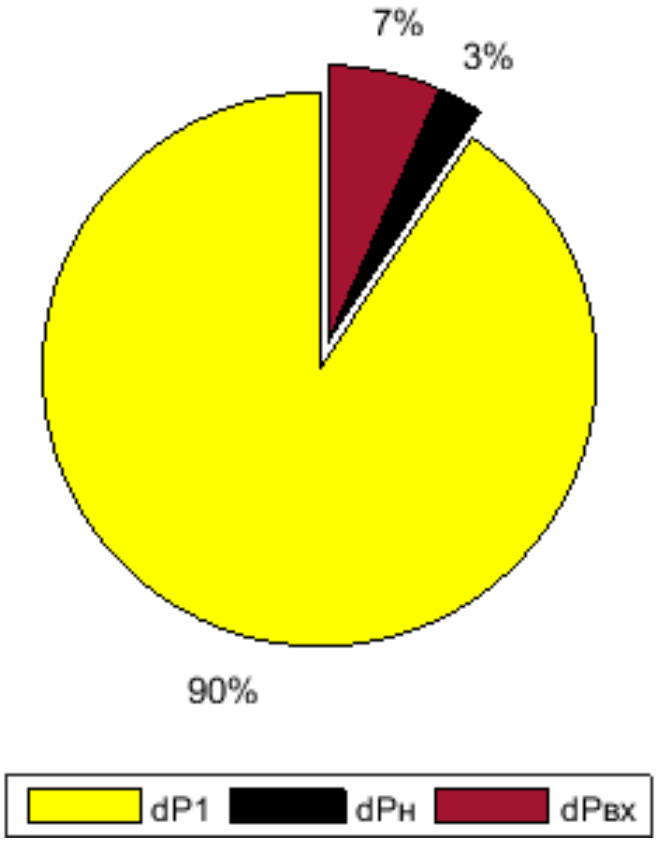
В разработката са посочени резултати от изследване на цехова подстанция със следните характеристики:

- Цехов захранващ трансформатор: S=1000 kVA, 20/0,4 kV , u_k= 6%;
- Нелинеен изправителен товар: P=400 kW;
- Несиметричен товар: P_a= 140kW, cosφ=0.92, P_b=80kW, cosφ=0.90, P_c=50kW, cosφ=0.88,
- Симетричен товар: P=110kW, cosφ=0.96

Резултатите от извършеното изследване са отразени в табл.1, а разпределението на електрическите загуби в електроразпределителната система на цеха, на фиг.7.

Таблица 1

№	Наименование на величините	Стойност
1	Ефективни стойности на фазните напрежения	
	U_R	220.00 V
	U_S	215.92 V
	U_T	219.72 V
2	Ефективни стойности на фазните токове	
	I_R	1521.32 A
	I_S	1419.40 A
	I_T	1360.53 A
3	Пълна мощност S	941.070 kVA
4	Коефициенти на несиметрия	
	по напрежение - $K_{Uнес}$	1.31 %
	по ток - $K_{Iнес}$	6.74 %
5	Коефициенти на несинусоидалност	
	по напрежение - $K_U\upsilon$	5.85 %
	по ток – $K_I\upsilon$	11.63 %
6	Активна мощност P	894.594 kW
7	Активна мощност по първи хармоник P_1	892.238 kW
8	Реактивна мощност Q	249.817 kVAr
9	Реактивна мощност по първи хармоник Q_1	239.770 kVAr
10	Пулсираща мощност N	63.430 kVA
11	Деформационна мощност D	137.409 kVA
12	Резултативен фактор на мощността K_M	0.95
13	Фактор на мощността по първи хармоник cosφ_1	0.97



Фиг.7. Разпределение на електрическите загуби

където:

- dP1 – представляват общите загуби, причинени от първи хармоник на тока и правата последователност от присъствието на несиметрия, при съответния фактор на мощността;
- dPн – загуби, в резултат на обратната последователност от присъствието на несиметрия;
- dPвх – загуби, дължащи се на висши хармоници.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Този подход е реализиран с използване теорията на изобразяващия вектор в съчетание с теорията на моментната мощност. В теоретичен план, при разработка на предлагания подход, не са прилагани компромисни допускания, поради което, по същество, отсъства методична грешка при определяне компонентите на мощността и реализираните от тях електрически загуби. Така представеният подход е предназначен за трифазни четирипроводникови мрежи, но може да се приложи и за трифази трипроводникови, каквито преобладаващо се явяват автономните електроенергийни системи, в частност корабните. Разработеният и предлаган, в този доклад, подход е подходящ при извършване на анализ и оценка състоянието на електроенергийните системи, работещи в условия на смущения, породени от висши хармоници и несиметрично захранващо напрежение, и още, при осъществяване на мониторинг, свързан с реализиране на енергийна ефективност в тях.

ЛИТЕРАТУРА

[1] R. Drechsler, ***Kvalita, hodnoceni a mereni elektricke energie v provosu tyristorovych zarizeni***, CVTS-FEL-CVUT, Praha, 1976
[2] L.S. Czarnecki, ***Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory***, Przegląd Elektrotechniczny, R84, No. 6/2008, pp. 28-37
[3] Георгиев Г.А, ***Изследване на възможности за въздействие върху енергийната ефективност в КЕЕС***, Дисертационен труд –ВВМУ"Н.Й Вапцаров" Варна- 2012г.
[4] Петков П.Д, ***Устройство за измерване коефициента на несиметрия в трифазни електрически мрежи***, МПК Е 01 Р 29/16 12.01.89
[5] Дрекслер Р., ***Измерение и оценка качества електроенергий при несиметричной и нелинейнои нагрузке***, - Москва „Енергоатомиздат"1985г.
[6] Шиндловский А.К, Мостовяк И .В, Москаленко Г.А.,***Уровновешивание режимов многофазних цепей***, Киев „Наукова думка" 1990г.
[7] Petkov P, Stoilov G, Nedev M, Chikov V, Angelov G.,***A dinamic current unit for getting symmetry of three phase electrical power system***, Journal of Marine Technilogy and Enviroment vol.1 2009, Romania

Автори: Петко Душков Петков, доц. д-р, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане", Технически Университет-Варна, E-mail address: *petkov_varna@abv.bg*
Димитър Маринов Димитров, асистент, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане", Технически университет-Варна, E-mail address: *dimitrovdm@ieee.org*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Николай Матанов

ОПРЕДЕЛЯНЕ ЕНЕРГИЙНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ГЕНЕРАТОР ЗА „БРАУНОВ ГАЗ”

Иван Петров, Георги Стойчев, Георги Димитров

Резюме: *В работата са представени резултати от проведено изследване за влиянието на параметрите на генератор за „Браунов газ“ върху енергийните му показатели. За целта при различни конструкции и режими на работа са определени Фарадеевата и електрическата ефективност на генератора. Показаните резултати имат практическо приложение при разработване на генератори за „Браунов газ” с по-висока енергийна ефективност. Резултатите от изчисленията са представени в табличен и графичен вид. Направен е и кратък анализ на получените резултати.*

Ключови думи: *генератори на „Браунов газ”(HHO генератори), енергийни характеристики на генератори за „Браунов газ”*

DETERMINATION OF ENERGY PERFORMANCE OF "BROWN'S GAS" GENERATOR

Ivan Petrov, Georgi Stoychev, Georgi Dimitrov

Abstract: *The work presents the results of a research on the influence of parameters of Brown's gas generator on his energy performance. For this purpose, in different structures and operating modes are defined Faraday and the electrical efficiency of the generator. The obtained results have practical applications in developing generators of Brown's gas with higher energy efficiency. The results of the calculations are presented in tabular and graphical form.*

Keywords: *generator of Brown's gas (HHO generator), energy performance of "Brownian gas" generator*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Най-големите предизвикателства в началото на XXI век за човечеството са решенията на проблемите свързани с нарастващо енергийно потребление придружено от прогресивно нарастване на населението при изчерпване на природните горива. Ускореното глобално затопляне и замърсяване на околната среда причинява поредица от климатични аномалии нарушаващи и застрашаващи нормалният начин на живот.

Най-актуалният метод за разрешаването на горепосочените проблеми е създаване и внедряване на технологии използващи възобновяеми източници на енер-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

гия /ВЕИ/ – слънчева, вятърна, водна и геотермална енергия. Тези енергийни източници обаче се характеризират с географска неравномерност и с изразен периодичен денонощен и сезонен цикъл. Известен е и друг енергиен носител в лицето на водорода, който не отделя вредни газове при изгаряне и има редица преимущества пред другите енергийни източници.

2. ОСНОВНИ ЗАВИСИМОСТИ ПРИ ГЕНЕРАТОРИТЕ ЗА „БРАУНОВ ГАЗ”

Зависимостите определящи работата и ефективността на генераторите за „Браунов газ” (HHO генератори) са следните:

- Работно напрежение;
- Съпротивление на генератора;
- Плътност и големина на тока;
- Климатични условия – атмосферно налягане, температура на околната среда и др.

Работното напрежение, съпротивлението и токът от своя страна зависят от:

- Ламелите на генератора – вид на материала, площ и съпротивление;
- Брой на ламелите / Брой на клетките;
- Разстояние между ламелите;
- Електролитен разтвор – вид, концентрация, съпротивление, температура;
- Честота на импулсния ток.

Съпротивление на генератора.

Теоретично разгледано еквивалентното съпротивление на генератора може да се представи като сбор на съпротивлението на плочите и това на електролитния разтвор. За целта се използва следната формула:

$$\boldsymbol{R_{GEN} = R_{PLATES} + R_{SOLUTION}} \quad (1)$$

където:

$\boldsymbol{R_{GEN}}$ е еквивалентното съпротивление на генератора, Ω;

$\boldsymbol{R_{PLATES}}$ – съпротивление на ламелите, Ω;

$\boldsymbol{R_{SOLUTION}}$ – съпротивление на разтвора, Ω.

Плътност и големина на тока.

Плътността на тока при генератори с диаметър на ламелите от 15 до 20 cm (6÷8 in) трябва да е от порядъка на 0,15A/cm^2, а средната плътност трябва да е съответно в границите 0,036÷0,041 A/cm^2 [1, 2]. Големината на тока при тези диаметри на ламелите е от 4 до 16 A . Данните са показани в табл.1.

Температура и налягане.

Ефективността на генератора не се нарушава въпреки електрическите загуби в него, проявяващи се под формата на топлина, защото повишаването на темпера-

турата от своя страна подобрява процеса на електролизата и по този начин се компенсират частично електрическите загуби [1, 4].

Таблица 1

Диаметър на плочите – D	Минимален постоянен ток, A	Максимален постоянен ток, A
6" (15,24 cm)	4	7
8" (20,32 cm)	9	16
10" (25,4 cm)	18	30
12" (30,5 cm)	25	42

При повишаване на температурата отслабват молекулните връзки. Именно поради тази причина в промишлеността за получаване на водород и кислород се използва методът „Високотемпературна електролиза". При този метод се използва температура от 800 °C до 1000 °C, която прави молекулярните връзки много крехки и лесно разрушими. За достигане на посочените температури е необходимо и покачване на налягането, за да не достигне температурата на кипене на електролита в генераторите.

3. ИЗЧИСЛЯВАНЕ КОЕФИЦИЕНТА НА ПОЛЕЗНО ДЕЙСТВИЕ (MMW) НА ГЕНЕРАТОРИ ЗА „БРАУНОВ ГАЗ"

Съвременен метод за определяне коефициента на полезно действие (ефективността) на генераторите за „Браунов газ" е изразяването му чрез показателя „**MMW**" (в превод **MMW** означава милилитри за минута за ват – ml/(min.W). С други думи получените обемни милилитри за една минута на базата на вложената енергия за добивът им. Теоретичният максимум за **MMW** е 9,28 и при тази стойност ефективността е 100%. Тази ефективност никога не може да бъде постигната на практика и това е напълно нормално. Ефективността изразена в MMW при генераторите произвеждащи оксиводородната смес (HHO), анодът на които не е изработен с катализатор (като платина например), имат ефективност до 6,16 MMW.

Максималната стойност $\mathbf{MMW_{MAX}}$ е получена използвайки законите на Фарадей и Фарадеевата ефективност, както и свободната енергия на Гибс. Стойностите на **MMW** съответстват на електрическата ефективност, която се определя с използване на следните формули:

$$E_{eff} = \frac{E_{T\,min}}{E_{REAL}}.100,\%;\quad E_{T\,min} = \left[\left(U_{min}.N_{CELL}\right).I\right].T;$$
$$E_{REAL} = \left[\left(U_{REAL}.I\right).T\right] \qquad (2)$$

където:

$E_{T\,min}$ е необходимата енергия при 100% ефективност за получаване на целият обем газ, Wh;

E_{REAL} – вложената действителна енергия, Wh;
U_{min} и U_{REAL} – минималното напрежение на клетка за реализиране на процеса и реалното напрежение подадено на генератора, V;
N_{CELL} – брой на клетките на генератора;
T – времето за работа на генератора, h.

При определяне на Фарадеевата ефективност на електролизния процес се използват количествата електрони (кулони) и моловете газ, като по този начин се определя електрическата ефективност на клетката спрямо токът, който протича през нея. Според закона на Фарадей 4 мола електрони (e_{mol}) движещи се през клетката създават 2 мола H_2 газ и 1 мол O_2 газ при 100% ефективност [3, 4].
За изчисляване на Фарадеевата ефективност на даден генератор е необходимо първо да се определи общото количество оксиводородна смес V_{TOTAL} (V_{TOTAL}= V_H +V_O), което е сбор от обемите на водородния и кислородния газ, изразени в dm^3/e_{mol} (литри/мол електрони). За целта се използва формулата:

$$V_{TOTAL} = \frac{\left\{\left[\frac{Q_{TOTAL}}{F_{CONSTANT}}.\left(\frac{1}{e_{mol\ H}}+\frac{1}{e_{mol\ O}}\right)\right].G_{CONSTANT}.10^3\right\}}{p}.(t+273{,}15) \quad (3)$$

където:
Q_{TOTAL} е общият електрически заряд (количеството електричество) за осъществяване на процеса, C (1C = 1A.s);
$F_{CONSTANT}$ – константа на Фарадей – 96485,3415 A.s/mol;
$e_{mol\ H}$ и $e_{mol\ O}$ – необходим брой молове електрони за получаване на 1 mol водороден газ и 1 mol кислороден газ;
$G_{CONSTANT}$ – универсална газова константа – 8,314472 J/(mol.K);
p – налягане, при което се провежда процеса, Pa;
t – външна околна температура, при която се провежда процеса, °C.

Фарадеевата ефективност F_{eff} на даден генератор се определя по формулата:

$$F_{eff} = \frac{V_t}{V_{TOTAL}} \quad (4)$$

където:
V_t е количеството HHO газ получаван за период от една минута, l/min. (LPM).

Коефициентът на полезно действие на даден генератор изразен в **MMW** се определя чрез електрическата ефективност E_{eff} с използване на следната формула:

$$MMW = MMW_{MAX}.E_{eff} \quad (5)$$

където:
MMW_{MAX} е теоретичният максимум HHO газ получаван за период от една минута ml/min. (MMW_{MAX} = 9,28).

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО НА К.П.Д. НА ГЕНЕРАТОРИ ЗА „БРАУНОВ ГАЗ”

Изследванията са проведени с три конструкции генератори на „Браунов газ” – със схеми -3n+3n-, -5n+5n- и -9n+9n- (с 8, 12 и 20 клетки), като всички те са с разстояние между плочите 8 mm. В таблици 2÷5 са показани резултатите от измерванията, проведени при температура на генератора t_{GEN} равна на тази на околната среда (t = 25 °C), т.е. не е достигнат температурният режим на генератора. За генератора със схема -5n+5n- са проведени и измервания при установен температурен режим на генератора за съответния ток (t_{GEN} = 50 °C) - табл. 4.

Таблица 2

Схема " -3n+3n- ", електролит – 25% KOH, режим на работа – студен t_{GEN} = 25℃

Режим	Space	I	U_{REAL}	P	T	U_{CELL}	V_{MEAS}	Vt	E_{eff}	t	Налягане	КПД
COLD	mm	A	V	W	s	V	dm^3	LPM (dm^3/min)	%	°C	Pa	MMW
1	8	5	7,56	37,80	690	1,89	2	0,173913	0,496	25	102230	4,6008742
2	8	10	7,98	79,80	292	1,99	2	0,410959	0,555	25	102230	5,1498610
3	8	15	8,15	122,25	185	2,03	2	0,648649	0,572	25	102230	5,3059194
4	8	20	8,26	165,20	134	2,06	2	0,895522	0,584	25	102230	5,4208377
5	8	25	8,39	209,75	107	2,10	2	1,121495	0,576	25	102230	5,3468192
6	8	30	8,48	254,40	89	2,12	2	1,348315	0,571	25	102230	5,2999788

Таблица 3

Схема " -5n+5n- ", електролит – 25% KOH, режим на работа – студен t_{GEN} = 25℃

Режим	Space	I	U_{REAL}	P	T	U_{CELL}	V_{MEAS}	Vt	E_{eff}	t	Налягане	КПД
COLD	mm	A	V	W	s	V	dm^3	LPM (dm^3/min)	%	°C	Pa	MMW
1	8	5	11,39	56,95	434	1,88	2	0,276498	0,523	25	102230	4,8550956
2	8	10	11,85	118,50	192	2,00	2	0,625000	0,569	25	102230	5,2742616
3	8	15	12,18	182,70	122	2,01	2	0,983607	0,580	25	102230	5,3837250
4	8	20	12,30	246,00	90	2,05	2	1,333333	0,584	25	102230	5,4200542
5	8	25	12,49	312,25	74	2,07	2	1,621622	0,560	25	102230	5,1933439
6	8	30	12,59	377,70	61	2,09	2	1,967213	0,561	25	102230	5,2084012
7	8	35	12,66	443,10	52	2,12	2	2,307692	0,561	25	102230	5,2080621

Таблица 4

Схема " -5n+5n- ", електролит – 25% KOH, режим на работа – загрят до 50℃

Режим	Space	I	U_{REAL}	P	T	U_{CELL}	V_{MEAS}	Vt	E_{eff}	t	Налягане	КПД
COLD	mm	A	V	W	s	V	dm^3	LPM (dm^3/min)	%	°C	Pa	MMW
1	8	5,5	10,60	58,30	405	1,79	2	0,296296	0,548	25	102230	5,0822692
2	8	10	10,90	109,00	201	1,80	2	0,597015	0,545	50	102230	5,0549274
3	8	11	11,00	121,00	179	1,82	2	0,670391	0551	50	102230	5,1132707
4	8	15	11,06	165,90	128	1,82	2	0,937500	0,562	50	102230	5,2153220
5	8	16,6	11,11	184,43	114	1,84	2	1,052632	0,568	50	102230	5,2675721
6	8	20	11,14	222,80	95	1,85	2	1,263158	0,564	50	102230	5,2323729
7	8	22,3	11,16	248,89	85	1,85	2	1,411765	0,564	50	102230	5,2353955

Режим	Space	I	U_{REAL}	P	T	U_{CELL}	V_{MEAS}	Vt	E_{eff}	t	Налягане	КПД
COLD	mm	A	V	W	s	V	dm^3	LPM (dm^3/min)	%	°C	Pa	MMW
8	8	25	11,18	279,50	78	1,86	2	1,538462	0,547	50	102230	5,0799690
9	8	27,5	11,20	308,00	72	1,86	2	1,666667	0,538	50	102230	4,9926400

Таблица 5

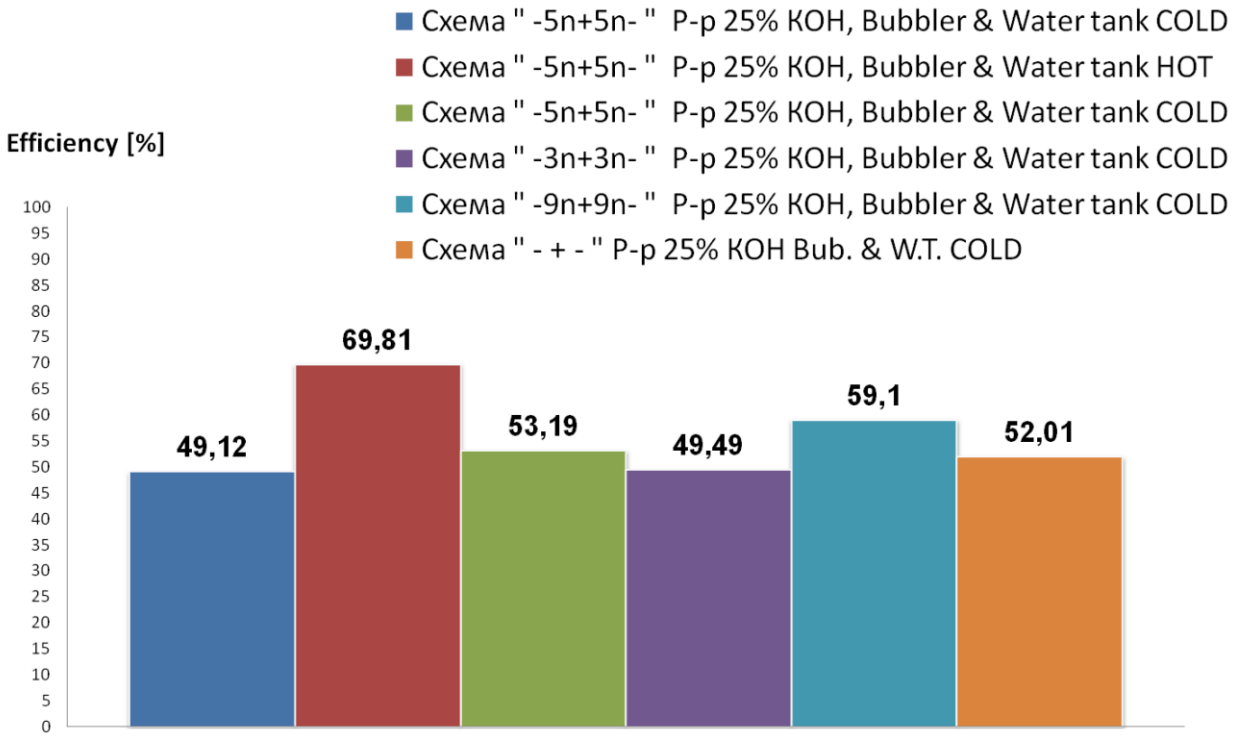
Схема " -9n+9n- ", електролит – 25% KOH, режим на работа – студен t_{GEN} = 25 ℃

Режим	Space	I	U_{REAL}	P	T	U_{CELL}	V_{MEAS}	Vt	E_{eff}	t	Налягане	КПД
COLD	mm	A	V	W	s	V	dm^3	LPM (dm^3/min)	%	°C	Pa	MMW
1	8	5	19,15	95,75	311	1,92	2	0,385852	0,434	25	102230	4,0297868
2	8	6	19,36	116,16	243	1,94	2	0,493827	0,458	25	102230	4,2512669
3	8	9	19,70	177,30	139	1,97	2	0,863309	0,525	25	102230	4,8692011
4	8	10	19,99	199,90	122	2,00	2	0,983607	0,530	25	102230	4,9204930
5	8	12,5	20,10	251,25	93	2,01	2	1,290323	0,554	25	102230	5,1356123
6	8	15	20,15	302,25	77	2,02	2	1,558442	0,559	25	102230	5,1561342
7	8	20	20,25	405,00	57	2,03	2	2,105263	0,560	25	102230	5,1981806
8	8	25	20,40	510,00	44	2,04	2	2,727273	0,576	25	102230	5,3475937
9	8	30	20,60	618,00	38	2,06	2	3,157895	0,551	25	102230	5,1098620

Резултатите от изчисленията на Фарадеевата ефективност и коефициента на полезно действие, изразен чрез **MMW**, са изобразени графично на фиг.1 и фиг.2.

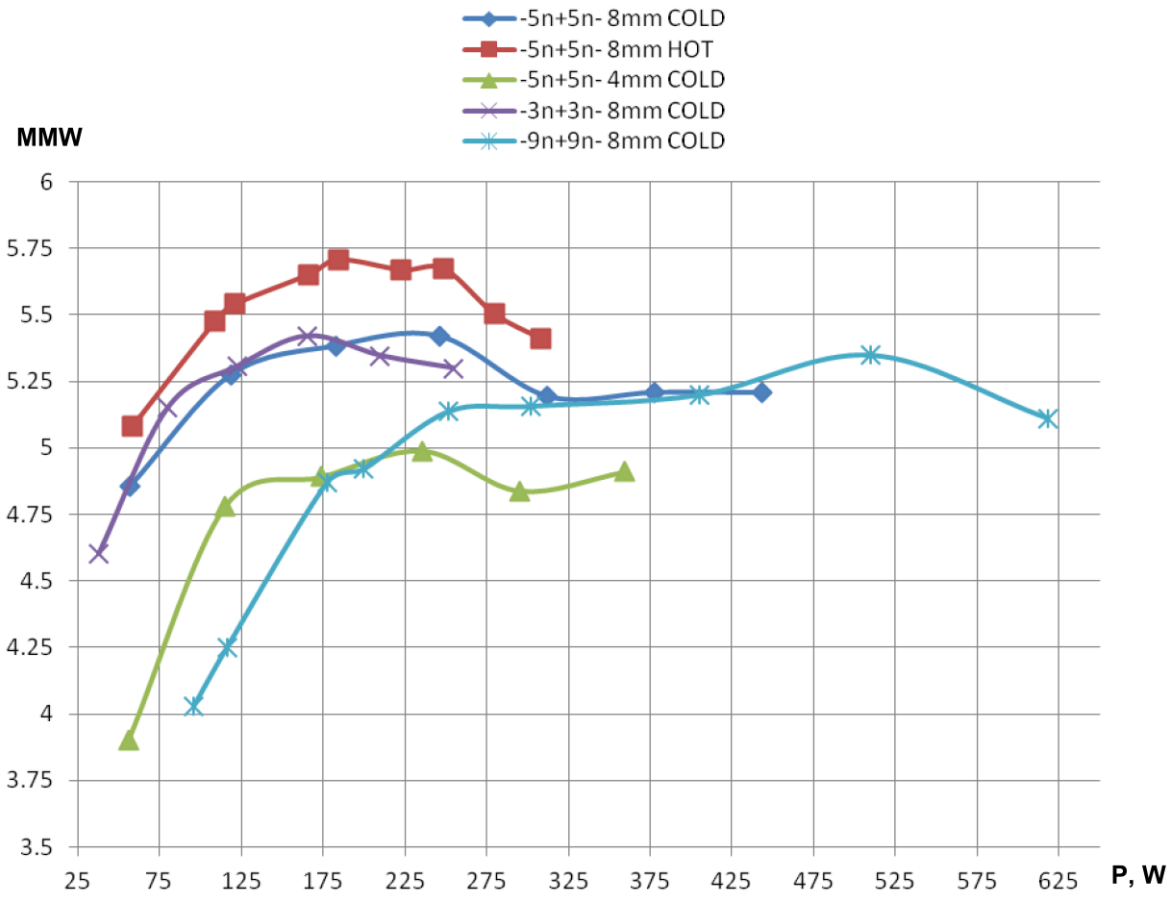
5. АНАЛИЗ, ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Анализът на данните от проведените експерименти с опитните постановки, представени в таблици 2÷5, показва следните по-съществени ефекти:



Фиг.1. Фарадеева ефективност на генератори на „Браунов газ" с различни конструкции и температурни режими на работа при ток I = 20 A

Bubbler – електролизер; Water tank – резервоар за електролит; COLD – студен; HOT – загрят



Фиг.2. Диаграми на к.п.д. (MMW) за изследваните генератори на „Браунов газ" с различни конструкции и температурни режими на работа

- Ефективността на генератора за „Браунов газ" не се нарушава с увеличаване на електрическите загуби, проявени под формата на топлина, защото повишаването на температурата от своя страна води до намаляване общото съпротивление на генератора, а оттам процесът се осъществява при по-ниско напрежение на една клетка.
- Когато през HHO генератора протича ток с една и съща големина, а напрежението на е клетката е по-малко се повишава Фарадеевата ефективност.
- При едно и също напрежение на клетка и определен по стойност работен ток, ефективността на генераторите за „Браунов газ" не зависи от броя им, а определя само с каква мощност те ще работят. С нарастване броя на клетките в даден генератор се увеличава електрическата мощност на входа му и количеството HHO газ добиван за единица време.

Като извод от проведените експерименти с опитните постановки може да се отбележи, че коефициентът на полезно действие на генераторите за „Браунов газ" зависи от работното напрежение на клетката и проводимостта на електролита. Ефективността може да бъде повишена чрез използване на импулсно захранване. При подаването на всеки импулс се получават пренапрежения в началните моменти, като това предизвиква протичане и по-голям ток през клетката.

Като заключение от проведеното експериментално изследване може да се отбележи, че ефективният генератор за „Браунов газ” е този при който:

- Клетките са с оптимално приближени / раздалечени плочи.
- Площта на ламелите е възможно най-голяма.
- През клетките протича оптимален по големина електрически ток.
- Съпротивлението на плочите и електролитът е максимално намалено

ЛИТЕРАТУРА

[1] Браун Д., ***Генератор на Браунов газ: Проект на малък генератор***, DVD издание, Велико Търново, 2010 г.
[2] Браун Д., ***Презентация на Браунов генератор***, DVD издание, Велико Търново, 2000 г.
[3] Браун Д., ***Теория на Брауновия газ***, DVD издание, Велико Търново, 2000 г.
[4] Gesser H. D., ***Applied Chemistry: A Textbook for Engineers and Technologists***, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2002.

Автори: Иван Петров Петров, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *ivanpetrov60@abv.bg*; Георги Николаев Стойчев, инженер в служба „Електроснабдяване”, „Метрополитен” ЕАД; Георги Иванов Димитров, ас. инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *dimitrov_gd@mail.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл. ас д-р Тодор Йонов

ОПТИМИЗИРАНИ ТЯГОВИ ЗАДВИЖВАНИЯ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТРАНСПОРТНИ СРЕДСТВА

Иван Петров

Резюме: *Избрани са тягови електрозадвижвания за градски тролейбусен и трамваен транспорт, метрополитен и железопътен транспорт. С помощта на универсални теглителни и к.п.д. характеристики и избрано еквивалентно междуспирково разстояние, са направени сравнителни тягови енергетични изчисления по критерии с еднакво времепътуване и еднаква максимална скорост. Получените резултати могат да се използват при избор на нови тягови задвижвания за електрически транспортни средства.*

Ключови думи: *Електрически транспорт, трамваи, тролейбуси, метрополитен, тягови електрозадвижвания*

OPTIMISED TRACTION DRIVES OF ELECTRIC VEHICLES

Ivan Petrov

Abstract: *The work presents the choice of traction electric drives for city trolley and tram transport, metro and railway transport. With universal traction and efficiency characteristics and selected equivalent station distance made comparative traction power engineering calculations with the same criteria - equal time and equal maximum travel speed. The results can be used when selecting a new traction drives for electric vehicles*

Keywords: *electric transport, trams, trolley, metro, traction power*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

От съществена важност е избор на електрически транспортни средства (ЕТС) при извършване на пътнически и товарни превози. Особено влияние оказва енергетичният разход на себестойността на превозите в условията на растящата стойност на електрическата енергия. Ето защо направата на сравнителен енергетичен анализ на тягови задвижвания е необходимо условие при избор на тягов състав с ниска експлоатационна себестойност на превоз.

Известно е, че един от основните критерии е относителният енергетичен разход за единица продукция. Той обхваща експлоатационната дейност на превозното средство и като единствен обективен параметър за енергетична ефективност, работата му е затруднена. Следователно за да е приложима системата от критерии е необходимо да се отчете влиянието на следните фактори:

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

- Еднакво времепътуване;
- Еднаква максимална скорост на движение;
- Еднаква мощност на транспортните средства;
- Еднакво изминато разстояние;
- Напрежение в контактната мрежа;
- Профил на участъка.

При извършване на сравнителни тягови енергетични изчисления за ЕТС най-целесъобразен начин е използване на критериите по еднакво времепътуване и по еднаква максимална скорост.

1. ПАРАМЕТРИ НА ОПТИМИЗАЦИЯТА

Целта на изследването е създаване на физико-математически модел и методика за провеждане на сравнителен анализ на тягови задвижвания на ЕТС. Методологическият подход за постигането й се изразява в следното:

- Избор на състав на транспортното средство;
- Създаване на универсални теглителни и к.п.д. характеристики;
- Избор на еквивалентно междуспирково разстояние - градски транспорт, Софийски метрополитен, железопътен транспорт;
- Основно съпротивление на движение за транспортните средства;
- Избор на тип електрозадвижвания - постояннотоково, асинхронно, синхронно задвижване
- Избор на закони за регулиране на електрозадвижванията;
- Избор на критерии за сравнение - еднакво времепътуване и еднаква максимална скорост;
- Създаване на четирифазна траектория за движение с еднократно използване на тяга.

2. ЧИСЛЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

За реализиране на оптимизационната задача е твърде удобно да се използват универсални характеристики. В практиката обикновено се използват универсални характеристики по часови (номинални) величини. Това обаче води до значителна точност само за избраната часова (номинална величина). Ето защо използването на метода по максимални стойности (метод на Находкин) и след това доусъвършестван у нас в НИТИЖ и ВТУ „Тодор Каблешков” [1] позволява да се постигне една твърде добра точност в целия работен диапазон на тяговото задвижване. Същността на метода се състой в следното. За създаване на универсални скоростни характеристики се използва скоростната характеристика на постояннотоковият двигател и се построява неговата магнитна характеристика като се отчете условието:

$$\frac{1}{V} \equiv \zeta \equiv \frac{c\Phi}{Ud - I.\sum r} \qquad (1)$$

където:

V е скорост на движение на ЕТС, км/ч;

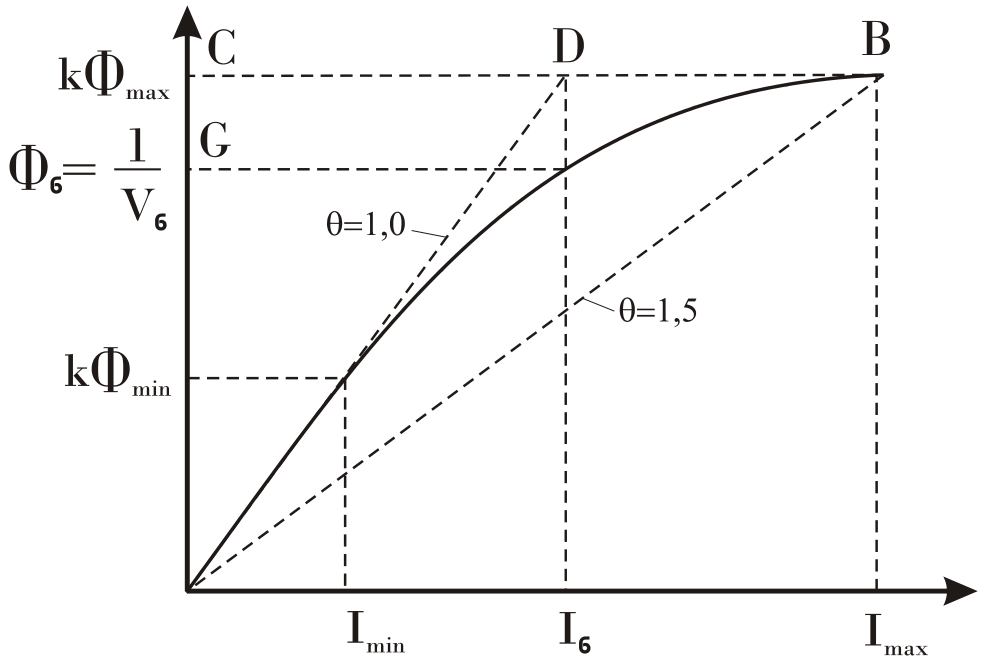
c – конструктивна константа ;
Φ – магнитен поток, ;
U_d – напрежение, подавано към постояннотоковия двигател, V.

Тъй като влиянието на пада на напрежението $I.\Sigma r$, както и изменението на напрежението на двигателя U_d върху скоростта V е сравнително малко, с определена точност се построява магнитната характеристика на двигателя при максимален магнитен поток.

За да се построи универсална магнитна (скоростна) характеристика е необходимо да се определят базовият магнитен поток $\Phi_б$ и базовият ток $I_б$ на двигателя (фиг.1).

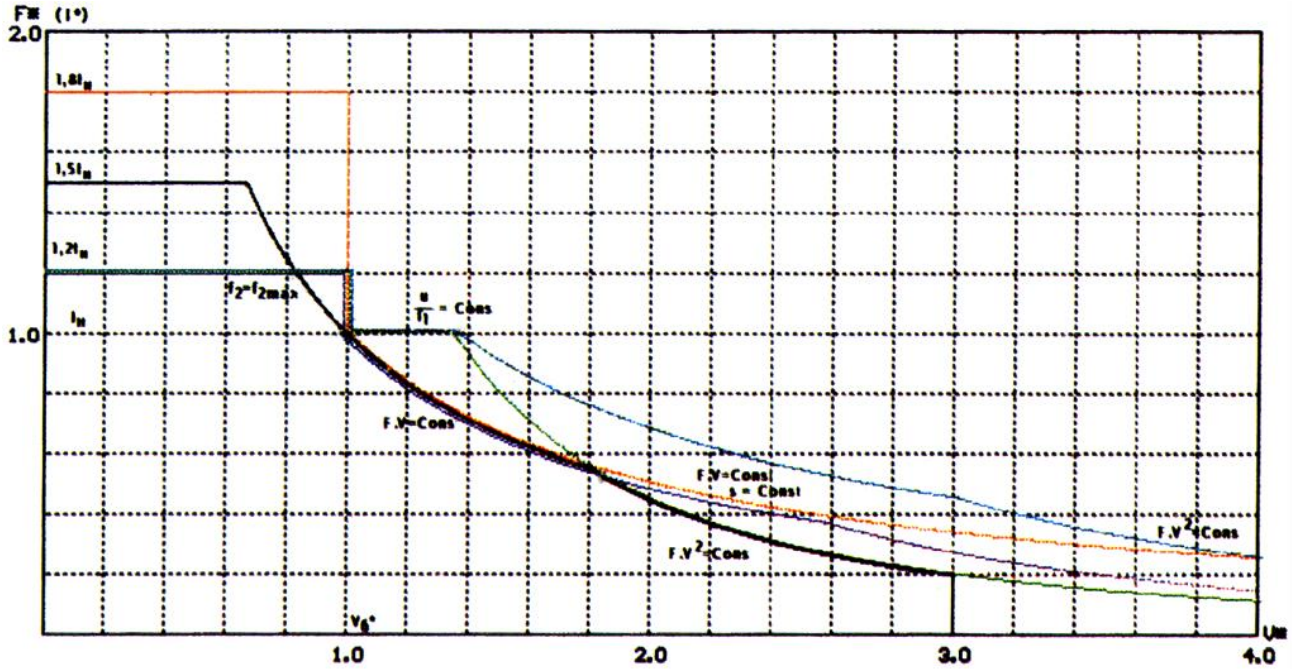
За целта е необходимо да се определят коефициентите $C_ф = \Phi_{max}/\Phi_{min}$, който отчита диапазона на насищане на двигателя и $C_I = I_{max}/I_{min}$, отчитащ изменението на тока.

Отношението между двата коефициента определят коефициента на насищане на двигателя $Q = 1/(C_I . C_ф)$. След направено теоретично изследване, най-често за двигатели със серийно възбуждане коефициента на характеристиката Q се изменя в границите 1.0÷1.5.



Фиг.1. Базов магнитен поток $\Phi_б$ и базов ток $I_б$ на двигателя

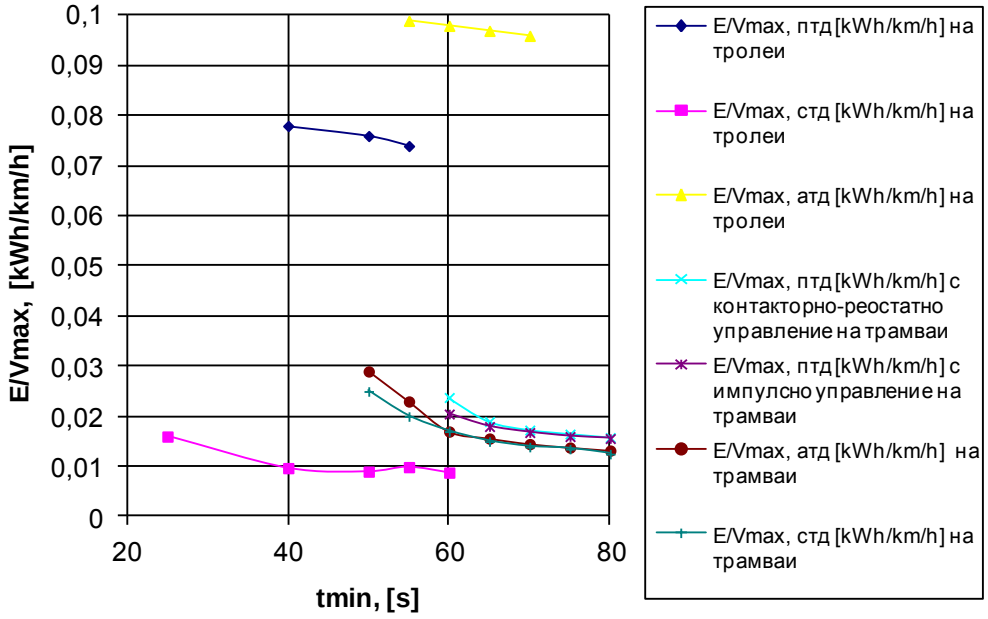
Чрез използване на базови стойности на теглителната сила $F_б$ и скоростта $V_б$ се построява универсалната теглителна характеристика (фиг.2).
За преминаване към действителните характеристики е необходимо да се изберат стойностите на теглителната сила и скоростта на движение.



Фиг.2. Универсални теглителни характеристики

3. ГРАДСКИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТРАНСПОРТНИ СРЕДСТВА

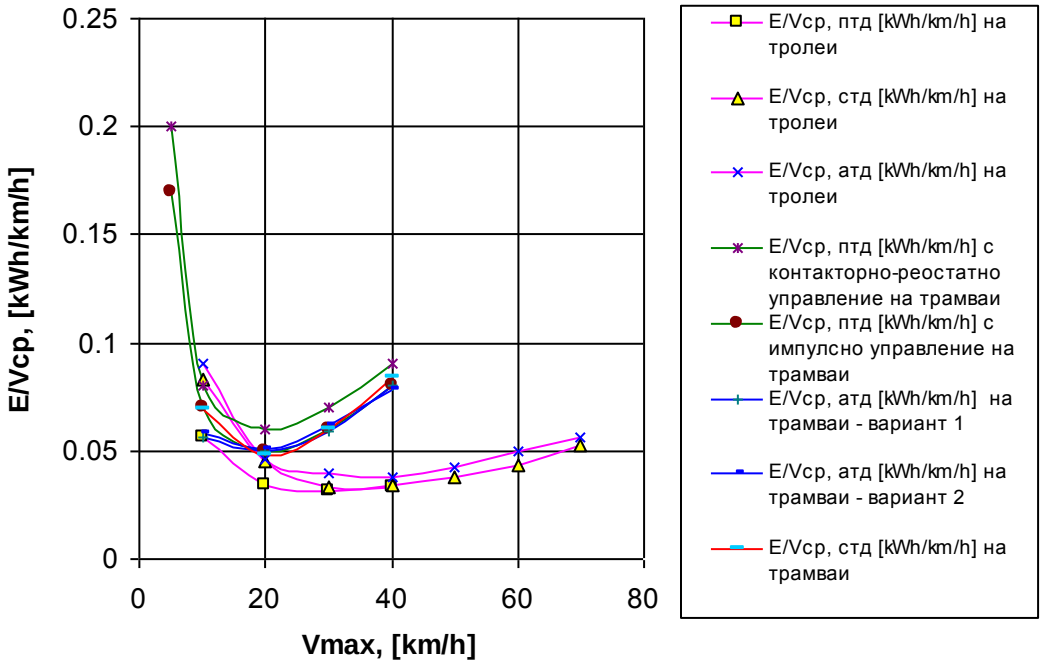
Числените експерименти за градски електрически транспортни средства (ГЕТС) [2, 3] са проведени по критерии за еднакво времепътуване и еднаква максимална скорост, съответно за къси междуспиркови разстояния (при трамваите ***S* = 270÷400 m**) и дълги (***S* = 400÷600 m** за тролейбусите в София), определени на базата на средно статистическа обработка на профила на пътя за гр. София. Тяговите енергетични изчисления са проведени за номинална мощност на тяговите електрозадвижвания ***P* = 100, 150 и 200 kW**.



Фиг.3. По еднакво времепътуване при градски ЕТС

На фиг.3 е показана характеристиката по критерия за еднакво времепътуване. От нея се вижда, че при тролейбусния транспорт времепътуването е най-малко и разходът на електрическа енергия е най-малък. Енергийно ефективно задвижване е синхронното, характеризиращо се с максимално ускорение, което води до по-продължително време за движение по инерция. С по-голям разход на енергия е асинхронното задвижване, тъй като непрекъснато е в режим на автоматична характеристика.

Характеристиката по критерия за еднаква максимална скорост е показана на фиг.4. Оптималният енергиен разход на трамвайния транспорт е при около 20 km/h, а при тролейбусния тази скорост е около 40 km/h. Това се обяснява с ниската скорост, поради късите междуспиркови разстояния. Най-енергийно ефективно и при двете транспортни средства е постояннотоковото задвижване с импулсно регулиране скоростта на движение.



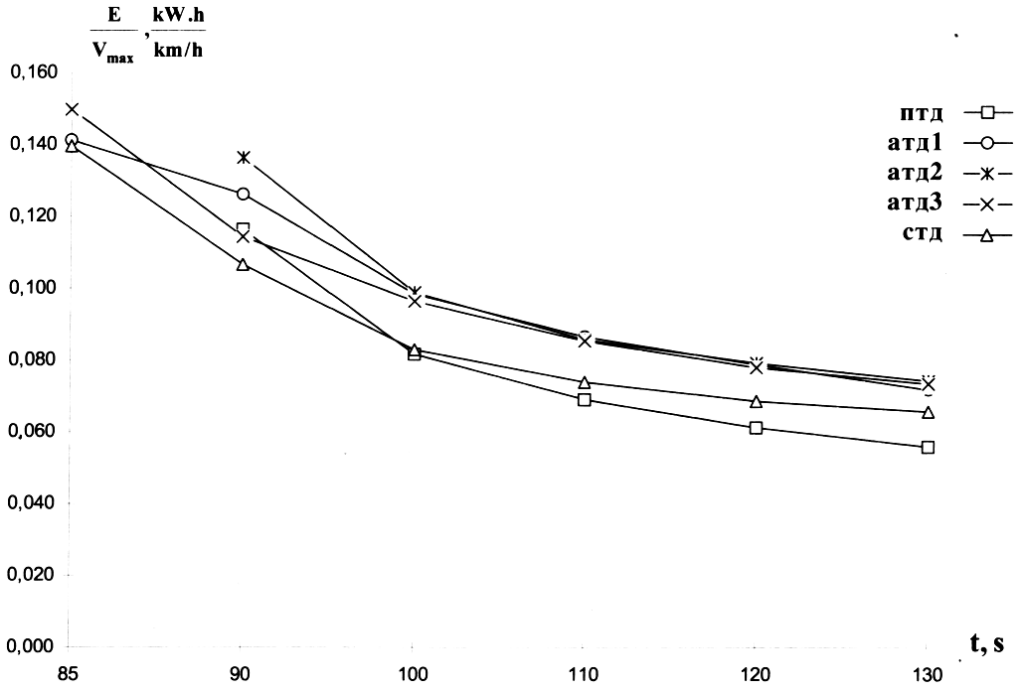
Фиг.4. По еднаква максимална скорост при градски ЕТС

4. СОФИЙСКИ МЕТРОПОЛИТЕН

Резултатите от числения експеримент [4] са получени по оптимизационни критерии за еднаквовремепътуване и еднаква максимална скорост при следните параметри:

- Еквивалентно междуспирково разстояние S = **1200 m**, което обхваща първия метродиаметър на гр. София;
- Номинална мощност P =**100, 150 и 200 kW**;
- Контакторно и импулсно управление на постояннотокови двигатели;
- Асинхронно задвижване;
- Синхронно задвижване.

На фиг.5 в графичен вид са показани числените резултати, получени по критерия за еднакво времепътуване. Показана е зависимостта на относителния разход на електрическа енергия E/V_{max} в зависимост от времепътуването t. Установява се, че при големите времепътувания, постояннотоковото задвижване се характеризира с нисък разход на енергия.



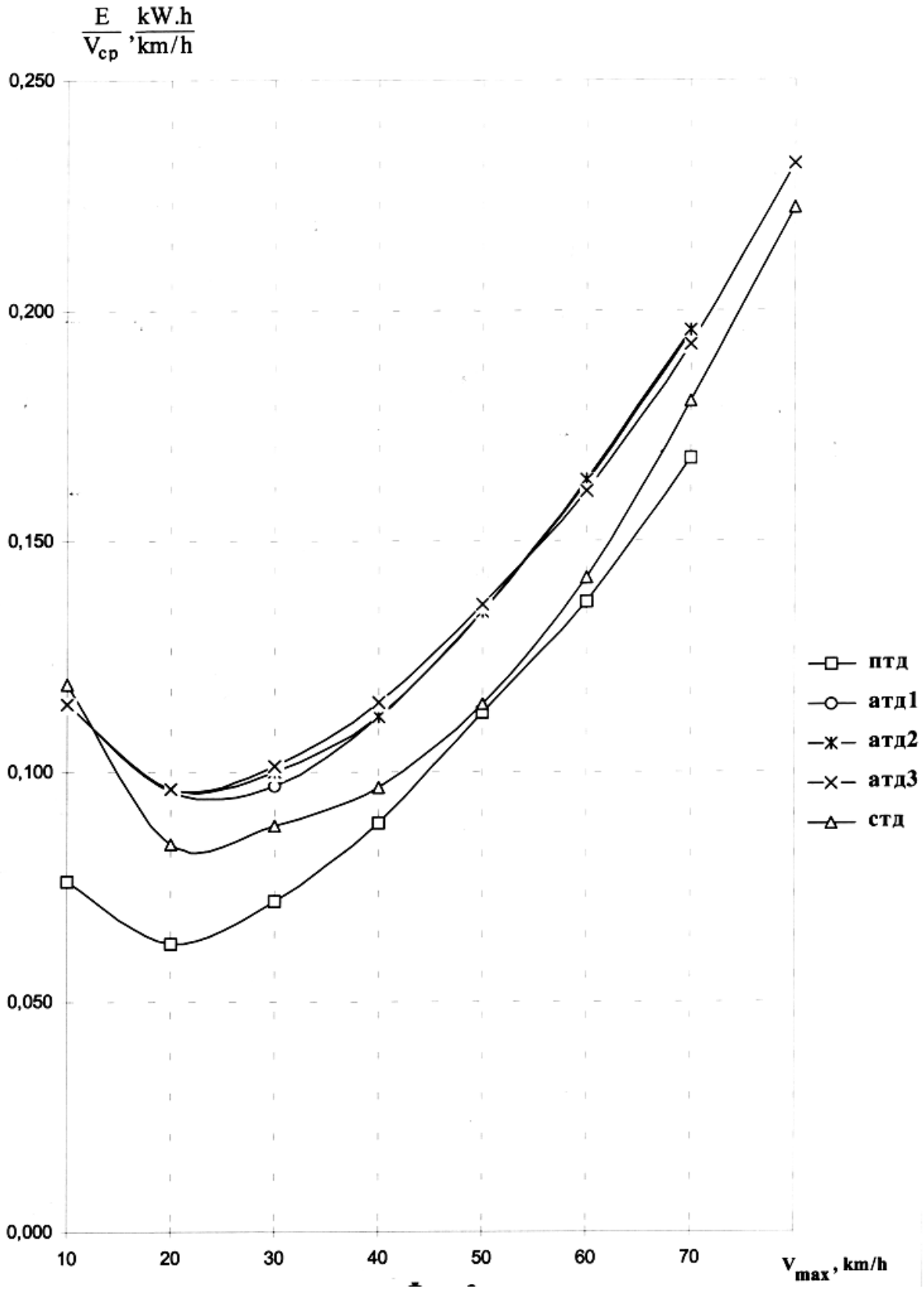
Фиг.5. По еднакво времепътуване при Софийски метрополитен

На фиг.6 са изобразени резултатите от втория оптимизационнен критерии. Минимален разход на енергия E/V_{cp} се получава при постояннотоковото задвижване при скорости до 80 km/h, които са характерни за метрополитена. При повисоки скорости оптимален разход е реализирал синхронното задвижване.

5. ЖЕЛЕЗОПЪТЕН ТРАНСПОРТ – ПЪТНИЧЕСКО, ТОВАРНО И ВИСОКОСКОРОСТНО ДВИЖЕНИЕ

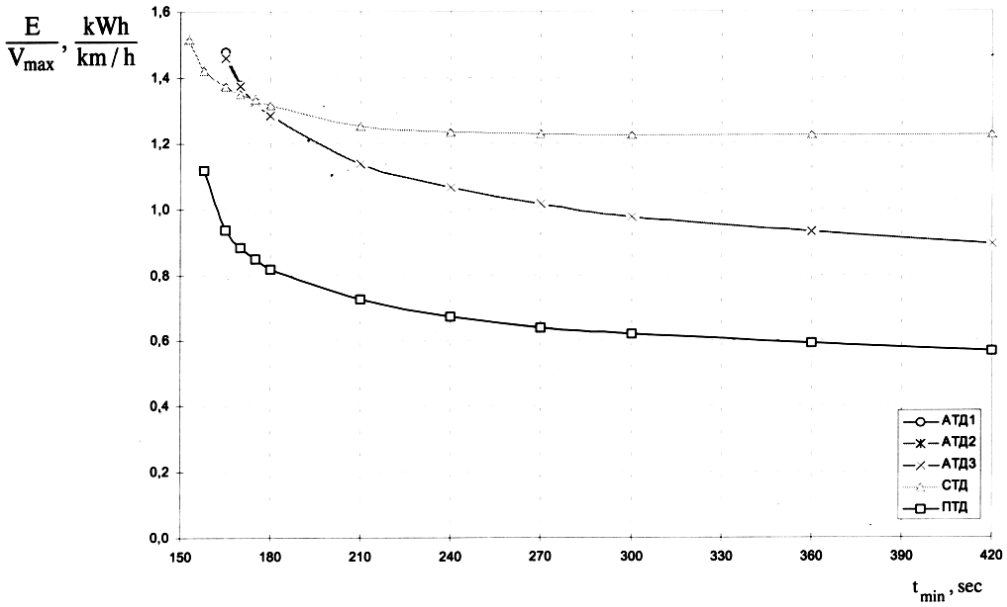
Проведените числени експерименти [5] обхващат еквивалентни междугария с дължина S **= 3 km** и S **= 30 km** за пътническо и товарно движение и S **= 30 km** за висикоскоростно движение на състав с олекотена конструкция и ниско основно съпротивление на движение. Разгледани са два варианта по мощност – съответно **5000 kW** и **9000 kW** за висикоскоростно движение. Числените експерименти са извършени по критерии за еднакво времепътуване и еднаква максимална скорост.

На фиг.7 са показани графично резултатите по еднакво времепътуване. При пътническо и товарно движение (фиг.8) с еквиванентно междугарие с разстояние S **= 3 km** оптимално е постояннотоковото задвижване. При нарастване дължината на **S = 30 km** оптимално е синхронното задвижване .

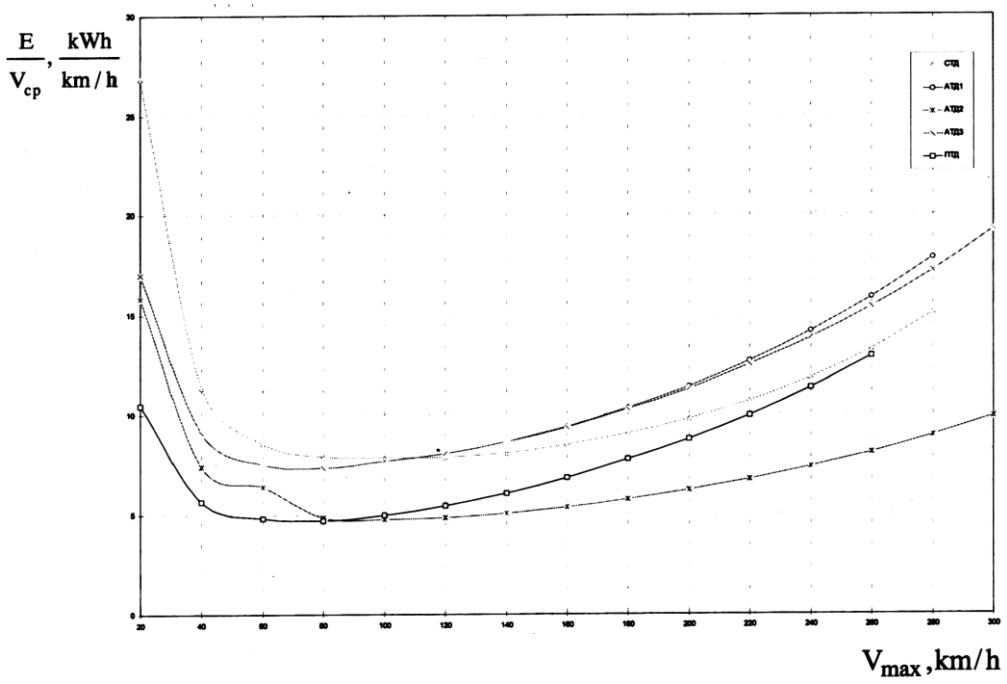


Фиг.6. По еднаква максимална скорост при Софийски метрополитен

При високоскоростно пътническо и товарно движение (фиг.9) в еквивалентно междугарие с дължина ***S* = 30 km** оптимално електрозадвижване е асинхронното задвижване при втория закон за управление (векторно управление).



Фиг.7. По еднакво времепътуване при пътническо движение

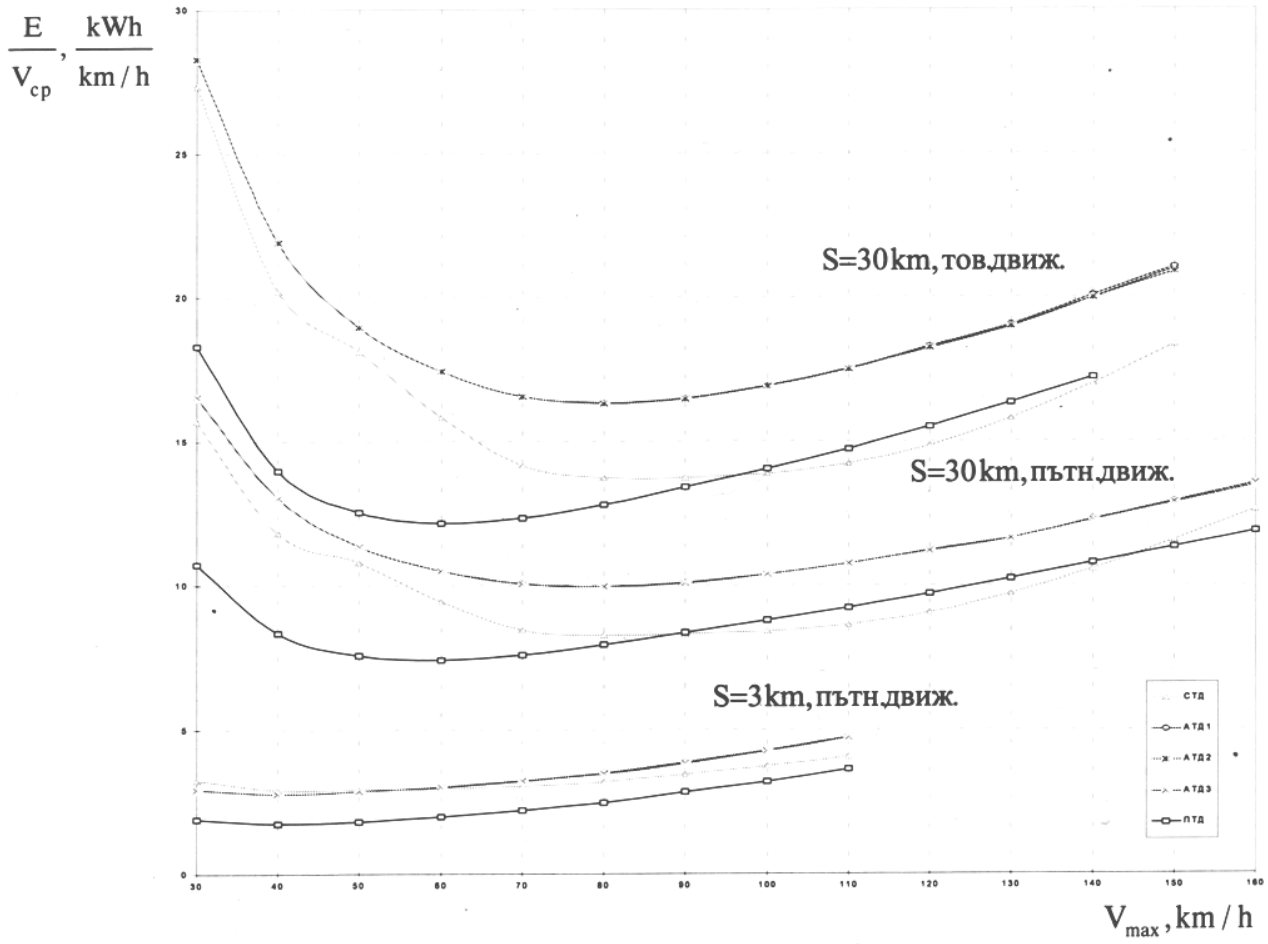


Фиг.8. По еднаква максимална скорост – товарно движение

5. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

От проведеното изследване могат да се направят следните изводи:

- За градски транспортни средства, при които скоростта на движение е 50 km/h енергийно ефективно е постояннотоковото задвижване с импулсно регулиране;
- За Софийския метрополитен, при който максималната скорост на движение на влаковете е 90 km/h и еквивалентни междуспиркови разстояния (за първия метродиаметър – 1200 m а за втория и третия 1000 m) енергоефективно е постояннотоковото задвижване с импулсно регулиране;



Фиг.9. По еднаква максимална скорост при високоскоростно движение

- При железопътният транспорт за пътническо и товарно движение при скорости над 130 км/ч енергийно-ефективно е асинхронното задвижване;
- При железопътният транспорт за високоскоростно движение при скорости над 160 км/ч енергийно-ефективно е асинхронното задвижване.

В заключение от направените числени експерименти трябва да се отбележи, че с повишаване на скоростите на движение и нарастване на дължината на междуспирковите разстояния е необходимо да се подменят електрическите транспортни средства с асинхронни задвижвания.

За съжаление тази тенденция не се наблюдава при изграждащите се метролинии на Софийското метро. Като например втория и трети метро диаметър са с дължина на междуспирковите разстояния на 1000 м и с това се намалява и средната скорост на движение.

Ново закупените транспортни средства са с асинхронно задвижване което е с по-висок разход на електроенергия. Трябва да се отбележи, че изследването обхваща само експлоатационните показатели.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Попов Р., Петров И., ***Построяване на универсални теглителни характеристики за електрически подвижен състав,*** Научно-техническа сесия с международно участие, 25-26. Октомври, 1990 г.
[2] Петров И., Н. Ненов., ***Енергетичен сравнителен анализ на тягови електрозадвижвания за градски релсов транспорт с постояннотокови двигатели,*** Дванадесета научна конференция с международно участие „Транспорт 2002”, 14-15 ноември 2002 г., София.
[3] Петров И., Н. Ненов., ***Енергетичен сравнителен анализ на тягови електрозадвижвания за градски тролейбусен транспорт***, Дванадесета научна конференция с международно участие „Транспорт 2002”, 14-15 ноември 2002 г., София.
[4] Попов Р., Н. Ненов., Петров И., ***Оптимизирани задвижвания за тягов подвижен състав за метрополитен,*** сп. Железопътен транспорт, кн. 5, 1998 г.
[5] Попов Р., Н. Ненов., Петров И., ***Оптимизирани тягови задвижвания за магистрално и високоскоростно движение,*** сп. Железопътен транспорт, кн. 9, 1998 г.

Автор: Иван Петров Петров, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *ivanpetrov60@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл. ас. д-р Иван Ангелов

ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗГРАЖДАНЕ НА ТОВАРНО УСТРОЙСТВО ЗА КОНВЕНИОНАЛНИ И ЦИФРОВИ РЕЛЕЙНИ ЗАЩИТИ

Георги Павлов, Тодор Лалев, Явор Исаев, Любомир Секулов, Мартина Томчева

Резюме: *В лаборатория „Релейни защити и измервателна техника" към катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта" във ВТУ „Тодор Каблешков" са проектирани и изработени няколко лабораторни стенда за изследване на конвенционални и цифрови релейни защити (ЦРЗ), експлоатирани в тяговата енергозахранваща система (ТЕС) за постоянен и еднофазен променлив ток 25kV, 50Hz. Разработен е цикъл от лабораторни упражнения, целящ обучението на студентите в тази област.*
За да се изпитват и изследват основните параметри на ЦРЗ в различни режими на работа е проектирано и изработено цифрово аналогово товарно устройство. В доклада е показана част от силовата и управляваща системи на устройството и неговите функционални възможности. Тази разработка дава възможност за цялостното асемблиране на една съвременна лаборатория за изследване, моделиране и изпитване на релейни защити във ВТУ.
Ключови думи: *конвенционални и цифрови релейни защити, цифрово товарно устройство, микропроцесорно управление, електрически транспорт*

DESIGN AND BUILDING LOAD DEVICE FOR CONVENTIONAL AND DIGITAL RELAY PROTECTION SYSTEM

Georgi Pavlov, Todor Lalev, Iavor Isaev, Lubomir Sekulov, Martina Tomcheva

Abstract: *The Laboratory for Relay Protection and Measurement Equipment at the Transport Power Supply and Equipment Department of the Todor Kableshkov Higher School of Transport has designed and created several test facilities for testing convection and digital relay protection systems, which operate within the DC and AC single phase traction power supply at 25kV, 50Hz. A cycle of laboratory exercises has been developed to ensure student training possibilities.*
To test and examine the key parameters of the digital relay protection system in its various modes, a digital analogue traction device has been designed. The current report presents, in part, the high-power and control systems of the device and its functionalities. This study provides the fundamentals for the overall assembling of a high-end survey, modelling and testing laboratory for relay protection systems within the Higher School of Transport.
Key words: *convention and digital relay protection, digital traction device, microprocessor control, electric transport*

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните цифрови релейни защити представляват сложен комплекс от хардуерни и софтуерни устройства, реализиращи многофункционална система от защитни параметри. Те най-често са оборудвани с 16-битов микропроцесор, който извършва цифрова обработка на широк спектър задачи, от възприемане и анализиране на измерваните величини и стойности, до издаване на команди за изключване на прекъсвача. Тези интелигентни защитни системи позволяват прецизна настройка (параметризиране) в зависимост от необходимостта на защитаваният обект. Стабилността на ТЕС зависи от правилното функциониране на релейната защита и нейните възможности да взема бързи решения. Неправилното заработване може да доведе до тежки аварийни преходни процеси. За да се предвиди функционирането на релейната защита в реални условия и при въздействието на различни смущаващи фактори, тя се подлага на изпитания с помощта на товарни устройства, които възпроизвеждат различни режими на работа на ТЕС[1]. Имайки предвид сложността на тези системи от една страна и от друга спецификата на професионалното обучение, което дава катедра „ЕЕТ” в областта на електрическият транспорт, се изисква не само добро и осъвременено теоретично обучение, но и засилено практическо обучение с конкретна специфична насоченост. То трябва да бъде съобразено със съвременната техническа обезпеченост в тази сфера.

В новоизградената лаборатория „Релейни защити и измервателна техника” към момента са реализирани, както релейни защити (РЗ) с релета от конвенционален тип, така и два стенда с цифрови релейни защити (ЦРЗ) от типа ADR219A и ADR213A, дарени от индийската фирма „ASHIDA”. В лабораторията са инсталирани два мощностни прекъсвача (триполюсен вакуумен и БДП), дарени от „Метрополитен” ЕАД. За да се изпитват и изследват основните параметри на РЗ и ЦРЗ в различни режими на работа се проектира и изгради цифрово-аналогово товарно устройство. Актуалността на тази разработка е свързана с цялостно асемблиране на една съвременна лаборатория за изследване, моделиране и изпитване на релейни защити във ВТУ. Чрез товарното устройство се създава възможност за адекватно и ефективно хардуерно симулиране в лабораторни условия на основните работни и аварийни режими на ТЕС. Също така чрез провеждането на тези изследвания може да се прави оценка на работните характеристики РЗ и ЦРЗ, използвани в електрическият транспорт в реални лабораторни условия [1,2].

2. ФУНКЦИИ И ПАРАМЕТРИ НА ИЗГРАДЕНИТЕ В ЛАБОРАТОРИЯ „РЕЛЕЙНИ ЗАЩИТИ И ИЗМЕРВАТЕЛНА ТЕХНИКА” ЦРЗ И ЗАЩИТИ ОТ КОНВЕКЦИОНАЛЕН ТИП. ТОВАРНИ УСТРОЙСТВА – ИЗИСКВАНИЯ, ПАРАМЕТРИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1. ФУНКЦИИ И ПАРАМЕТРИ НА ИЗГРАДЕНИТЕ В ЛАБОРАТОРИЯ „РЕЛЕЙНИ ЗАЩИТИ И ИЗМЕРВАТЕЛНА ТЕХНИКА” ЦРЗ И ЗАЩИТИ ОТ КОНВЕКЦИОНАЛЕН ТИП

Подробно описание на основните функции ЦРЗ изградени като изследователски стендове е направено в предшестваща публикация, поради това в настоящата разработка тези функции ще бъдат само споменати.

2.1.1. ОСНОВНИ ЗАЩИТНИ ФУНКЦИИ НА ADR 213B

Основното предназначение на ЦРЗ ADR213B е комплексна защита на тягови подстанционни трансформатори (ТПТ), захранващи тягови мрежи за еднофазен променлив ток 25kV, 50Hz. Тя изпълнява следните функции:

- диференциална защита;
- максималнотокова защита (токова отсечка);
- защита от термично претоварване;
- корпусна защита;
- сигнализация за намалено ниво на маслото;
- “Бухолц” – двустепенна защита сигнализация/прекъсвач;
- сигнализация/прекъсвач за прегряване на маслото;
- сигнализация/прекъсвач за прегряване на намотка;
- мониторингови функции.

2.1.2. ОСНОВНИ ЗАЩИТНИ ФУНКЦИИ НА ADR 219A

Основното предназначение на ЦРЗ ADR219A е комплексна фидерна защита за тягови мрежи за еднофазен променлив ток 25kV, 50Hz. Тя има следните защитни функции:[4]

- дистанционна защита;
- максималнотокова защита (с опция за настройка за времезакъснение);
- защита от претоварване;
- защита от повреда на фидерен прекъсвач;
- минимално и максимално напреженови защити;

На фиг.1 е показан общият вид на двата стенда.

Фиг.1. Общ вид на изработените симулатори за изследване на ЦРЗ

Изградена е подходяща за целите на изследването метална конструкция, позволяваща оптимален и достъпен монтаж и присъединяване на всички конструктивни и електрически компоненти на симулатора [3].

2.1.3. ОБЩ ВИД, ПАРАМЕТРИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА КОНВЕКЦИОНАЛНИ РЗ

Изграденият стенд за изпитване на конвенционални релета, използвани в Столичния Метрополитен дава възможност за запознаване с особеностите, структурата, основните параметри и характеристиките на тези релета. Стендът включва следните релета:

- максималнотоково реле - тип РТ-40/50 УХЛ4;
- максималнотоково реле - тип РТ-40/2 УХЛ4;
- помощно реле със забавено действие при изключване-тип РП-252 УХЛ4;
- помощно реле - тип РП-23 УХЛ4;
- реле за време - тип ЭВ–122;
- реле за време - тип РВ-13 УХЛ4.

2.2. ТОВАРНИ УСТРОЙСТВА - ИЗИСКВАНИЯ, ПАРАМЕТРИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

В разглеждания случай товарното устройство (ТУ) се проектира и изгражда за изпитване на еднофазни РЗ използвани в железопътният транспорт (описани в т. 2 от настоящият доклад), но на практика с него могат да се изпитват и трифазни РЗ - фаза по фаза.

То трябва да генерира монофазна, синусоидална система от ток и напрежение, която се подават към изпитваната апаратура (РЗ). Параметрите на напреженовите и токовите сигнали могат да се задават индиректно със задаване стойности на производни величини - мощност и импеданс. Необходимо е амплитудата, фазовия ъгъл и честотата на всяка от величините да могат да се променят плавно, със стъпка или с предварително зададена скорост на изменение.

По време на генериране на желаните аналогови сигнали, операторът (студентът) да има възможност за текуща промяна на параметрите им или промяна в съответствие с предварително дефинирано задание за работа - програмен сегмент.

Заработването или възвръщането на цифров вход да предизвиква запис в паметта на устройството, т. нар. вграден Регистър на събития. Събитието включва стойностите на всички следени аналогови величини и техните параметри, както и момента на записа [1,2].

За тази цел са необходими следните регулируеми изходни токови и напреженови вериги:

1. Токовите изходни вериги трябва да бъдат плавно регулируеми за синусоидален ток от 0 до 80 А в три обхвата 0 ÷ 10А; 0 ÷ 30А; 0 ÷ 80А;
2. Напреженовите изходни вериги да позволяват плавно регулиране на синусоидално напрежение от 0 до 250 V, AC и DC.

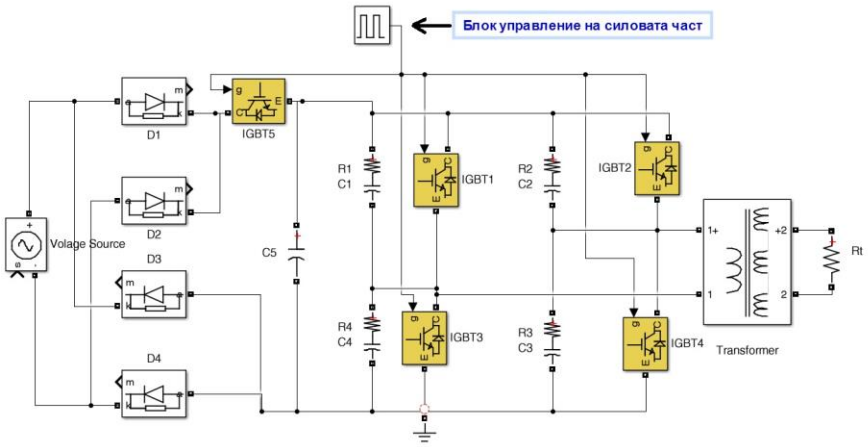
Също така чрез подходящ бутон на ТУ трябва да се реализира дефазиране на желан ъгъл на тока от напрежението и регулиране на честотата от 45 до 65 Hz при реализиране на синусоидален режим.

При изграждането и проектирането на ТУ е необходимо да се предвидят и изходи предназначени за следене на положението на контактите на изпитваните релета. Освен това в ТУ трябва да бъде интегриран таймер предназначен за измерване на времеви интервали.

Целта е да могат да се провеждат различни изпитания - статични и динамични с помощта на ТУ за проверка и настройка на релейна защита, автоматика и телемеханика.

3. ПРОЕКТИРАНЕ НА ТОВАРНО УСТРОЙСТВО. ОПИСАНИЕ НА СИЛОВИТЕ И УПРАВЛЯВАЩИТЕ ВЕРИГИ. ФУНКЦИИ, ПАРАМЕТРИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

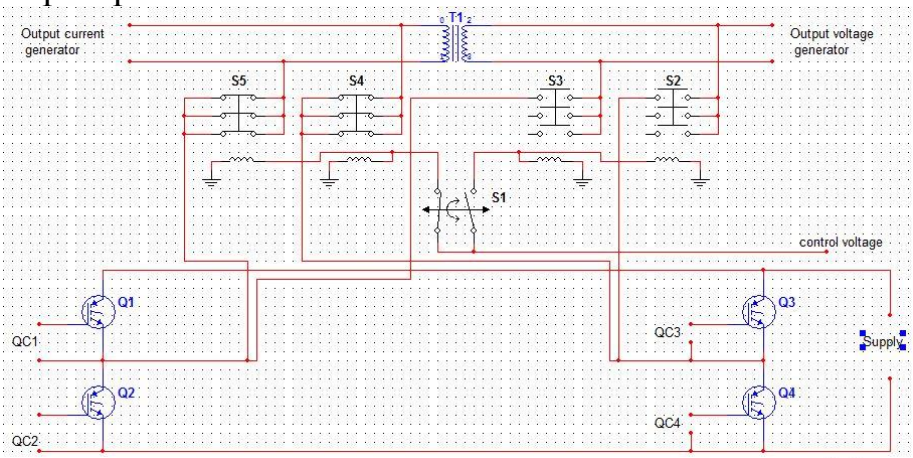
Проектирането на ТУ е направено съобразно дефинираните изисквания в раздел 2.2. Силовата схема на товарното устройство, показана на фиг.2. Тя е изпълнена по класическата двураменна схема с четири ключови елемента, в конкретния случай IGBT транзистори, с вградени обратни диоди. В общата точка на двете рамена е присъединен импулсен трансформатор с една първична и една вторична намотки.



Фиг.2. Силова схема на товарното устройство

Монофазното мрежово напрежението се изправя посредством диодите D1÷D4 и се изглажда с кондензатора C5. След установяване на напрежението се включва блокът за управление.

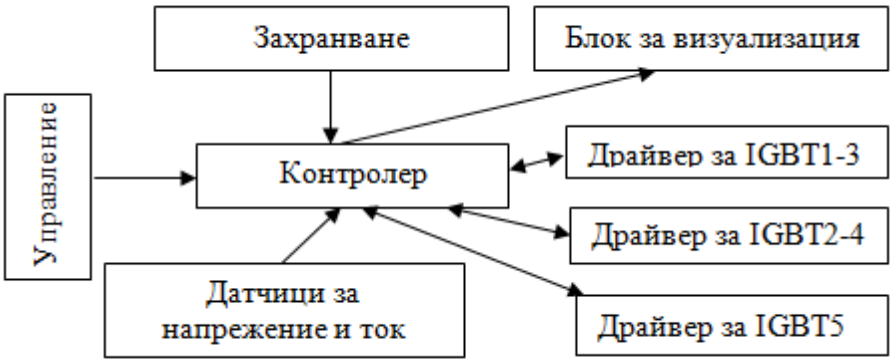
На фиг.3 е показана схема на комутиращата част на ТУ за промяна на режима на работа на генератора.



Фиг.3. Схема на комутираща част на ТУ

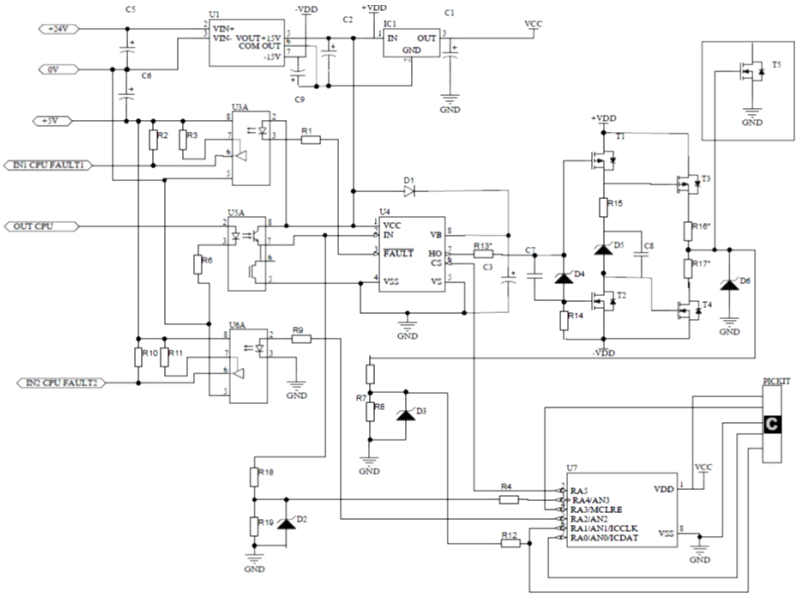
На схемата S1 е превключвател за ръчно избиране на режимите на работа на генератора; S2,S3 - контакторна група за работа на генератора в режим на източ-

ник на ток; S4,S5- контакторна група за работа на генератора в режим на източник на ток.
Блоковата схема на СУ е показана на фиг.4.



Фиг.4. Блоковата схема на СУ

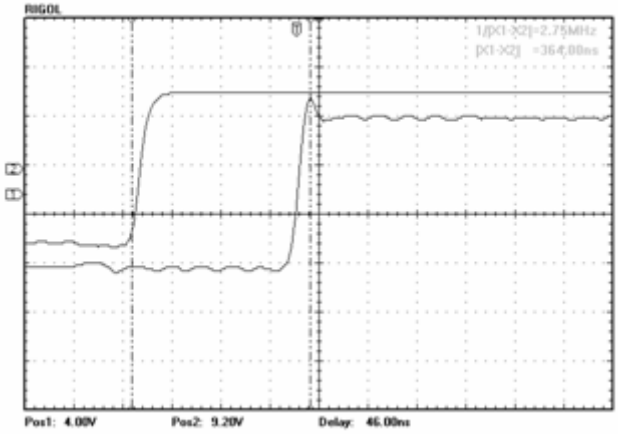
Датчикът на напрежение следи напрежението върху кондензатора C5 и подава информация на контролера за текущата му стойност. Контролерът през съответния драйвер, управлява режима на работа на транзистора IGBT5, при което изходното напрежение се регулира в граници от 0 до 100 %. Контролерът управлява транзисторите в двете рамена на инвертора по предварително зададен алгоритъм. За надеждна и устойчива работа на схемата са реализирани обратни връзки, които следят параметрите на изходните сигнали.
Принципна схема на драйверите е показана на фиг.5.



Фиг.5. Схема на драйвер

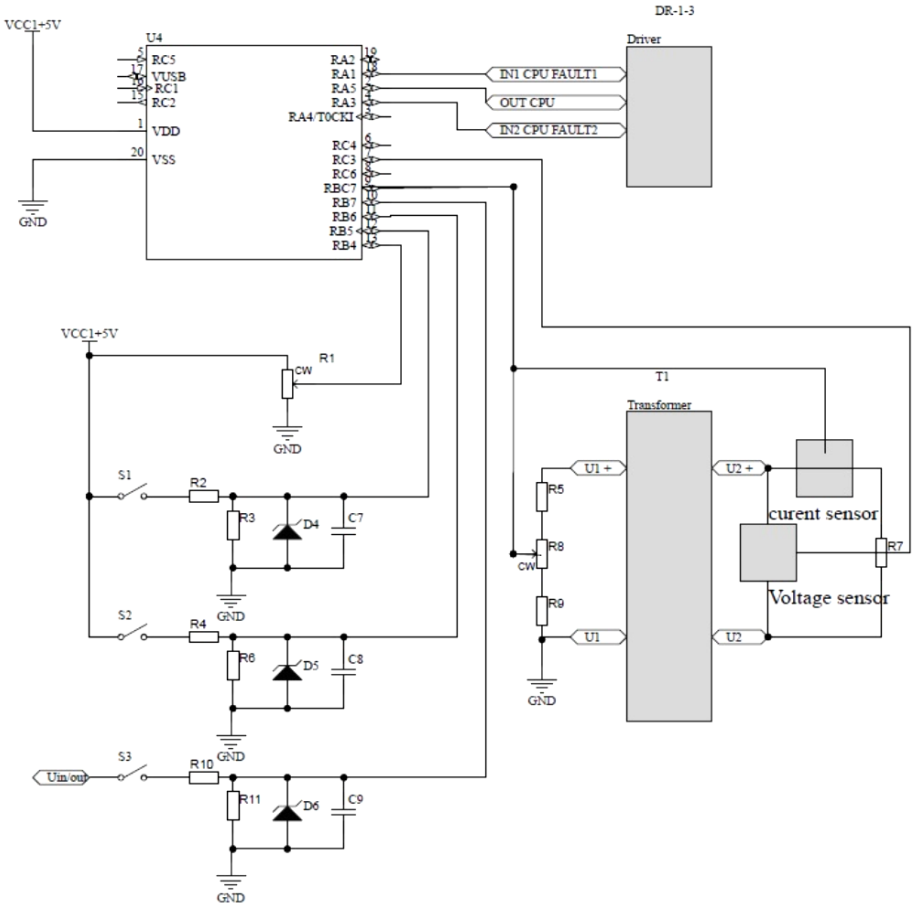
Драйверът е галванично разделен от управлението посредством оптроните U3A, U5A, U6A. Бързодействието и надеждната работа на IGBT зависят от коректният избор на оптроните. Защитата и контролът се осъществяват от микропроцесорът U7, който следи основните параметри на управляващите сигнали.
Драйверът работи с TTL сигнал. За предусилвател и защита се използва интегрална схема IR2127, която осигурява нужният ток на крайното стъпало изпъл-

нено с MOSFET транзисторите T1÷T4. Консумацията на празен ход на драйвера е под 50 mA.
Закъснението на сигнала през драйвера е под 400 ns и е показано на фиг.6.



Фиг.6. Закъснение на сигнала на драйвера

Схемата на управлението е показана на фиг.7. Превключването на обхватите става с бутоните S1,S2. Задаването на стойността на напрежението и тока става с тримера R1. Следенето на тока и напрежението на вторичната страна се осъществява с токов и напреженов трансформатор, а напрежението на първичната с делителя R5,R8 и R9. С R8 се извършва и калибриране на товарното устройство. С S3 се извършва превключването от източник на ток към източник на напрежение.



Фиг.7. Схема за управление

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитието на енергийната и транспортна техника през последните години е изключително динамично. Нови технологии се прилагат не само в силовото електрообзавеждане на ТЕС, но и в системите за управление и защита. Това изисква промяна в нивото и качеството на подготовка на кадри и определя необходимостта от създаване на квалифицирани специалисти, обучени съобразно специфичните изисквания на пазара на труда. Това изискване може да бъде постигнато само чрез изграждане на съвременна лабораторна база, отговаряща на нивото на техниката днес.

В тази връзка проектирането и изграждането, съвместно със студенти и докторанти, на АЦ товарно устройство за изследване и анализ на процесите, параметрите и характеристиките на реални цифрови защити, включващи дефинираните по-горе функции, създава възможност за изграждане на една съвременна лаборатория с многофункционално предназначение.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Вичев С., *Записки по релейна защита* (CD).

[2] Малчев К. М. (2009), *Ръководство за лабораторни упражнения по релейна защита*, С., изд.на ТУ-София, 2009.

[3] Павлов Г., В. Димитров, Т. Лалев, А. Христова, Л. Секулов, М. Томчева, *Проектиране на лабораторен симулатор за многофункционални микропроцесорни релейни защити*, Годишник на Технически Университет - София, т. 64, кн.4, 2014, ISSN 1311-0829, VI-та конференция на електротехнически факултет „ЕФ 2014“, 15-17 септември 2014 г., Созопол, България, стр.47-54

[4] *Commissioning, Operation and Maintenance Manual for Aditya Series Numerical Single Pole Tx.Differential Protection Relay Type ADR213B, ADR219A* ASHIDA Electronics Pvt. Ltd., 2009

Автори: Георги Митков Павлов, проф. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков“-София, E-mail address: *g_pavlov61@abv.bg;* Тодор Кънчев Лалев, д-р инж., Главен енергетик на „Метрополитен” ЕАД; Явор Здравков Исаев, асистент, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков“-София, E-mail address: *jzi1986@abv.bg;* Любомир Симеонов Секулов, студент, специалност „Електроенергетика и електрообзавеждане”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“-София; Мартина Райчинова Томчева, докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“-София

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Петър Матов

ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗГРАЖДАНЕ НА СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРИФАЗНИ DC/AC ИНВЕРТОРИ

Георги Павлов, Явор Исаев, Любомир Секулов, Мартина Томчева

Резюме: *Асинхронните електрозадвижвания навлязоха масово във всички видове електрически транспорт, енергетиката, промишлеността и битовата техника. Захранването и реализацията на всички основни режими на работа на асинхронните двигатели (АД) се осъществява посредством инверторни устройства. В тази връзка повишаването на енергетичните параметри на инверторите се постига чрез реализация на ефективно микропроцесорно управление, по конкретни алгоритми, в зависимост от конкретните изисквания и специфичните особености на схемното решение.*
В работата са показани част от получените резултати при проектирането на стенд за изследване на енергетичните параметри на трифазни DC/AC инвертори. Създадена е схемна възможност за промяна на режима на управление в зависимост от конкретните изисквания за качество на изходните сигнали.

Ключови думи: *DC/AC инвертори, преобразуватели, асинхронен двигател, микропроцесорно управление.*

DESIGN AND BUILDING BENCH FOR THE STUDY OF THREE-PHASE DC/AC INVERTORS

Georgi Pavlov, Iavor Isaev, Lubomir Sekulov, Martina Tomcheva

Abstract: *At present, all types of electric transport, power generation, industry sectors and household equipment production widely apply asynchronous electric traction drives. The powering and operation asynchronous drives in their main functional modes is ensured by inverter devices. Moreover, inverters need to comply with certain requirements for the output parameters: voltage and current. Thereby, the enhancement of the power parameters of inverters is achieved through effective microprocessor control, using specific algorithms based on the particularities of the circuit solution.*
This report presents some of the results obtained during the design of a facility for testing the power parameters of three-phase DC/AC invertors. The circuit solution provides an opportunity for switching the control mode depending on the output signal quality requirements.

Key words: *DC/AC inverters, converters, asynchronous drive, microprocessor control*

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

С напредъка на технологиите в съвременните електрически транспортни средства (ЕТС), електроенергетиката и промишлеността все повече навлизат в експлоатация трифазните DC/AC инвертори, които служат за преобразуване на постоянно напрежение в променливо трифазно, за задвижване на трифазни двигатели. Управлението на основните режими на работа се осъществява посредством прецизни и бързи микропроцесорни устройства, позволяващи значително по-висока ефективност и качество при регулиране на основните режими на работа на АД, както и на изходните параметри (напрежение и ток) на инвертора.

Към съвременните инверторни устройства се поставят много сериозни изисквания за качество на изходните параметри. В тази връзка повишаването на енергетичните параметри на инверторите се постига основно чрез реализация на ефективно микропроцесорно управление, по зададени алгоритми, в зависимост от конкретните изисквания и специфичните особености на схемното решение.

В тази връзка с цел обезпечаване на възможност за провеждане на научно-изследователска работа в тази перспективна област на техниката, както и за осъвременяване на обучението на студентите по специалности „Електроенергетика и електрообзавеждане" и „Електромобили" се проектира и разработи стенд за изследване на енергетичните параметри на DC/AC инвертори. Стендът е реализиран на базата на съвременна IGBT технология и микропроцесорно управление с възможност за изследване на различни варианти на импулсна модулация за формиране на трите синусоиди на инвертора и определяне на основните енергетични параметри. [3]

При реализацията на тази задача се направи предварително проучване на прилаганите в техниката схеми, алгоритми и методи за управление на трифазните DC/AC преобразуватели. Анализът на тази предварителна информация даде възможност за избор на силова схема на трифазен DC/AC преобразувател и проектиране на микропроцесорна схема за управление с възможност за провеждане на изследвания в тази насока.

2. ФУНКЦИИ И ПАРАМЕТРИ НА НЕЗАВИСИМИТЕ ИНВЕРТОРИ НА НАПРЕЖЕНИЕ. НАЧИНИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ, ПАРАМЕТРИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

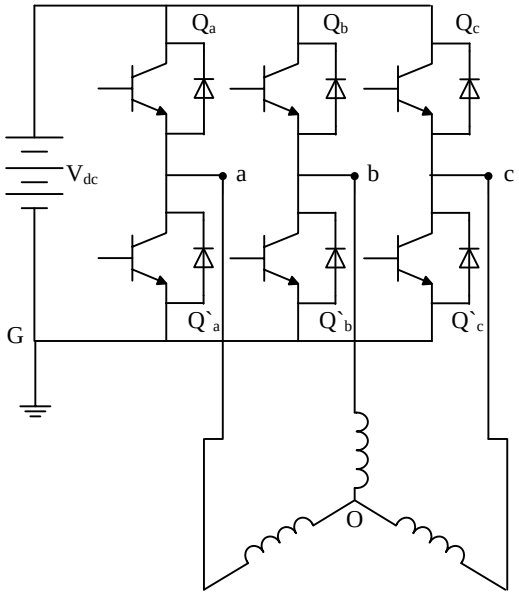
Основната функция на инвертора е да създаде трифазно напрежение с регулируема амплитуда и честота, като основно изискване се поставя и към неговото качество, отсъствие на висши хармоници от нисък порядък. Синусоидално изменение на изходящата величина се получава чрез изменение на относителната продължителност на импулсите по синусоидален закон.

2.1. ФУНКЦИИ И ПАРАМЕТРИ НА НЕЗАВИСИМИТЕ ИНВЕРТОРИ НА НАПРЕЖЕНИЕ. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ОПРЕДЕЛЯЩИ ЕНЕРГЕТИЧНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ИНВЕРТОРА

Показаният на фиг.1 мостов трифазен инвертор има 6 ключа, реализирани чрез IGBT транзистори. Всеки от тях се управлява чрез гейта с конкретна прекъсваща функция $q_i(t)$, равна на 1 когато транзисторът е запушен и 0 когато е отпу-

шен. За да се изпълнят законите на Кирхоф, двойките транзистори в едно рамо трябва да работят допълвайки се, винаги да са в противоположни състояния, така че винаги да е изпълнено условието

$$q_i(t) + q'_i(t) = 1, \quad i = a,b,c \qquad (1)$$



Фиг.1. Електрическа схема на трифазен инвертор.

Ето защо уравнение (1) предполага, че има само осем възможни състояния за инвертора. В табл.1 са обобщени осемте състояния и съответните условия на прекъсване. Състояния 0 и 7 са наречени нулеви състояния, докато останалите се наричат активни състояния.

Таблица 1

Основни състояния при прекъсване на инвертора

				СЪСТОЯНИЕ				
Прекъсвач	S0 (000)	S1(001)	S2 (010)	S3 (011)	S4 (100)	S5 (101)	S6 (110)	S7 (111)
Qa	Отворен	Отворен	Отворен	Отворен	Затворен	Затворен	Затворен	Затворен
Qb	Отворен	Отворен	Затворен	Затворен	Отворен	Отворен	Затворен	Затворен
Qc	Отворен	Затворен	Отворен	Затворен	Отворен	Затворен	Отворен	Затворен

На практика транзисторите работят в ключов режим и естествената форма на изходното напрежение е правоъгълна. За повечето товари за постоянен ток получаващи захранване през изправител и филтър това напрежение е подходящо. За редица товари за променлив ток (осветителни и нагревателни уреди) такава форма на захранващото напрежение е допустима или приемлива, но за най-честите консуматори в ЕТС и др. трифазни АД тя е недопустима. Висшите хармоници от нисък порядък водят до влошаване на режимите на работа на АД и намаляване на кпд [1]. Качеството на изходното напрежение на инвертора, сравнено със синусоидалното, е прието да се определя от така наречения "коефициент на хармоника" K_x, %,

$$K_x = 100 \sum_{n=n_{min}}^{n=\infty} \sqrt{\left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} = 100 \sqrt{\left(\frac{U}{U_1}\right)^2 - 1} \quad , \% \qquad (2)$$

където U_n е ефективна стойност на хармоник с номер n; U_1 е ефективната стойност на първия хармоник; U - ефективна стойност на изходното напрежение; n_{min} е номерът на хармоника близък до основният [2].
За оценка на синусоидалността на напрежението се използва и параметърът коефициент на изкривяване (несинусоидалност), $K_{нс}$

$$K_{HC} = \sqrt{\frac{1}{1+K_x^2 .10^{-4}}} \tag{3}$$

Дефинираните коефициенти характеризират съдържанието на висши хармоници във формата на напрежението, без да показват сложността на филтрация, масогабаритните показатели на филтрите. Най-ефективен критерии при инверторите за оценка на синусоидалността е коефициента на хармониците $K_{x,ф}$ за напрежение получено на изхода на стандартен "Г" – образен LC филтър със зададени параметри, относителна честота ω_{ot}.

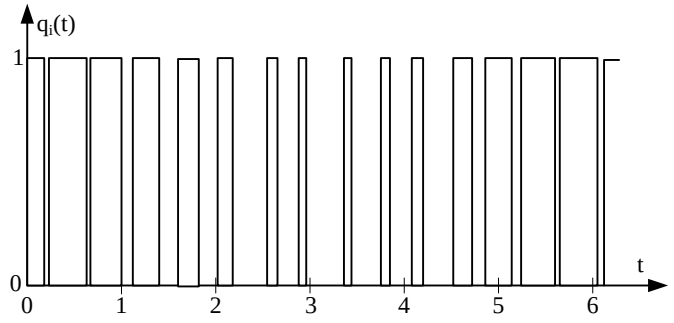
$$\omega_{ot} = \omega / \omega_o = \omega\sqrt{LC}\,, \tag{4}$$

където ω_o е собствена честота на филтъра; ω – работна честота на филтрираното напрежение (на първия хармоник); L и C - индуктивност и капацитет на филтъра. С подходящи математически преобразувания за $K_{x,ф}$ може да се изведе следната зависимост:

$$K_{x,ф} = 100\sqrt{\sum_{n=n_{min}}^{n=\infty}\left(\frac{1}{1-n^2\omega_{ot}^2}\right)\left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \tag{5}$$

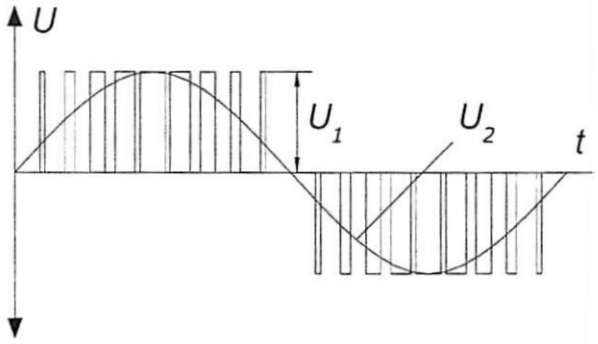
2.2. СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ИНВЕРТОРИТЕ - СПЕЦИФИЧНИ ОСОБЕНОСТИ, ПАРАМЕТРИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

Основната цел е да се реализира такова управление на инвертора, което да обезпечава изходни сигнали (напрежение и ток) максимално близки до синусоидалните. Използват се три вида модулации на сигнали – честотно-импулсна, фазоимпулсна и широчинно-импулсна. Най-често използваният начин за управление на ключовите елементи е широчинно-импулсната модулация (ШИМ). При ШИМ интервалът от време, през който $q_i(t)$ е 1 е променлив (варира) за да се постигне желаната функция. Пример за това е показан на фиг.2. Съотношението между времето, когато $q_i(t)$ е 1 и периода на прекъсване се нарича коефициент на запълване.

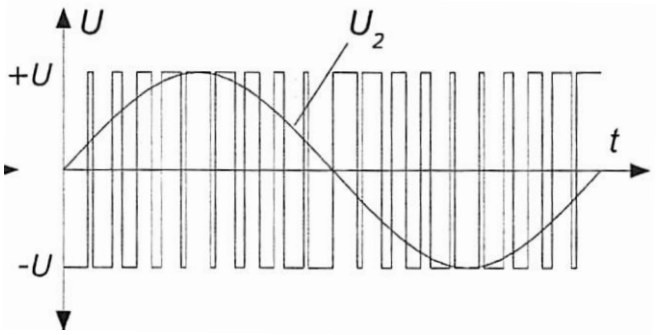


Фиг.2. Функция на прекъсване на ШИМ.

ШИМ може да реализира като еднократна и многократна. Многократната модулация се прилага основно в съвременните електрозадвижвания. Тя може да е еднополярна или двуполярна. На фиг.3 е показана многократна еднополярна модулация. На този метод се основава управлението на модерните инвертори. При многократната двуполярна модулация, фиг.4, винаги се редуват положителен и отрицателен импулс. Когато те са с еднаква продължителност изходящата величина е нула [3].



Фиг.3. Еднополярна модулация.



Фиг.4. Двуполярна модулация.

В зависимост от дължината на импулсите в полупериода многократната ШИМ може да се реализира като равномерна (полупериодът е разделен на четен или нечетен брой интервали с еднаква продължителност) или неравномерна.

Енергетичната ефективност на многократната неравномерна ШИМ в инверторните задвижвания се определя от това дали е двуполярна или еднополярна комутацията на силовите ключови елементи. Броят на изключваните от спектъра на висшите хармоници ($N_{iz,dk}$ - за двуполярна; $N_{iz,ek}$ - еднополярна), близки до основният, се определя от зависимостите:

$$N_{iz,dk} = i-1; N_{iz,ek} = i \tag{6}$$

Следователно, при отчитане само на нечетните хармоници, номерът на хармониците от най-нисък порядък в кривата на напрежението, за двата вида регулиране, се определя както следва:

$$\begin{aligned} n_{min,dk} &= 2i+1 \\ n_{min,ek} &= 2i+3 \end{aligned} \tag{7}$$

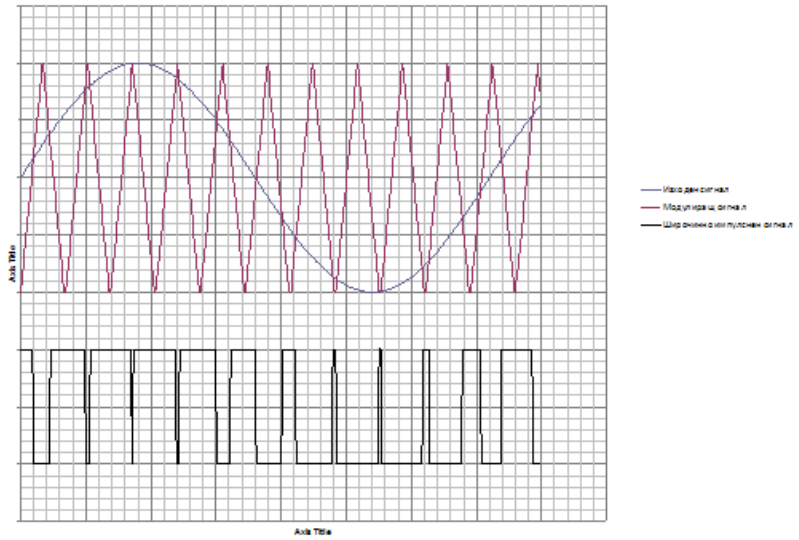
Коефициентът на хармониците на филтъра за двата вида модулация се определя от изразите:

$$K_{x,\phi,dk} = \frac{35}{\left[\omega_{ot}^2 \left(2i+1\right)^2 - 1\right]}; \quad K_{x,\phi,ek} = \frac{20}{\left[\omega_{ot}^2 \left(2i+3\right)^2 - 1\right]}. \tag{8}$$

При двуполярна ШИМ относителната амплитуда на хармоника от най-нисък порядък е 25-30%, а следващият по ред е 40-50%. При еднополярната тези проценти са, както следва 18-19% и 20-25%.

От показаните зависимости се вижда безспорното предимство на многократната еднополярна модулация. Задачата която трябва да бъде решена е още по-сложна, тъй-като енергетичните параметри зависят и от броят на импулсите в полупериода. При увеличаването им пропорционално намалява ω_{ot}. Направени са редица изследвания при конкретна изходна честота на инвертора на влиянието на броя на импулсите и началните ъгли на комутация.

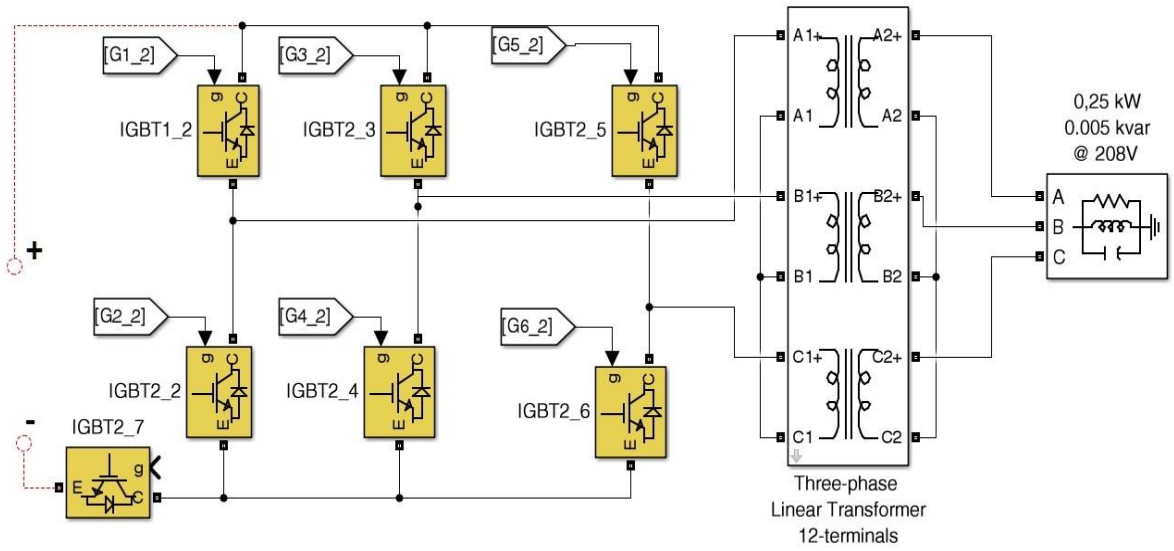
В системата за управление (СУ) обикновено се използва модулиращ напрежен-ов сигнал, формата на който може да е синусоида, многостепенна крива, трапец и др. Това напрежение се сравнява с опорно, например пилообразно, с определена тактова честота и в момент на равенство на двата сигнала се подава сигнал за комутация на съответния силов транзистор. На фиг.5 е показан алгоритъма на управление. Прекъсващият сигнал qi(t) се получава чрез сравняване на модулиращия сигнал с пренасящ триъгълен сигнал при амплитуда 1 и честота равна на честотата на прекъсване.



Фиг.5. Алгоритъм на управление при еднополярна многократна ШИМ.

3. ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИЛОВА СХЕМА И СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА DC/AC ИНВЕРТОРИ

Предварителните литературни проучвания и анализи в областта на управлението и енергетичното поведение на трифазните DC/AC инвертори създаде възможност да се проектира силовата схема и управлението на стенда.
Силовата схема на инвертора е показана на фиг.6.

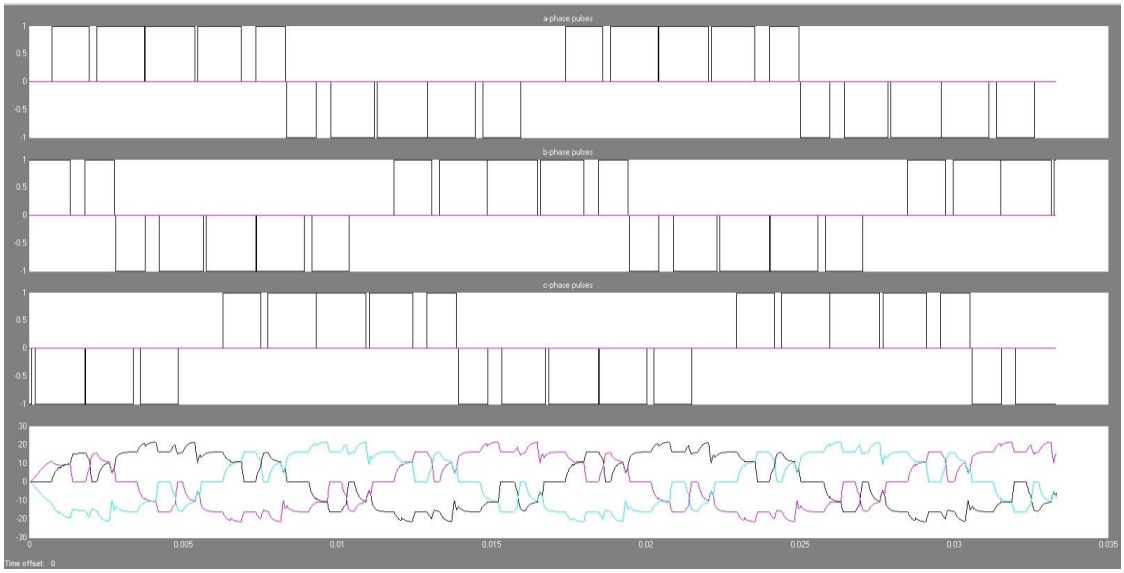


Фиг.6. Силова схема на трифазен инвертор.

Транзисторът IGBT2_7 служи за понижаване и стабилизиране на напрежението върху рамената на инвертора. Трифазният трансформатор е свързан "звезда" към трите рамена.

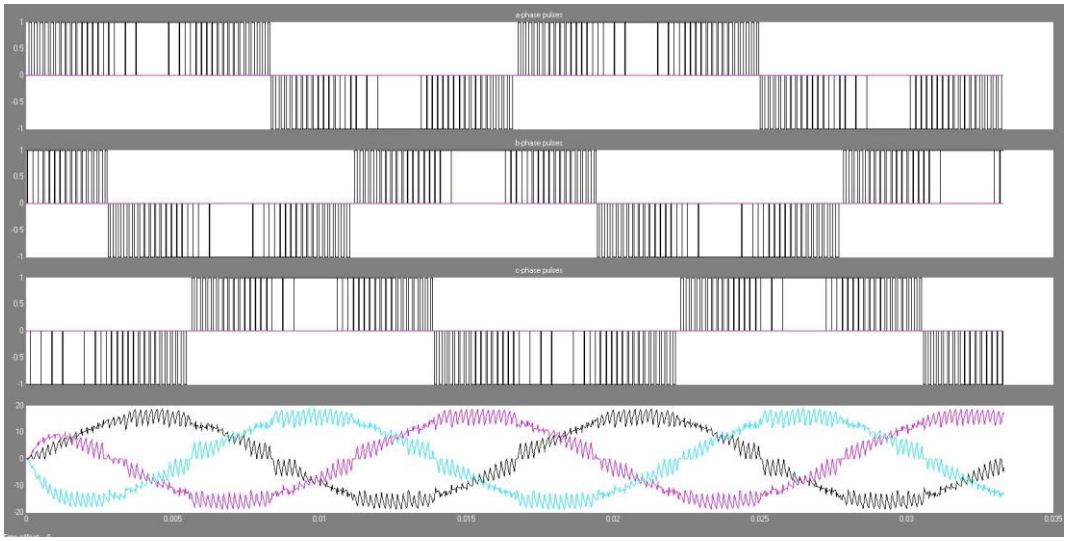
Направени са експериментални измервания с осцилоскоп при постоянен товар 20 Ω и обща индуктивност на товара и трансформатора 2 mH, при променлива честота на модулиращия сигнал на еднополярната ШИМ от 500 до 5000 Hz.

Осцилограмите при 500 Hz на модулиращия сигнал са показани на фиг.7, съответно на управлението на транзисторите чрез ШИМ на първите три осцилограми, а в четвъртата осцилограма са показани токовете през товара.



Фиг.7. ШИМ при 500 Hz на модулиращия сигнал.

Осцилограмите при 5000 Hz на модулиращия сигнал са показани на фиг.8, съответно на управлението на транзисторите чрез ШИМ на първите три осцилограми, а в четвъртата осцилограма са показани токовете през товара.



Фиг.8. ШИМ при 5000 Hz на модулиращия сигнал

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитието на енергийната и транспортна техника през последните години е изключително динамично. Нови технологии се прилагат не само в силовото електрообзавеждане на ТЕС, но и в системите за управление и защита. Това изисква промяна в нивото и качеството на подготовка на кадри и определя необходимостта от създаване на квалифицирани специалисти, обучени съобразно специфичните изисквания на пазара на труда. Това изискване може да бъде постигнато само чрез изграждане на съвременна лабораторна база, отговаряща на нивото на техниката днес.

При повишаване на модулиращия сигнал нелинейните изкривявания намаляват, същото се отнася и при повишаване на индуктивността на товара. Ограниченията свързани с повишаване на честотата идват от бързодействието на IGBT транзисторите.

Реализираният стенд дава възможност да се изследват възможностите за намаляване на загубите и оптимизиране на режимите на работа на преобразувателя и товара, в зависимост от вида и характера му, като се променя алгоритъма за формиране на синусоидата. Това позволява да се определят граничните стойности и характеристики на работните процеси и енергетичните параметри на инвертора.

ЛИТЕРАТУРА

[1] В.Н. Ловушкин. *Транзирноые преобразователи постоянного напрежения*, Издателство "Энергия", 1967

[2] В.С. Моин. *Стабилизированные транзисторныи преобразователи,* Энергоатомиздат 1986

[3] Dimitrov V., *Dimkina E., Dimitrova E., Research of Frequency Controlled Asynchronous Drives Applicability in Electric Vehicles-Laboratory Simulator,* 5th International Conference on Experiments/Process/System Modeling/Simulation/ Optimization IC-EpsMsO, Athens, Greece, 3-6 July, 2013, Proceedings, Vol. II, SET: 978-618-80527-0-3, ISBN: 978-618-80527-2-7, pp. 489-495

Автори: Георги Митков Павлов, проф. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков"-София, E-mail address: *g_pavlov61@abv.bg;* Явор Здравков Исаев, асистент, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков"-София, E-mail address: *jzi1986@abv.bg* ; Любомир Симеонов Секулов, студент, специалност „Електроенергетика и електрообзавеждане", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков"-София; Мартина Райчинова Томчева, докторант, маг. инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков"-София

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Петър Матов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВИДА НА СТАТОРНАТА НАМОТКА НА СИНХРОННА МАШИНА С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ЗА ПОСТИГАНЕ НА МАКСИМАЛНА ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ

Радослав Спасов, Пламен Ризов, Цветомир Стоянов, Виктор Захариев

Резюме: *В доклада е представено изследване за определяне на хармоничния състав на фазните е.д.н. и електромагнитния момент на синхронна машина с възбуждане от постоянни магнити разположени в ротора, във функция от токовото натоварване и вида на статорната намотка (стандартна трифазна, две независими намотки и шестфазна).*
Изследванията са извършени чрез моделиране на магнитното поле чрез програмния продукт FEMM и собствени програмни модули в средата на Matlab и Excel за изчисляване на хармоничния състав на фазните е.д.н.
Ключови думи: *метод на крайни елементи, синхронни двигатели с вътрешни магнити, Total Harmonic Distortion (THD)*

RESEARCH OF THE STATOR WINDING TYPE'S OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS TO ACHIEVEMENT MAXIMUM ENERGY EFFICIENCY

Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Tsvetomir Stoyanov, Victor Zahariev

Abstract: *The report presents research for determining the harmonic composition of the phase electromotive force and electromagnetic moment of a synchronous machines with excitement from permanent magnets imbedded in the rotor by a function of the current density and the type of stator's winding (standard three phase, two independent windings and six phase). The study was made with modeling of the magnetic field by the software "FEMM", and the program modules that calculate the the harmonic composition and THD are created in the software environment MatLab and Excel.*
Key words: *Finite Element Method (FEM), Permanent Magnet Synchronous Machine, Total Harmonic Distortion (THD)*

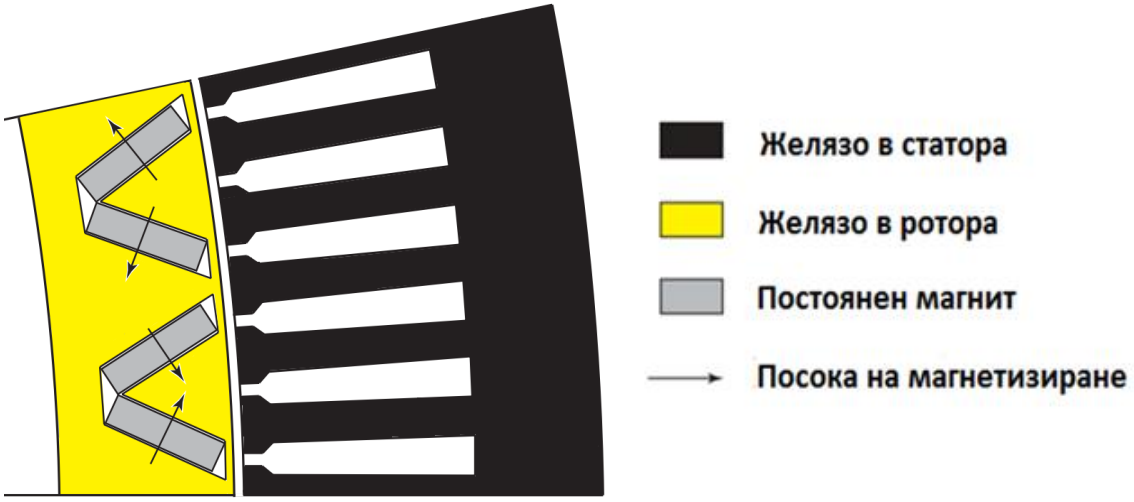
1. ВЪВЕДЕНИЕ

При избора на електрическа машина за задвижване на превозни средства съществуват много възможности, използване на постояннотокови, асинхронни, реактивни двигатели [4] Заедно с това към електрическите машини използвани в тях се налагат редица изисквания по отношение на получаваната мощност от единица обем, с което се цели намаляване на теглото на автомобила и постигане на максимална енергийна ефективност при работа на електрическата машина в

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

двигателен и генераторен режим. В последните години в хибридните автомобили често срещани са синхронни електрически машини с постоянни магнити [3] . Като най-често те са с така нареченото V-образно вътрешно разположение на редкоземни постоянни магнити. Принципната конструкция на активната част на този вид двигатели е показана на фиг.1 [2].



Фиг.1. Напречен разрез на машина с "V" разположени в ротора магнити

Намаляването на масата на електрическите машини се постига по няколко начина, които основно са свързани с увеличаване на оборотите и токовите натоварвания на намотките: използване на високо енергийни постоянни магнити и висококачествени изолационни материали, специална конструкция на секциите на статорната намотка с цел постигане на висок коефициент на запълване на статорните канали, използване на вода или масла за директно охлаждане на секциите на статорната намотка, използване на електротехническа стомана с дебелина 0.35 мм и ниски специфичните загуби. По данни от литературни източници, при маслено охлаждане се допуска токова плътност в статорната намотка до 30 А/мм^2, което в голяма степен обуславя значителното топлинно натоварване на изолационната система на синхрония двигател. Високите обороти на ротора се постигат при честоти на захранващото напърженитe от порядъка до 2400 Hz.

Друга важна характеристика на синхронните двигатели с постоянни магнити, използвани в автомобили е произвеждания от тях електромагнитен момент и неговото изменение при промяна на токовото натоварването.

Целта на настоящия доклад е посредством моделиране на магнитното поле в синхронни машини с V-образно разположени вътрешни постоянни магнити да се:

- определи зависимостта на електромагнитния момент от токовото натоварване и вида на статорната намотка;

- определяне на хармоничния състав и THD на фазните е.д.н. в зависимост от токовото натоварване и вида на статорната намотка;

2. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ

За определяне на хармоничния състав на фазните е.д.н. и зависимостта на електромагнитния момент от токовото натоварване в статорната намотка при синхронни машини с постоянни магнити е приложено числено моделиране на магнитното поле. То е извършено посредством на метода на крайните елементи, като е разработен 2D стационарен модел на магнитно поле и анализ на хармоничен състав на фазните е.д.н. и резултатите са анализирани по метода на THD. Допълнително са разработени софтуерни приложение в средата на Matlab и Excel за определяне на хармоничния състав на фазните е.д.н.

3. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

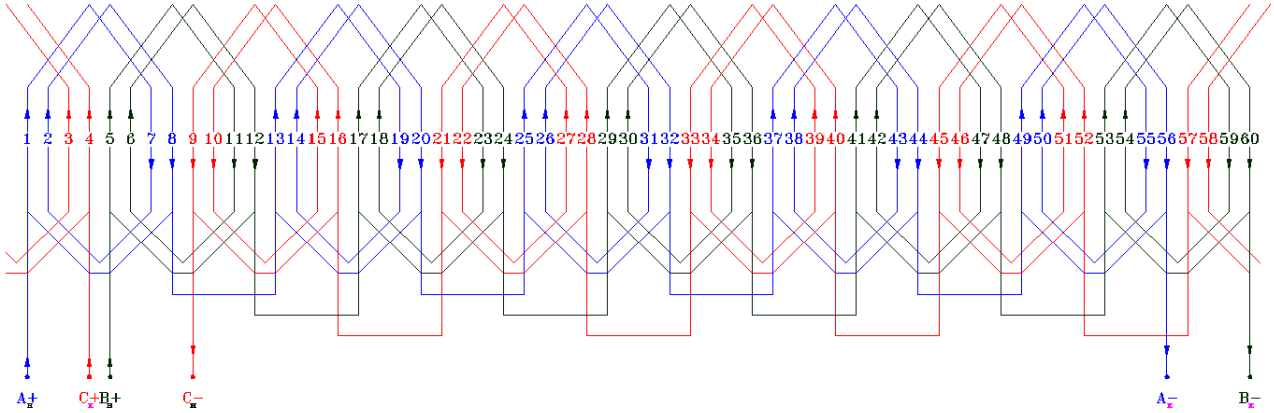
Като обект за изследване е синхронна машина с постоянни магнити с три вида статорни намотки:

- стандартна трифазна с q=2 (през два съседни канала обхванати от една полюсно фазна група тече ток с еднаква фаза и големина), показана на фиг.2;
- две независими намотки (през два съседни канала от полюсно фазната група при трифазната намотка, тече фазен ток дефазиран на определен ъгъл. Разгледан е и случай при който в първия канал тече ток, а във втория токовата плътност е равна на нула (този вид намотка е изследвана само в генераторен режим), показана на фиг.3;
- шестфазна с q=1, показана на фиг.4.

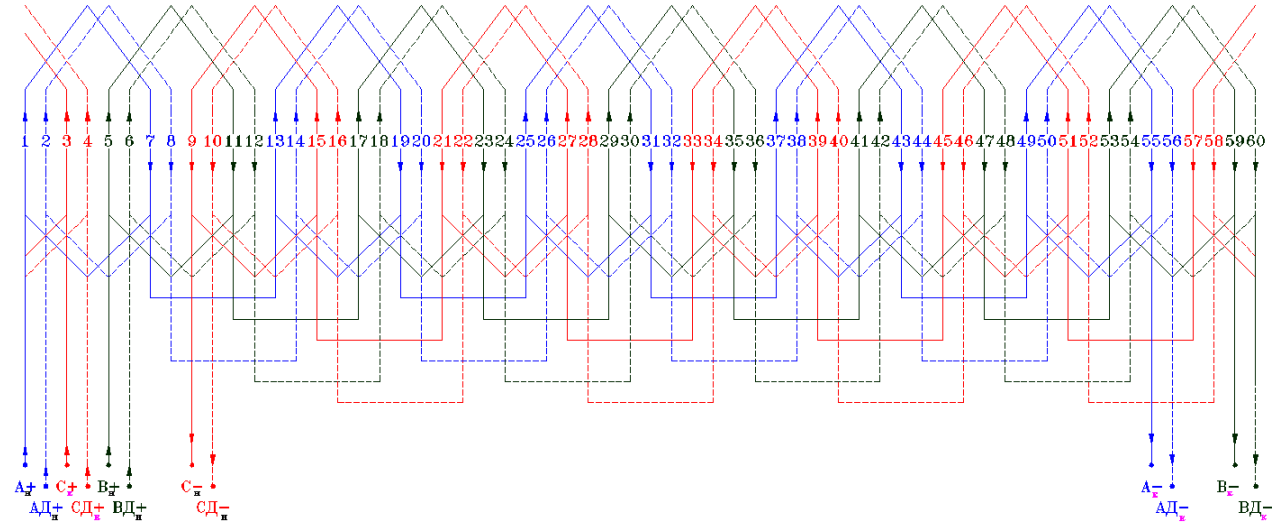
Геометрията на статорния и роторния лист са показани на фиг.6 - фиг.8.
Входните данни за изследването са дадени в табл.1.

Таблица 1

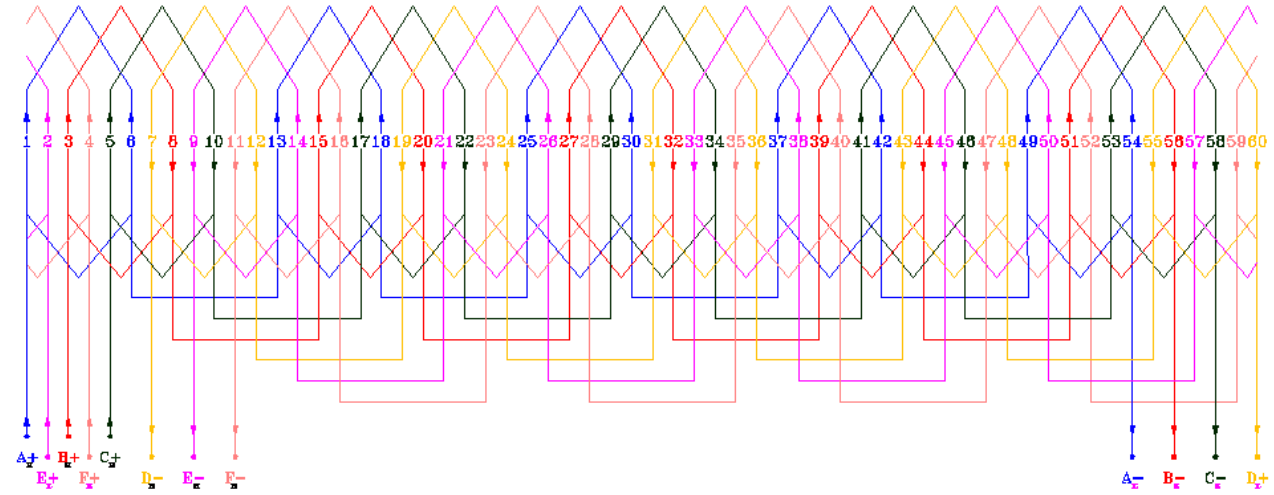
		m=3	m=6			m=3	m=6
канали за полюс и фаза	-	2	1	стъпка на намотката	-	6	5
въздушна междина	мм	0,7	0,7	височина на статорен канал	мм	18,1	18,1
аксиална дължина	мм	90	90	широчина на статорен канал	мм	5,8	5,8
външен диаметър на статора	мм	242	242	външен диаметър на ротора	мм	182,8	182,8
вътрешен диаметър на статора	мм	184,2	184,2	брой магнити в ротора	-	20	20
брой на статорните канали	-	60		материал на магнитите		NdFeB 40 MGOe	NdFeB 40 MGOe



Фиг.2. Схема на стандартна трифазна намотка с q=2.



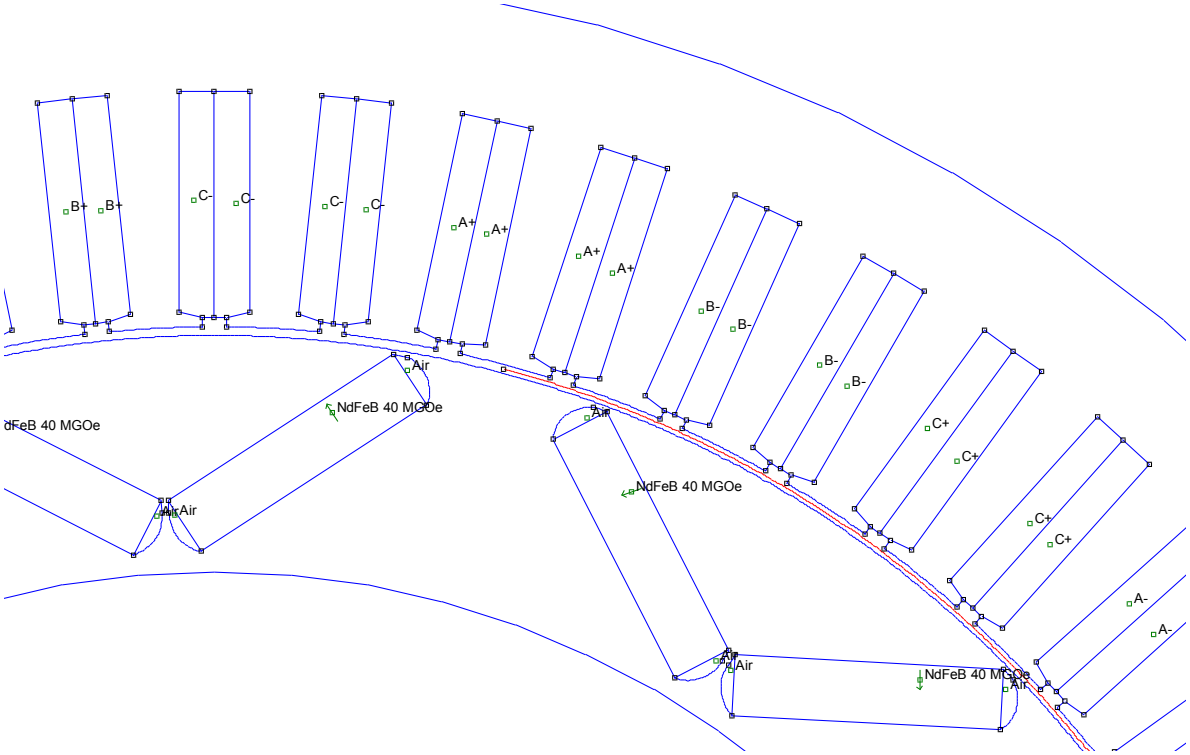
Фиг.3. Схема на две независими намотки с q=1.



Фиг.4. Схема на шестфазна намотка с q=1.

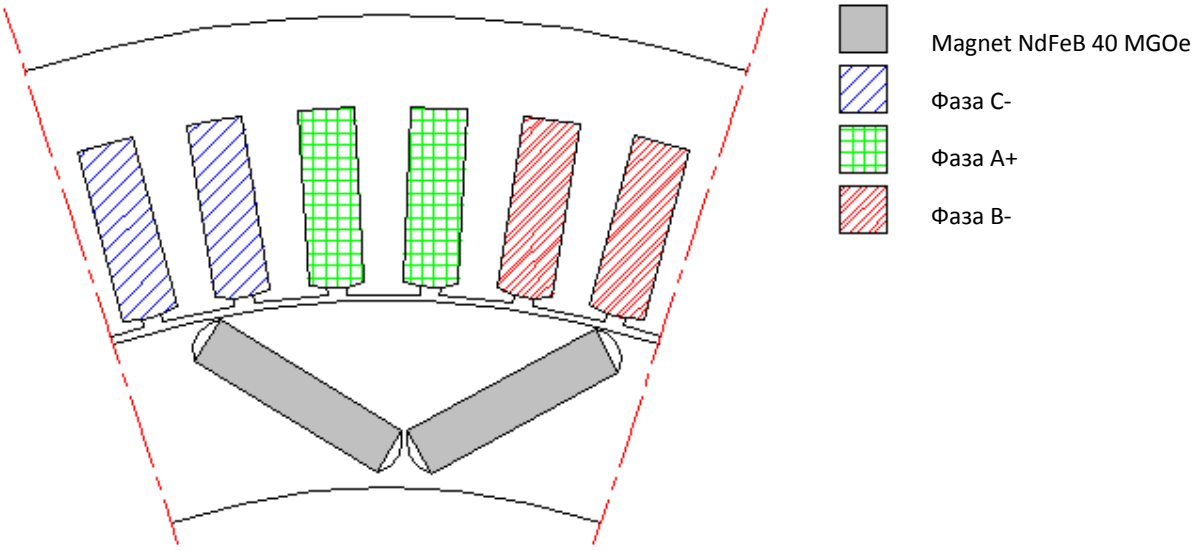
4. РАЗРАБОТЕНИ ЧИСЛЕНИ МОДЕЛИ

Литературните източници описват много методи за определяне на електромагните сили, моменти и реактанси, базирани на резултатите на метода на крайните елементи [1, 5, 6, 7]. На фиг.5 е показан модела за определяне на зависимостта на електромагнитния момент от вида на статорната намотка при различни стойности на тока в статора. Моментът се изчислява по дъга с дължина равна на геометричните градуси на две полюсни деления и разположена в средата на въздушната междина по метода на тензора на напреженията [1].

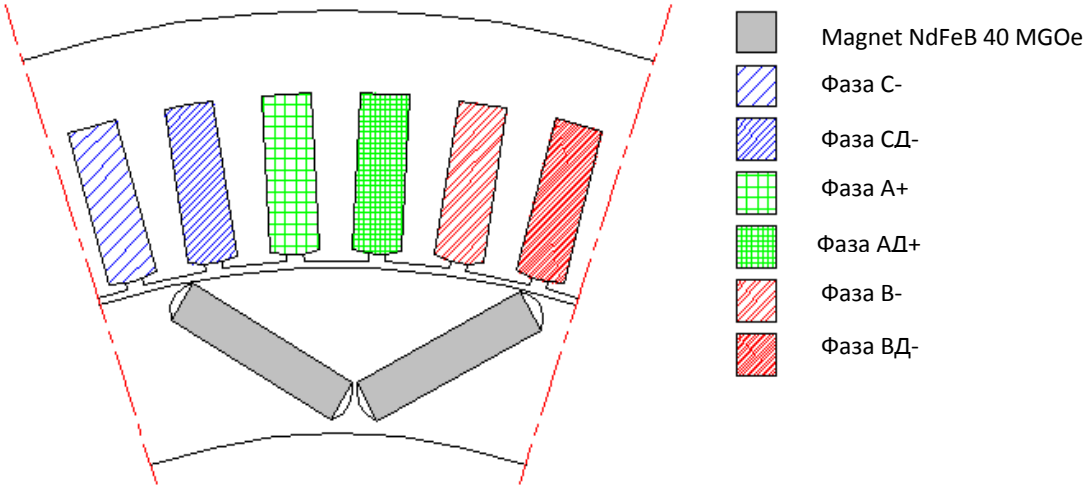


Фиг.5. Модел във FEMM за определяне на електромагнитния момент при синхронен двигател.

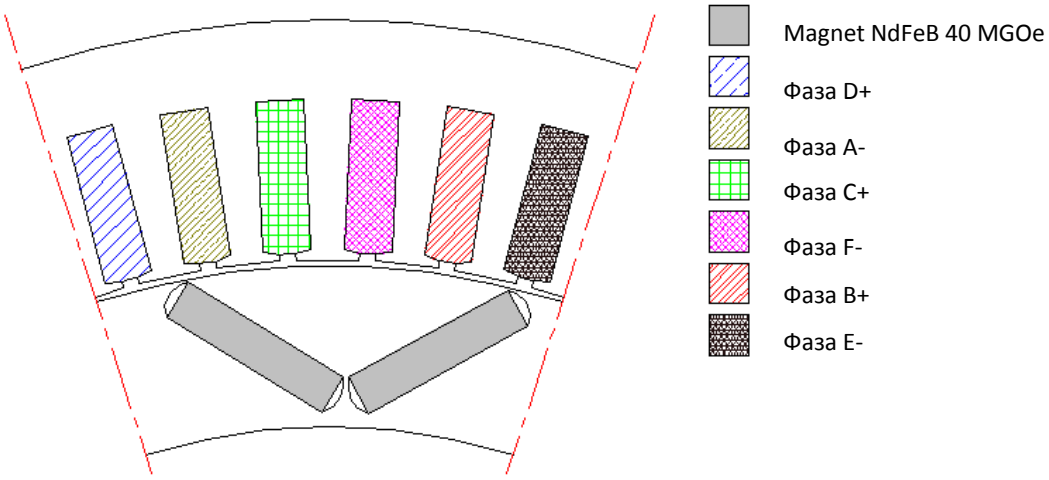
Разпределението на фазите в статорните канали при двигателя е показано на фиг.6 за стандартна намотка, на фиг.7 за намотка при която тока в втория канал от една полюсно фазна група е дефазиран (две независими намотки), аналогична е подредбата и в случая когато във втория канал токовата плътност е равна на нула. На фиг.8 е показано токовото разпределение при шестфазна намотка. За първоначален е приет момента от време, при който моментната стойност на тока във фаза А има стойност равна на максималната, а моментните стойности на тока във фази В и С са равни на половината от максималната стойност (при трифазна намотка). Разработени са варианти за три стойности статорния ток, които съответстват на еквивалентна токова плътност в канала 30 А/мм^2, 20 А/мм^2 и 10 А/мм^2 , както и режим на празен ход. Еквивалентната токова плътност в канала е определена спрямо цялото му сечение. За получаване на зависимостите на фазните е.д.н. от вида на статорната намотка за посочените по-горе стойности на токовата плътност, са разработени варианти за всяка от тях, при които ротора последователно се завърта на 1.8 геометрични градуса (9 електрически съответстващи на време 0.0005s).



Фиг.6. Разпределение на фазите в статорните канали при трифазна намотка с q=2.



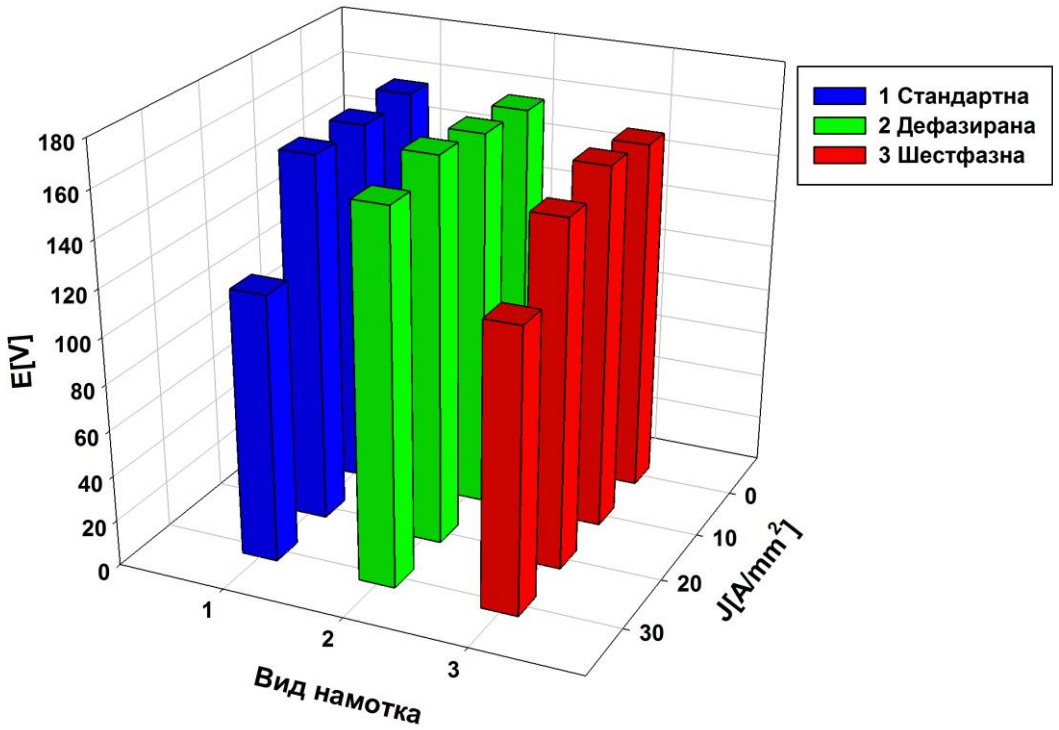
Фиг.7. Разпределение на фазите в статорните канали при две независими намотки с q=1.



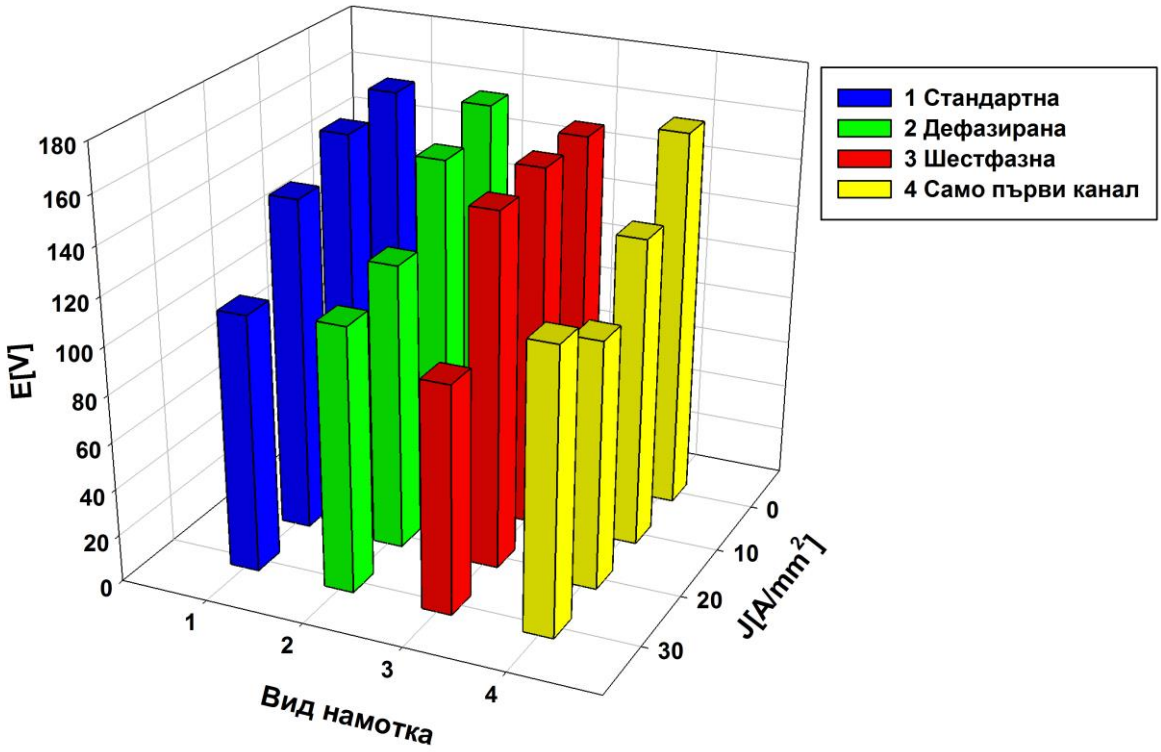
Фиг.8. Разпределение на фазите в статорните канали при шестфазна намотка с q=1.

5. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

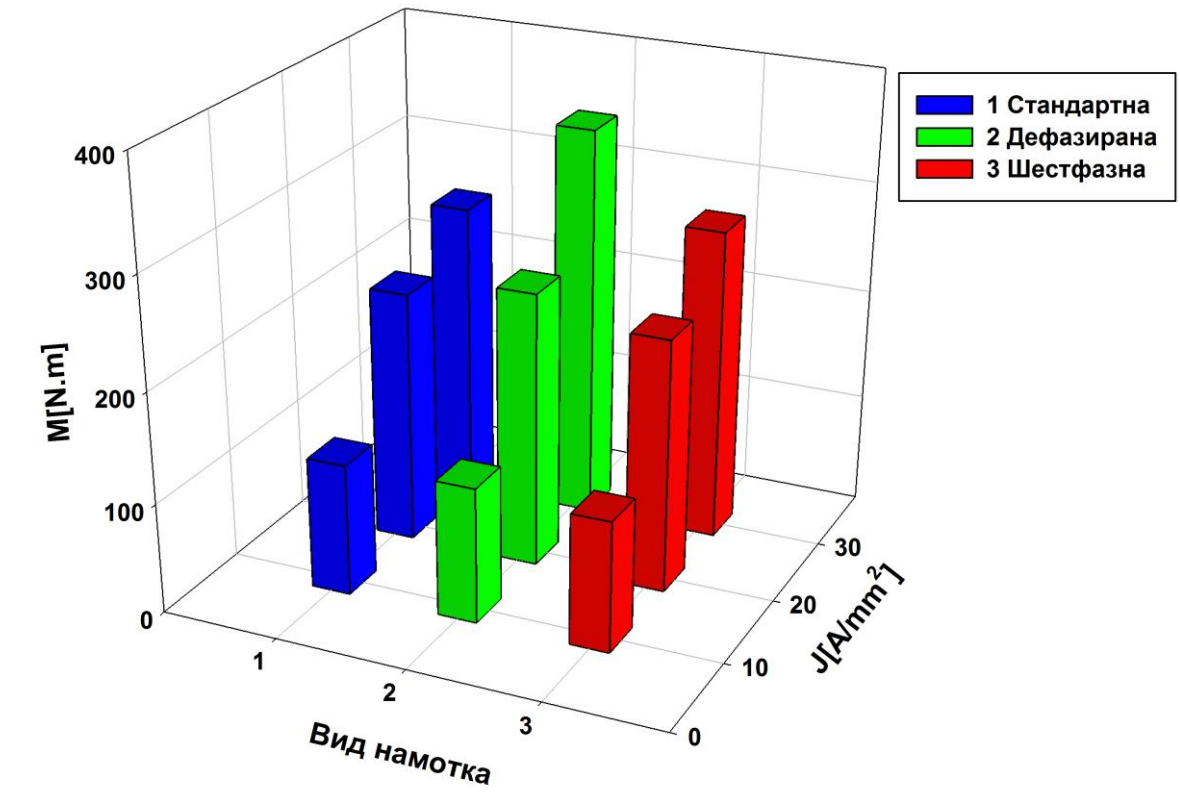
На фиг.9 са показана зависимостта на е.д.н. от вида на намотката за три стойности на статорния ток (както и празен ход) на синхронния двигател, а на фиг.10 за по аналогичен начин за генераторен режим. Зависимостта на момента от вида на намотката е показан на фиг.11 в двигателен и на фиг.12 - в генераторен режим.



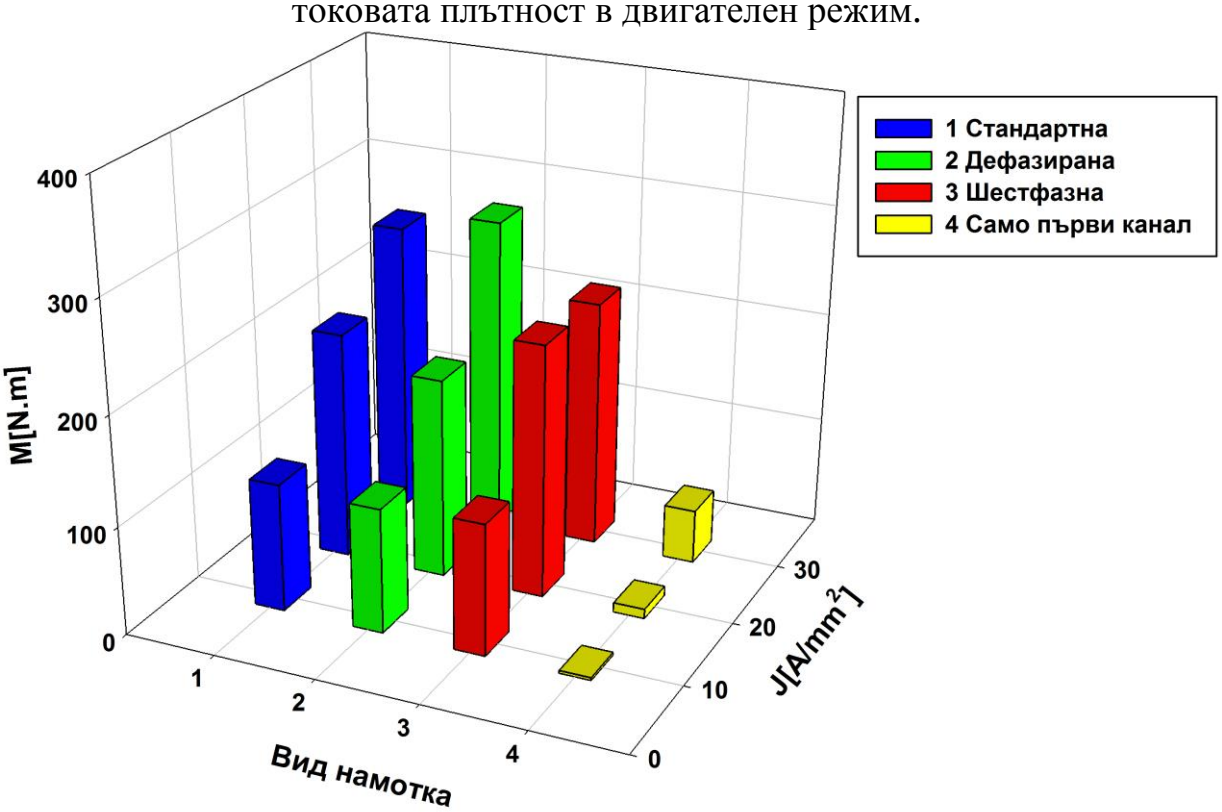
Фиг.9. е.д.н. на секция в зависимост от вида на намотката и токовата плътност в двигателен режим.



Фиг.10. е.д.н. на секция в зависимост от вида на намотката и токовата плътност в генераторен режим.

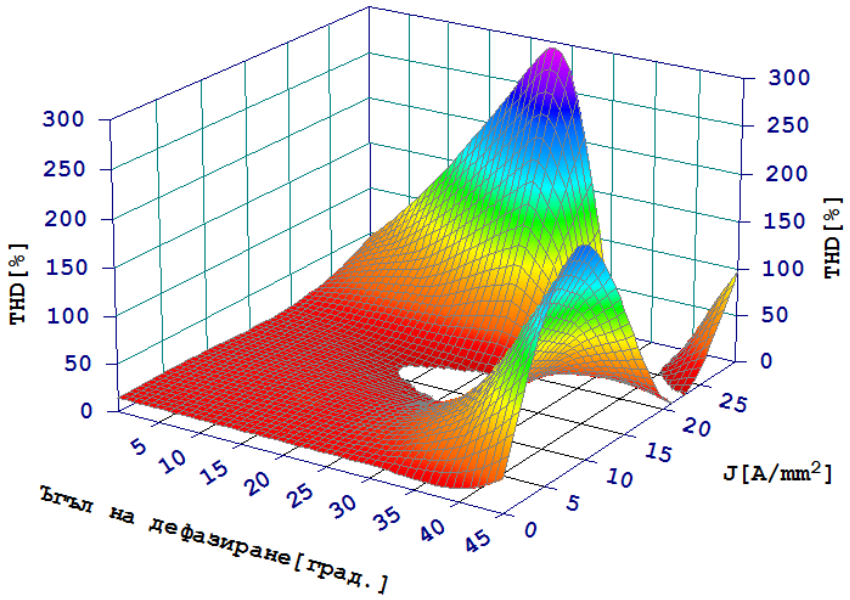


Фиг.11. Зависимост на момента от вида на намотката и токовата плътност в двигателен режим.

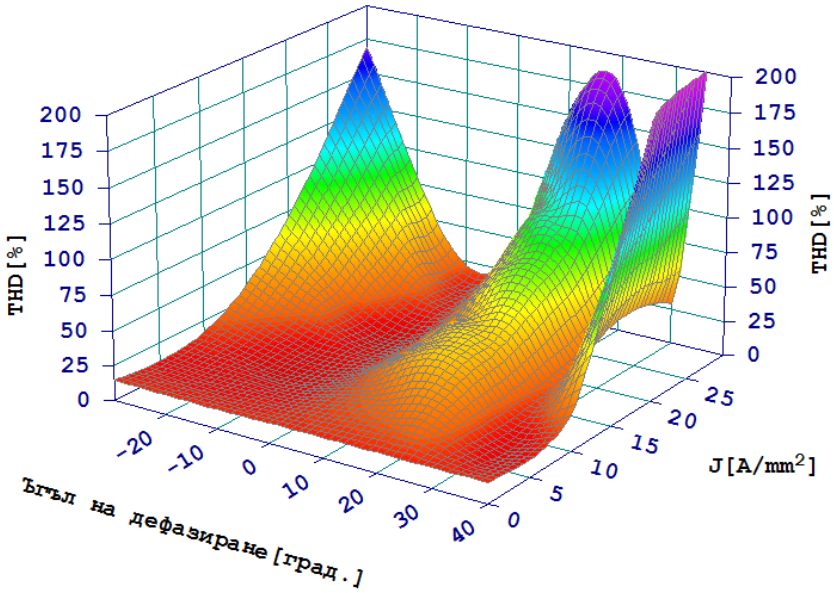


Фиг.12. Зависимост на момента от вида на намотката и токовата плътност в генераторен режим

На фиг.13 е показана зависимостта на процентния състав на висши хармоници от токовата плътност и ъгъла на дефазиране в двигателен режим, а на фиг.14 - аналогичната зависимост при генераторен режим.



Фиг.13. Зависимост на процентния състав на висши хармоници от токовата плътност и ъгъла на дефазиране в двигателен режим при две независими намотки



Фиг.14. Зависимост на процентния състав на висши хармоници от токовата плътност и ъгъла на дефазиране в генераторен режим при две независими намотки.

7. АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

7.1. В двигателен режим по отношение на въртящ момент и големина на първи хармоник, най-добри работни резултати показва конструкцията на синхронна машина с две независими намотки следва шестфазната и стандартната намотка. Постигането на най-добри резултати с две независими намотки, изисква управление на ъгъла на дефазиране на тока във времето, както е показано на фиг.13, следователно реализирането на задвижване със синхронна машина с тази конструкция изисква два инвертора със значително по-сложни алгоритми за управление.

7.2. В генераторен режим същата конструкция има най-добри показатели, но както се вижда на фиг.14 е необходим дефазиращ елемент в една от намотките, който да осигури дефазиране на тока на втората намотка спрямо тока на първата на ъгъл тридесет градуса във времето Това изискване трудно би се осъществило, тъй като трябва да се променя големината на кондензатора при промяна на натоварването.

7.3. Като най-добър вариант по отношение на постигнатите характеристики и стойност на допълнителното оборудване е конструкцията с шестфазна намотка. Ако изискването за генерираната мощност е в порядъка 0-30 % от мощността при двигателен режим конструкцията с две независими намотки може да бъде с най-добра енергийна ефективност

ЛИТЕРАТУРА

[1] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual

[2] F. Libert, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm 2004, Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer pp.7-24.

[3] Todorov, G., B. Stoev, Analytical model for sizing the magnets of permanent magnet synchronous machines, XIV International conference on electrical machines, drives and power system Varna, Bulgaria 1.10.2015-3.10. 2015.

[4] Михов, М. , Д. Сотиров, А. Иванов, Индуктивности по осите d, q на синхронен реактивен двигател с разпределена статорна намотка -опитно и числено изследване, V Научна конференция ЕФ2013 Созопол 2.09.2014-5.09 2014, Том 63, книга 6, pp. 133-141.

[5] Тодоров Г., Б. Стоев, Определяне на реактансите на синхронни двигатели с постоянни магнити с различна конфигурация на ротора, Годишник на Технически Университет – София 2014, Том 64, книга 3, стр. 351-359.

[6] V. Spasov, So Noguchi and H. Yamashita, "Comparative analysis of the force computation methods in the 3D FEM with edge and nodal elements", Electrical Engineering Research Conference, Kita Kyushu, Japan, August 2-3, 2001, SA-01-22, RM-01-90, pp. 9-13

[7] В. Спасов. Изчисляване и визуализация на локална електромагнитна сила при метода с крайни елементи, *списание "Електротехника и електроника"*, кн. 11/12, 2007, стр. 39-43

Автори: Радослав Лазаров Спасов, доц. д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *lrs@tu-sofia.bg***;** Пламен Миланов Ризов, доц. д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg***;** докторант, инж. Цветомир Методиев Стоянов, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *cecinh@abv.bg***;** Виктор Захариев Захариев, докторант, инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *sun_goko@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Михо Михов

РАЗПРЕДЕЛИТЕЛЕНИ ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА ФОТОВОЛТАИЧНИ ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

Радослав Спасов, Пламен Ризов, Виктор Захариев, Цветомир Стоянов

Резюме: *В следния доклад е разгледано влиянието върху работата на повишаващ трансформатор в разпределителни мрежи с фотоволтаични електроцентрали в зависимост от хармоничният състав на захранващото напрежение. Стандартите дефинират степента на Тоталното Хармонично Изкривяване (THD) на напрежението и тока в разпределителните мрежи. Изчислението на THD е извършено чрез моделирането на изходното напрежение на трансформатора с помощта на софтуерния продукт "Femm", "lua" скриптове, както и с допълнителни програмни модули в софтуерната среда на MatLab и Excel за генериране на входящите токове и напрежения спрямо стандарта. Получените стойностите на THD се анализират и се сравняват с предварително определени стандартни.*

Ключови думи: *Метод с крайни елементи (МКЕ), Разпределителни трансформатори, Фотоволтаична централа (ФВЦ), Тотално хармонично изкривяване (THD).*

DISTRIBUTING TRANSFORMER FOR PHOTOVOLTAIC POWER STATIONS

Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Victor Zahariev, Tsvetomir Stoyanov

Abstract: *The report analyses the effect on the work of a power transformer working in the distributive systems of a photovoltaic power stations in accordance to the harmonics present in the voltage supplied to it. The standards define the degree of Total Harmonic Distortion (THD) of the voltage and current in the distributional system.*
The calculation of the Total Harmonic Distortion is made though modulating the output voltage of the transformer with the help of the software product "FEMM", "lua" scripts and with additional program modules in the software products MatLab and Excel, for the generation of the input currents and voltages in accordance to the standards. The generated values are analyzed and the THD values are compared to previously determined values from previous given standard values.

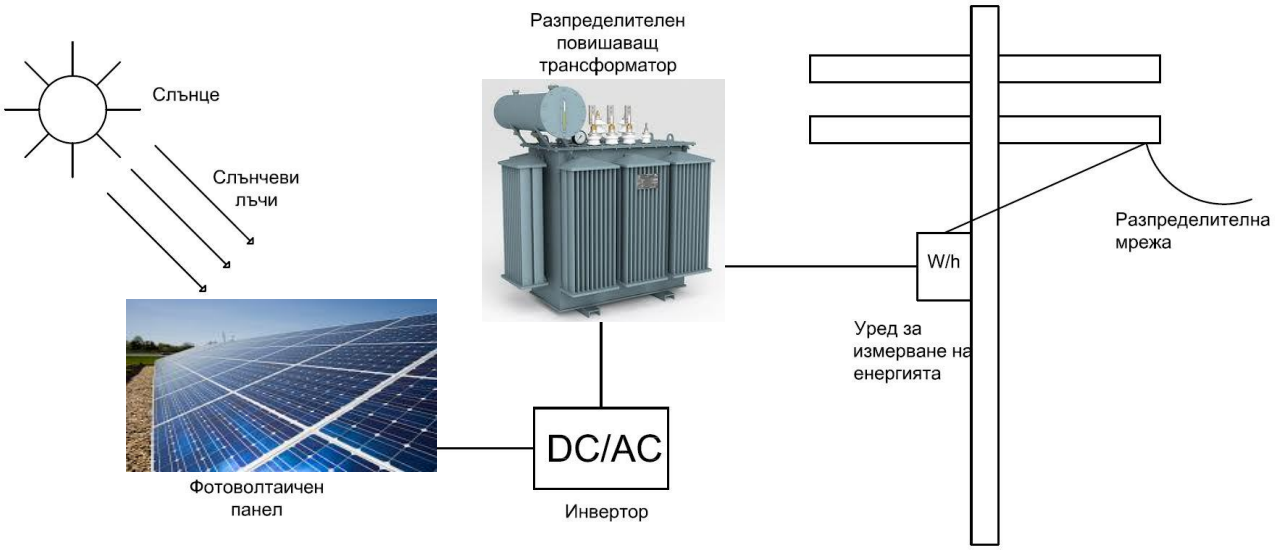
Key Words: *Finite Element Method (FEM), Distribution Transformers, Photovoltaic Power stations (PV-systems), Total Harmonic Distortion (THD).*

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Разгледан е разпределителен трансформатор за работа в фотоволтаични електроцентрали. Специфичните изисквания към тези трансформатори са свързани със съвместната им работа с инвертори, които в зависимост от техните качества генерират напрежение с различен хармоничен състав. Наличието на хармоници в захранващото напрежение (респективно в токовете) води до увеличаване на загубите в трансформатора, а от друга страна хармониците в изходното напрежение на трансформатора влошават качествените характеристики на подаваната електроенергия към разпределителната мрежа. Трансформаторът посредством намотките си високо напрежение е свързан към енергийната разпределителната мрежа, а първичната намотка е захранена с напрежение генерирано от инверторна група, която от своя страна е захранена от преобразователните панели на фотоволтаична електроцентрала. Цялостната принципна схема на свързването на разпределителния трансформатор е показана на фиг.1.



Фиг.1. Принципна схема на свързването на разпределителния трансформатор.

Предмет на изследване е конструкцията на намотките на разпределителен трансформатор, която би подобрила качеството на изходното напрежение. За да се елиминира влиянието на конструкцията на магнитопровода и насищането му сме избрали мантиен трансформатор с линейна магнитна характеристика на магнитопровода. При така избраната конструкция на трансформатора може да се заобиколят недостатъците на ядрения трансформатор и да се разглежда само влиянието на конструкцията на намотките върху изходното напрежение при зададени токови плътности на първичната намотка с различен хармоничен състав. Създаден е модел на трифазен мантиен трансформатор в FEEM, в който токовите плътности въвеждани в намотките са изчислени да отговарят на определени стойности дефинирани от стандарта.

Амплитудните стойности на отделните хармоници, използвани за определяне и генериране на различните входни стойности на хармоничния състав е изобразена на табл.1 и е взета от стандарт IEEE 519-92 (“Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”). В табл.1 от стан-

дарта са зададени определени стойности на THD при различните к-фактори. Тоталното хармонично изкривяване за тока, респективно за токовата плътност, се изчислява по (1).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 + I_{n+1}^2 + I_{n+2}^2 ... + I_{n+\infty}^2}}{I_1^2} \quad (1)$$

Табл.1.

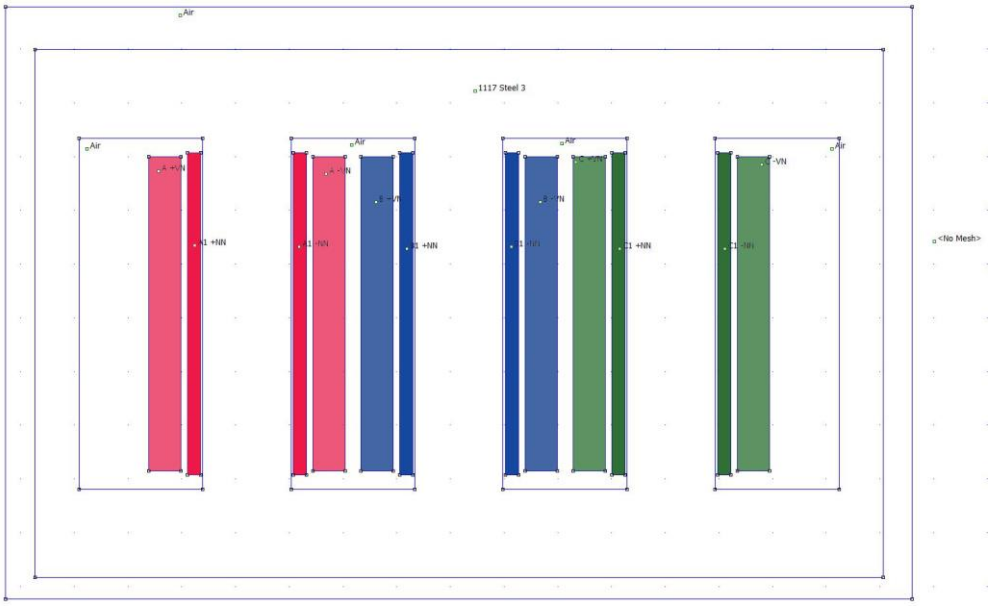
стойности на хармоничните изкривявания и амплитуди спрямо основния хармоник, К-фактор и THD

THD	0.136	0.194	0.241	0.281	0.35	0.413	0.443	0.472	0.501	0.529	0.585	0.641	0.727
K-factor UL	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	15	17	20
Over Rating	1.02	1.04	1.06	1.08	1.12	1.15	1.17	1.19	1.2	1.22	1.25	1.28	1.33
I1	0.991	0.982	0.972	0.963	0.944	0.924	0.914	0.904	0.894	0.884	0.863	0.842	0.809
I3	0.097	0.137	0.168	0.0252	0.238	0.275	0.291	0.307	0.322	0.336	0.363	0.388	0.423
I5	0.058	0.082	0.101	0.117	0.143	0.165	0.175	0.184	0.193	0.202	0.218	0.233	0.254
I7	0.042	0.059	0.072	0.083	0.102	0.118	0.125	0.132	0.138	0.114	0.156	0.166	0.181
I9	0.032	0.046	0.056	0.065	0.079	0.092	0.097	0.102	0.107	0.112	0.121	0.129	0.141
I11	0.026	0.037	0.046	0.053	0.065	0.075	0.079	0.084	0.088	0.092	0.099	0.106	0.115
I13	0.022	0.032	0.039	0.045	0.055	0.063	0.067	0.071	0.074	0.078	0.084	0.09	0.098
I15	0.019	0.027	0.034	0.039	0.048	0.055	0.058	0.061	0.064	0.067	0.073	0.078	0.085
I17	0.017	0.024	0.03	0.034	0.042	0.048	0.051	0.054	0.057	0.059	0.064	0.069	0.075
I19	0.015	0.022	0.027	0.031	0.038	0.043	0.046	0.048	0.051	0.053	0.057	0.061	0.067
I21	0.014	0.02	0.024	0.028	0.034	0.039	0.042	0.044	0.046	0.048	0.052	0.055	0.06
I23	0.013	0.018	0.022	0.025	0.031	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.047	0.051	0.055
I25	0.012	0.016	0.02	0.023	0.029	0.33	0.035	0.037	0.039	0.04	0.044	0.047	0.051

В изследването се разглеждат два вида конструкции на намотки ниско напрежение. Първият вид е стандартна цилиндрична двуслойна намотка с разположение върху ядрото, показана на фиг.2, а вторият вид е модифицирана намотка тип зиг-заг, при която всяка фазна намотка се състои от три равни части и разположена по ядрата, така че да имат магнитна и електрическа симетрия (фиг.3). Двата модела на мантиен трансформатор са с еднаква конструкция на магнитопровода.

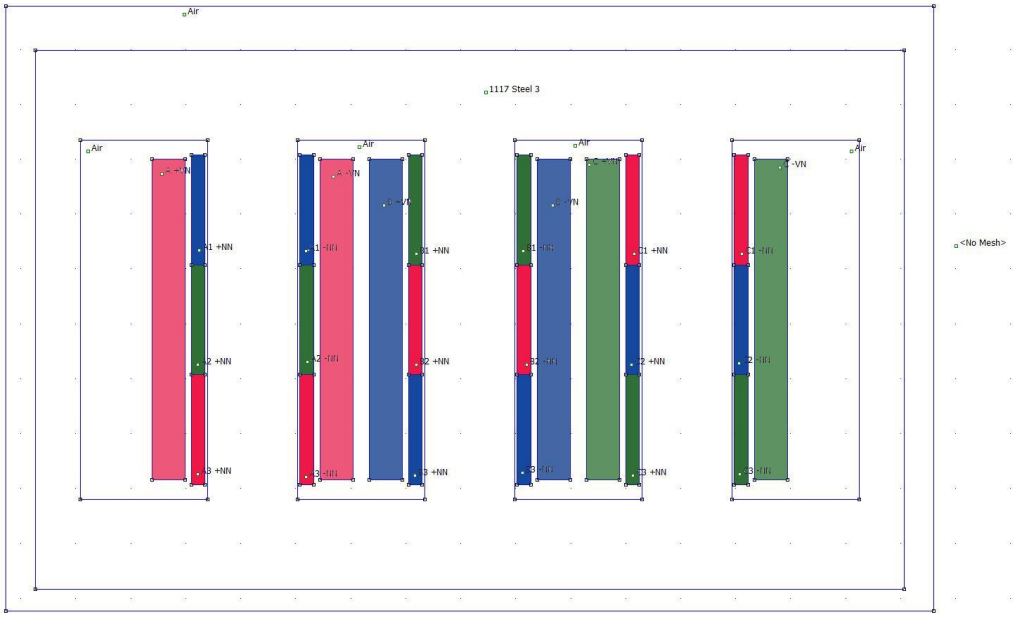
2. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ

За генериране на токовите плътности за въвеждани в модела, с различен хармоничният състав (к-фактор), се използва алгоритъм, реализиран в Microsoft Excel. Програмата генерира всички токови плътности за намотка ниско напрежение за к-фактор от 2 до 20, със амплитуди на отделните хармоници показани в табл.1. За автоматизиране на въвеждането на геометрията на трансформатора са разработени 2D модели в среда AutoCad, които след това се импортират в софтуерната среда FEMM, където се прилага числено моделиране на магнитното поле. Многократните изчисления в FEMM са автоматизирани чрез използване на „lua” скриптове. Получените от FEMM стойности на потокосцепленията с помощта на допълнително създадени софтуерни приложения в среда Microsoft Excel се изчисляват електродвижещите напрежения в намотка високо напрежение, както и хармоничният му състав.



- Фаза B -ниско напрежение
- Фаза C -ниско напрежение
- Фаза A -ниско напрежение
- Фаза B -високо напрежение
- Фаза C -високо напрежение
- Фаза A -високо напрежение

Фиг.2. Модел в FEMM на мантен трансформатор със стандартно разположение на намотка ниско напрежение с разпределение на отделните фази по ядрата.



- Фаза B -ниско напрежение
- Фаза C -ниско напрежение
- Фаза A -ниско напрежение
- Фаза B -високо напрежение
- Фаза C -високо напрежение
- Фаза A -високо напрежение

Фиг.3. Модел в FEMM на мантиен трансформатор със разделена намотка ниско напрежение с разпределение на отделните фази по ядрата.

3. АЛГОРИТЪМ НА РАБОТА

Алгоритъмът за изследване се състои от следните стъпки:

3.1. Генериране на крива на токовите плътности в относителни единици за избрания к-фактор. За един период /0.02s/ се изчисляват относителните стойности на токовите плътности за трите фази, като се приемат различни комбинации на началните фази за отделните хармоници. Чрез Фурие анализ се проверява съответствието на хармоничния състав на генерираната крива спрямо стойностите зададени в табл.1. Формата на кривата на токовата плътност за фаза А (за к-фактор 5) е показана на фиг.4 и фиг.5.

3.2. Изчисляват се токовите плътности за всяка една зона в моделите на изследваните трансформатори. За втория модел всяка една от трите части на намотка ниско напрежение е равна на другите две като площ и е равна на една трета от площта на стандартната намотка. Токовите плътности в трите разпределени по ядрата намотки за всяка фаза са с еднакви по големина стойности но не са с еднакви знаци. При разпределението по ядрата въвежданите токови плътности за всяка една фаза по ядро са показани в табл.2.

Автоматизирано се извършват електромагнитните изчисления в софтуерната среда FEMM и от получените стойности на потокосцепленията се изчислява електродвижещото напрежение в намотките високо напрежение. На фиг.6 е показано магнитното поле за една точка от времето за трансформатор с намотки свързани в звезда / модифициран зиг-заг.

3.3. Посредством хармоничен анализ на електродвижещите напрежения се оценява ефекта от използване на една или друга конструкция на намотка ниско напрежение.

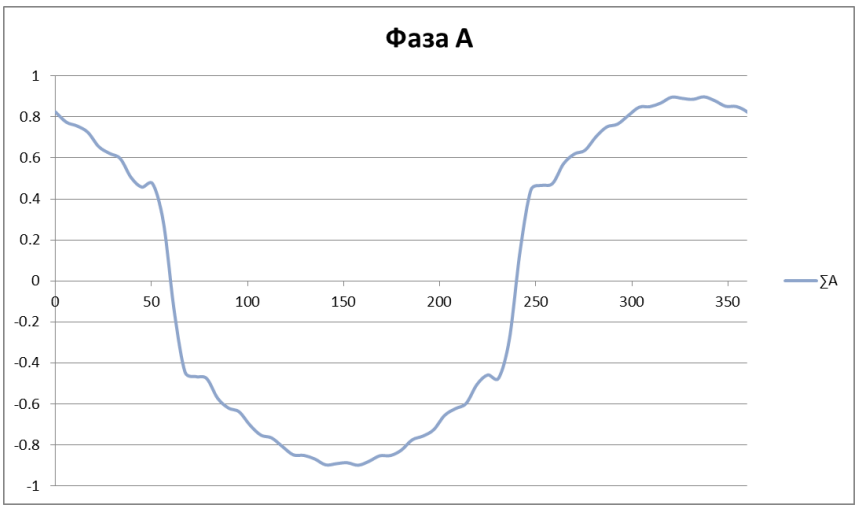
Табл. 2.

Разпределение на токовите плътности на отделните фази в намотките по ядрата.

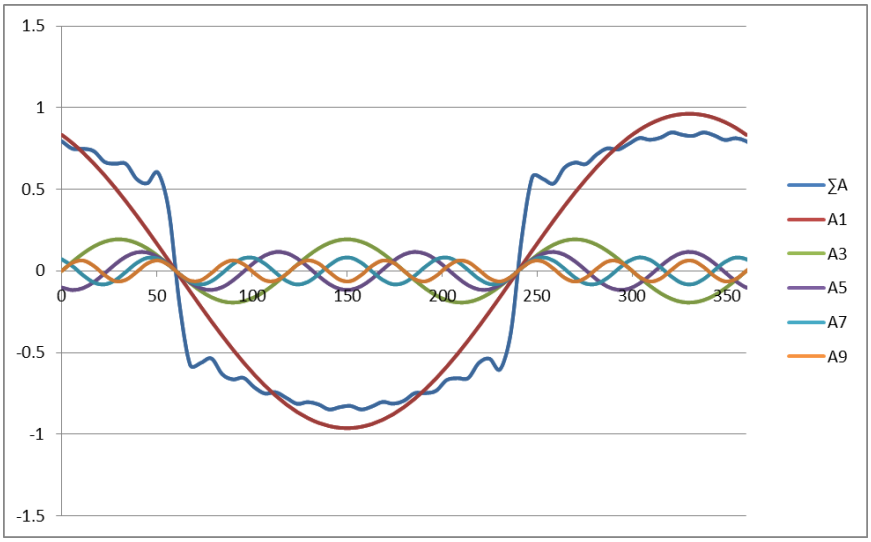
Намотка №	A1±	A2±	A3±	B1±	B2±	B3±	C1±	C2±	C3±
Токова плътност	JB	-JC	JA	JC	-JA	JB	JA	-JB	JC

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ НАПРАВЕНИТЕ ИЗЧИСЛЕНИЯ И СИМУЛАЦИИ

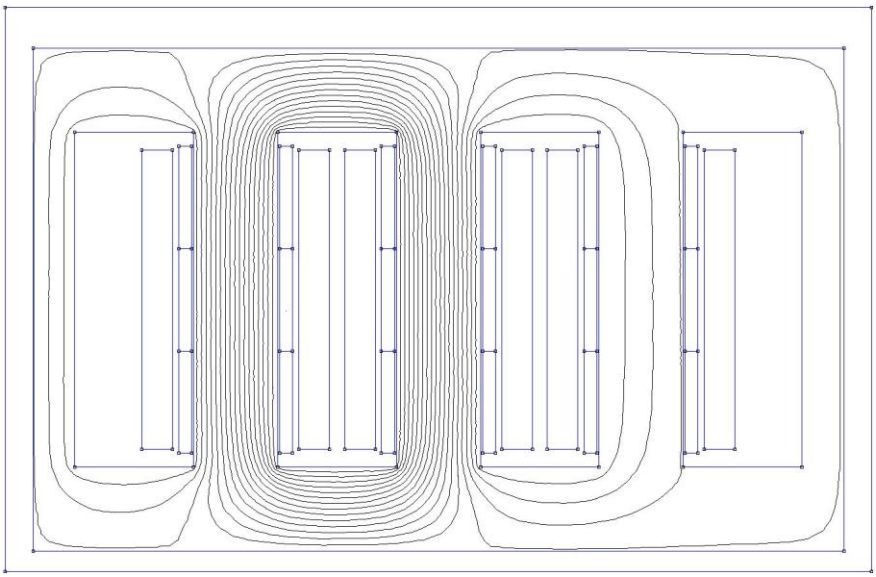
Направени са симулации на работата на разпределителен трансформатор с двата вида намотки при захранване със симетрична система токове с к-фактор от 2 до 12. Графично стойностите на амплитудите на отделните хармоници са показани на фиг.7. При трансформатора със схема на свързване звезда на първичната намотка хармоничния състав на индуктираното е.д.н., както се и очаква, почти съвпада с този на захранващите токове, докато при трансформатора с модифицирана намотка зиг-заг - амплитудните стойности на трети и кратните му хармоници намаляват почти двойно. Резултатите от изчисленията за хармоничния състав в изходното напрежение за трансформатор с намотка ниско напрежение модифициран зиг-заг са показани на фиг.8., а на фиг.9 и фиг.10 са сравнени резултатите за трети и девети хармоник в изходното напрежение за трансформаторите с двата вида намотки.



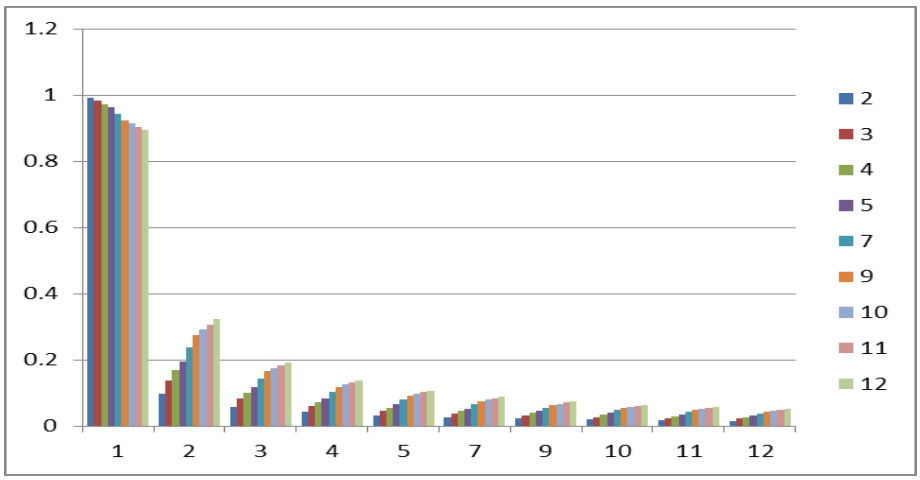
Фиг.4. Токова плътност в относителни единици за фаза А съставена за к-фактор 5 с пълен хармоничен състав.



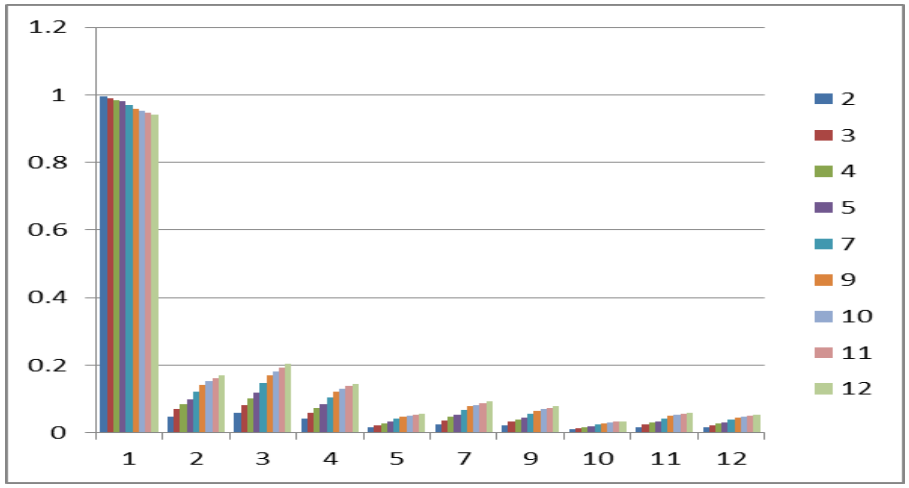
Фиг.5. Хармоничен състав на токовата плътност за фаза А съставена за к-фактор 5.



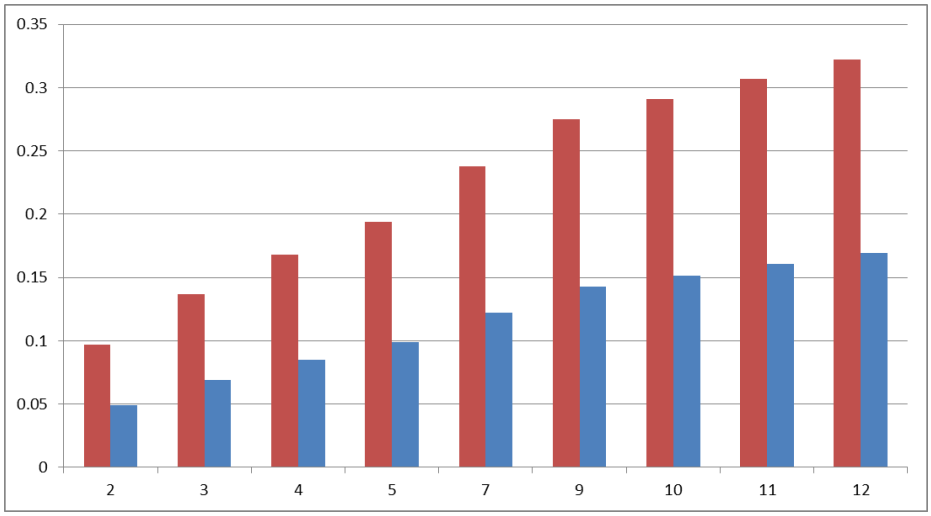
Фиг.6. Разпределение на магнитния поток в модела за t=0 и при максимална стойност на тока във фаза В, при к-фактор 5.



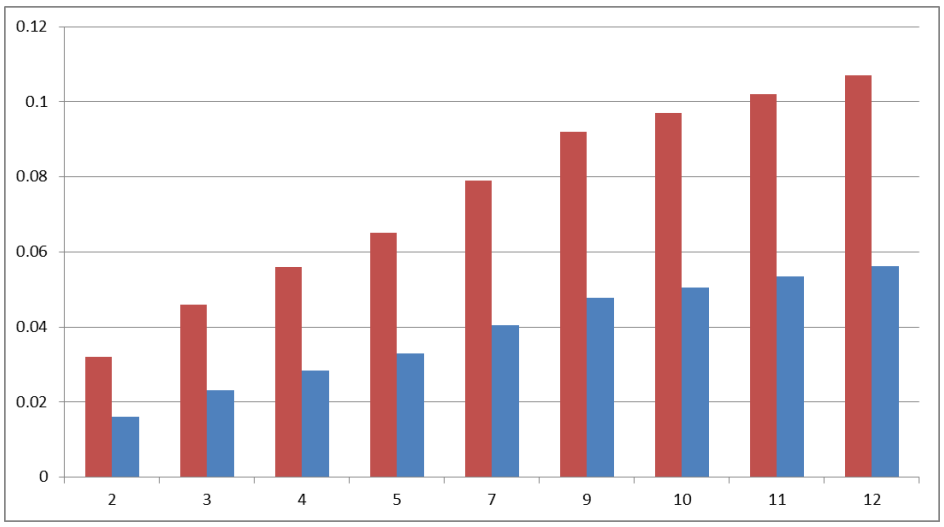
Фиг.7. Входящия хармоничен състав на първичния ток при различен к-фактор.



Фиг.8. Хармоничен състав на получените е.д.н. при различен к-фактор за трансформатор с намотки звезда/модифициран зиг-заг.



Фиг.9. Съпоставка между стойностите на 3-и хармоник на е.д.н. при ядрен трансформатор с намотки свързани звезда/звезда и трансформатора с намотка звезда/модифициран зиг-заг при различен к-фактор.



Фиг.10. Съпоставка между стойностите на 9-и хармоник на е.д.н. при ядрен трансформатор с намотки свързани звезда/звезда и трансформатора с намотка звезда/модифициран зиг-заг при различен к-фактор.

5. АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

От резултатите на направените изследвания може да се направи извода, че трансформатора с намотка ниско напрежение модифициран зиг-заг силно намалява третия и кратните му хармоници, но цената на това редуциране е увеличените с 50% навивки на намотката. Създадената методика за изследване на хармоничния състав в индуктираното е.д.н. при различна степен на несинусоидалност позволява изследване на трансформатори с друг тип намотки ниско напрежение. Обект на следващи изследвания ще е трансформатор с две намотки ниско напрежение тип зиг-заг, дефазирани на определен ъгъл за ограничаване на пети или седми хармоник в е.д.н. индуктирано в намотка високо напрежение.

ЛИТЕРАТУРА

[1] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual
[2] "Harmonics, Transformers and K-Factors", CDA Publication 144, September 2000
[3] Hemchandra Madhusudan Shertukde, "Distributed Photovoltaic Grid Transformers"
[4] Стандарт БДС EN 50160
[5] Стандарт IEEE 519-92

Автори: Радослав Лазаров Спасов, доц. д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *rls@tu-sofia.bg;* Пламен Миланов Ризов, доц. д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg;* Виктор Захариев Захариев, докторант, маг. инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *sun_goko@gmail.com;* Цветомир Методиев Стоянов, докторант маг. инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *cecinh@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Михо Михов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНА СИСТЕМА НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ

Светлана Цветкова, Ангел Петлешков,
Георги Жегов, Ваня Петрова

Резюме: *В доклада са дадени и анализирани резултати от изследване на качеството на електрическата енергия в електроснабдителна система ниско напрежение, захранваща предимно битови консуматори. Направено е сравнение на измерените показатели за качество на електрическата енергия, със съответните нормативни документи, както и статистическа обработка на измерените стойности на отклонението на напрежението и е получен закона на разпределение.*

Ключови думи: *качество на електрическата енергия, битови консуматори, статистическа обработка.*

STUDY OF THE ELECTRICAL ENERGY QUALITY IN ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM LOW VOLTAGE

Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov,
Georgi Zhegov, Vania Petrova

Abstract: *The results from a study of the quality of electrical energy in low voltage power supply system, supplied predominantly domestic consumers, are presented and analyzed in the paper. Also has been made a comparison of measured power quality indexes, relevant regulations. An statistical processing of the measured values of the voltage deviation and a law of distribution is received.*

Keywords: *electrical energy quality, domestic consumers, statistical data processing.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Осигуряването и поддържането на качеството на електрическата енергия е основно задължение на електроснабдителните предприятия. От друга страна, потребителите са в правото си да изискват и получават качествена електрическа енергия, като имат задължението чрез своите консуматори и режимите им на работа да не влошават показателите за качество на електрическата енергия в електроснабдителните системи.

В работата са дадени и анализирани резултати от изследване на качеството на електрическата енергия в електроснабдителна система ниско напрежение, захранваща предимно битови консуматори. Направено е сравнение на измерените

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

показатели за качество на електрическата енергия, със съответните нормативни документи [1,2,3]. Направена е статистическа обработка на измерените стойности на отклонението на напрежението и е получен закона на разпределение.

2. КОНТРОЛНИ ТОЧКИ НА ИЗМЕРВАНЕ И ИЗПОЛЗВАНА АПАРАТУРА

Измерванията са проведени на територията на с. Волуяк в две контролни точки (к.т.), представляващи отклонения от мрежа ниско напрежение 0,4/0,23kV, в които са присъединени потребителите чрез електрически табла, разположени на уличните стълбове:

- к.т. 1 е точка на присъединяване на потребители към електрическо табло, разположено на уличен стълб №11 на ул. „Диляна";
- к.т. 2 е точка на присъединяване на потребители към електрическо табло, разположено на уличен стълб №32 на ул. „Дълга поляна".

Захранваните консуматори основно са битови - енергоспестяващи лампи, телевизори, компютърна техника и друга електронна техника.

Измерванията са проведени с трифазен анализатор на качеството на електрическата енергия Meg30 [4], който дава възможност за измерване, изчисляване, запис и анализ на всички електрически величини и показателите за качеството на електрическата енергия в трифазни четири и петпроводни електрически системи ниско напрежение, съгласно БДС EN 50160 [2]. Получената информация от измерванията е обработена със специализиран софтуер.

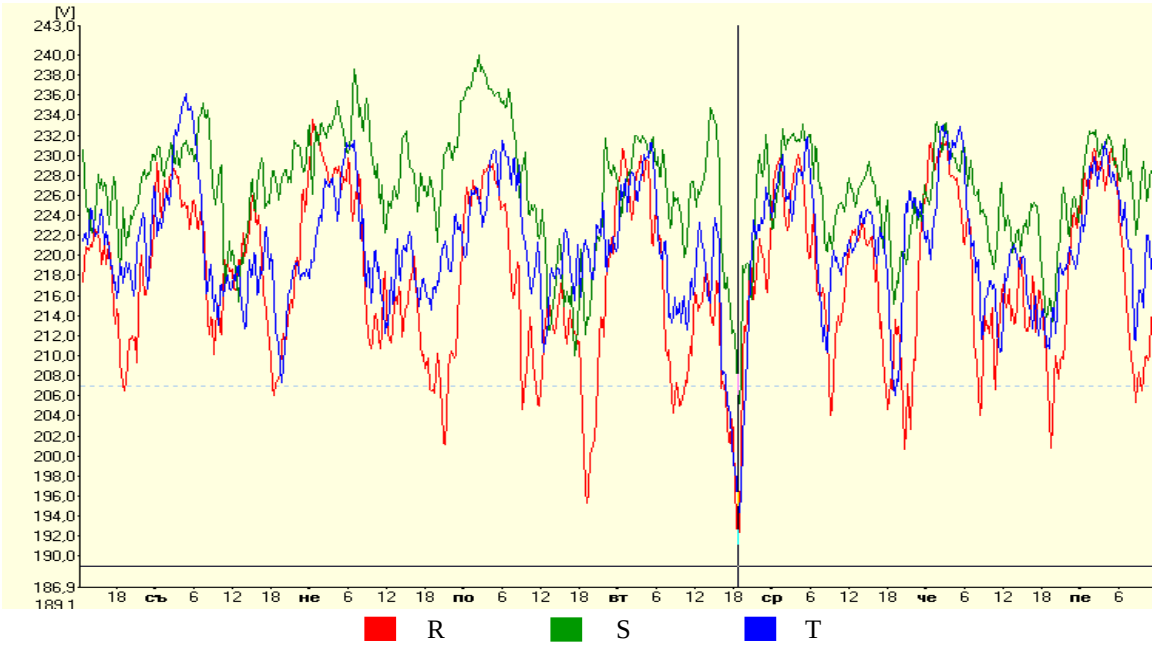
Измервателният уред е присъединен към трите фази. Измерванията се осъществяват чрез ампер клещи и сонди за напреженов сигнал. Периодът на измерване е 1 седмица с интервал от време за осредняване на измерванията от 10 минути.

3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ В к.т. 1

Изследването е проведено в периода от 12,30 часа на 28.02.2014 г. до 11.10 часа на 07.03.2014 г.

От записаните данни от уреда се вижда, че честотата на захранващото напрежение за периода на измерване е почти постоянна, като нейната средна стойност за целия период на измерването е 50 Hz. Максималната стойност на честотата е 50.06 Hz, а минималната е 49.93 Hz. Максималното отклонение на честотата е -0,07 Hz (-0,14%). Следователно в 100% от измерванията, измерените стойности на честотата на захранващото напрежение напълно отговарят на нормата от 50Hz ± 1% (49,5 Hz до 50,5 Hz), дадена в [1, 2].

На фиг.1 е показано изменението на ефективните стойности на фазните напреженията за периода на измерване - за фази R, S и T.



Фиг.1. Ефективни стойности на фазните напрежения в к.т. 1.

В табл.1 са дадени минималната и максималната стойност на фазните напрежения. Максималното отклонение на напреженията е съответно: -16,9% за фаза R, -10% за фаза S и -15% за фаза T.

Таблица 1

Величина	Фаза	Стойност	
		Минимална	Максимална
U, V	R	191,2	233,6
	S	206,9	241,9
	T	195,6	236,3

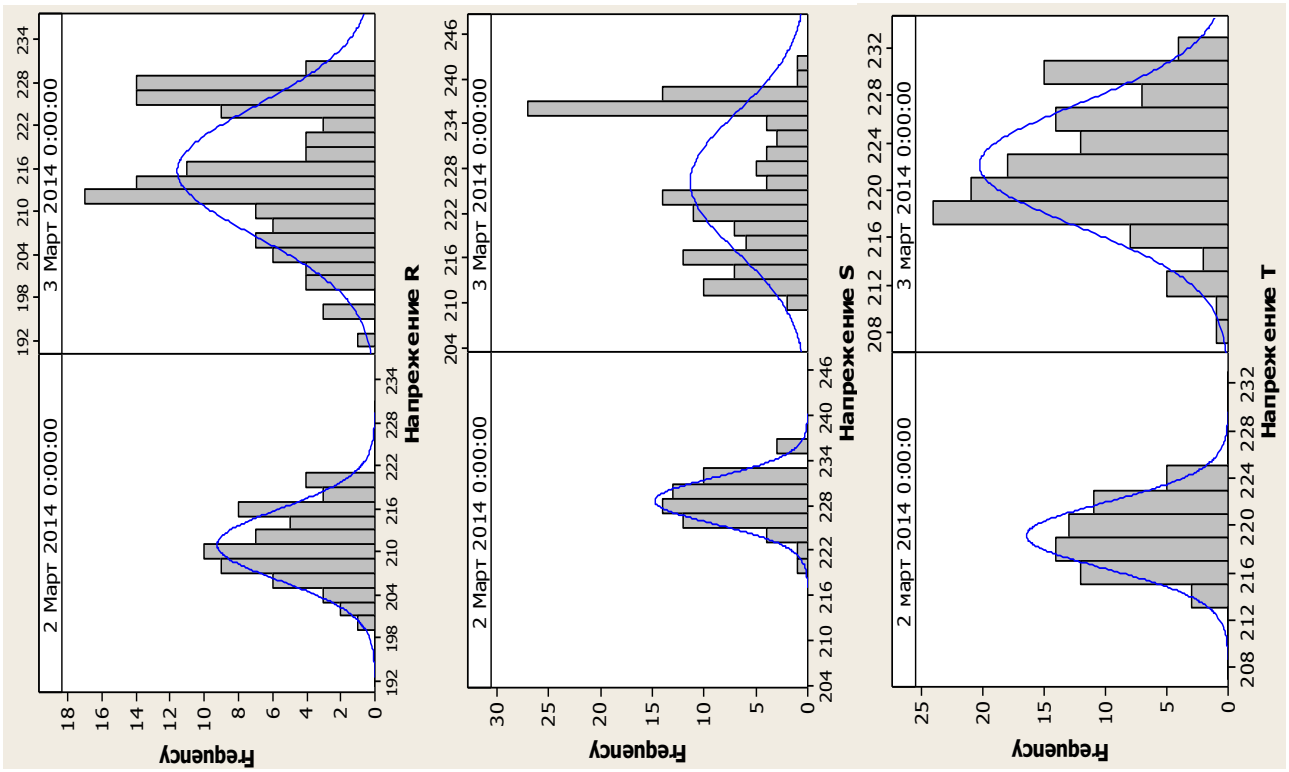
От експерименталните данни се вижда, че отклонението на напрежението е извън допустимия диапазон за фаза R в 11,1% от случаите, за фаза S само в 0,3% от случаите и за фаза T в 2,2% от случаите. Следователно стойностите на напреженията на фаза S и фаза T за 95% от периода на измерване са в допустимия диапазон $\pm 10\% U_H$ (от 207 до 253 V), регламентиран в БДС EN 50160. Отклонението на напрежението на фаза R не отговаря на изискванията, тъй като само в 88,9% от случаите е в допустимия диапазон.

За оценка на средната стойност на захранващото напрежение е направена статистическа обработка на измерените стойности за фази R, S и T.

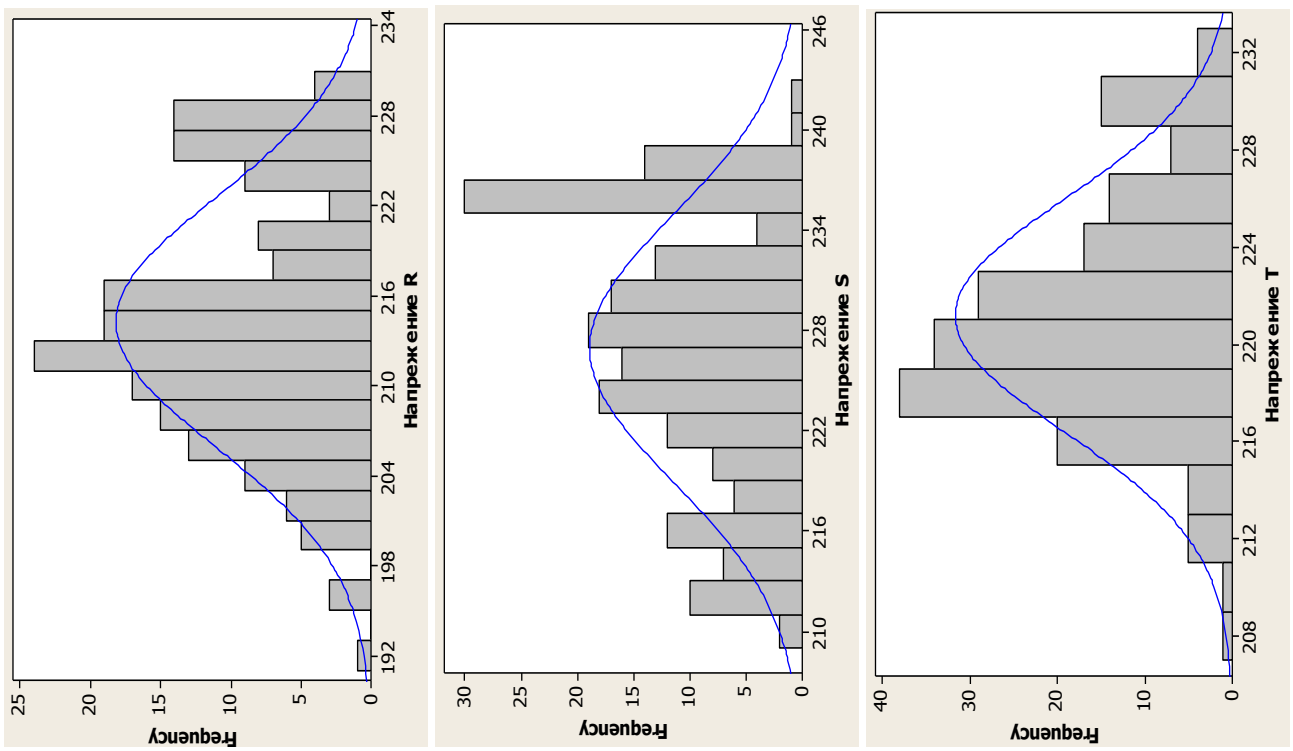
Разглежда се периода от 02.03.2014 г. до 03.03.2014 г. Това са работен и неработен ден, като целта е да се анализира захранващото напрежение в дни с различно натоварване. На фиг.2 са показани хистограми на напрежението за всеки от двата дни по фази. На фиг.3 са показани хистограмите на напрежението общо за двата дни. Обемът на извадката е N=190 стойности.

От извършения анализ може да се обобщи, че в неработен ден разпределението на отклонението на напрежението е по-близо до нормално разпределената случайна величина, отколкото в работен ден за изследваната контролна точка.

В табл.2 са дадени определените средни стойности $U_{ср}$ и средноквадратично отклонение σ на захранващото напрежение за всеки от разглежданите дни и общо за двата дни.



Фиг.2. Хистограми на напрежението по фази за 02.03 и 03.03.2014 г.



Фиг.3. Хистограми на напрежението по фази общо за двата дни.

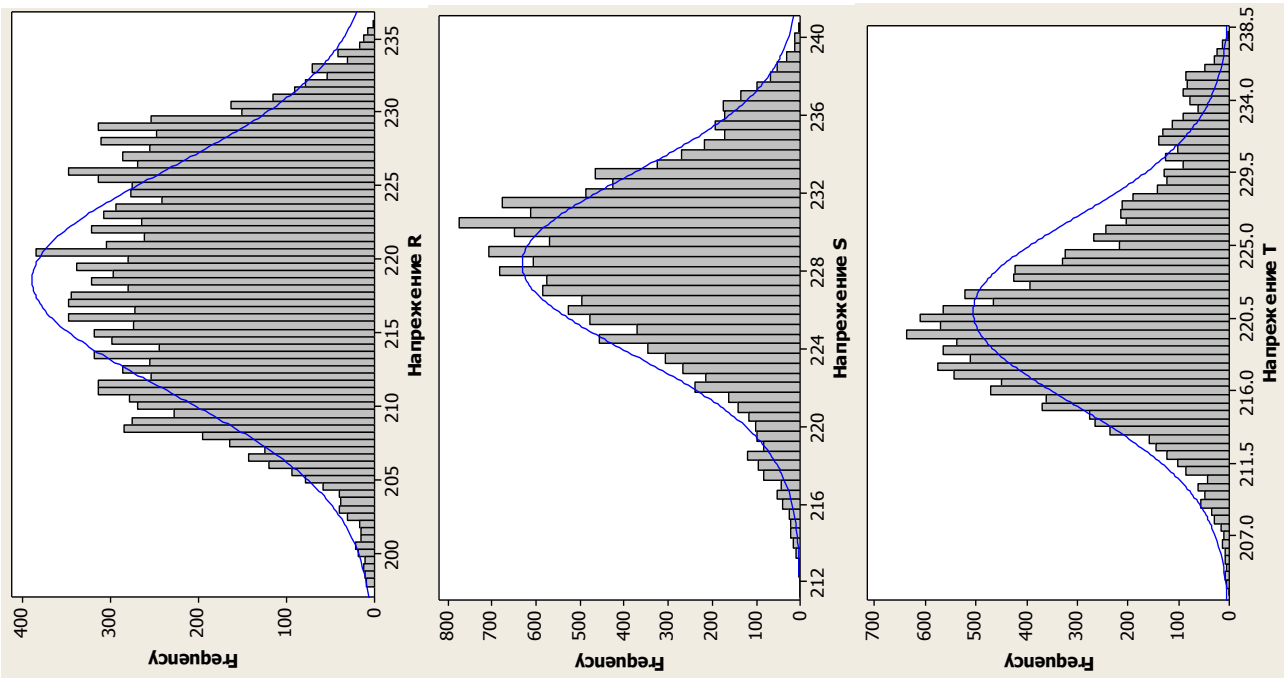
На фиг.4 са показани хистограми на захранващото напрежение за целия период на измерване от 28.02.2014 до 07.03.2014 г., като са използвани всички записани

стойности - извадка от N=14655 стойности. И в този случай може да се приеме, че разпределението на напрежението е най-близко до нормалното разпределение.

Таблица 2

	02.03.2014 г.			03.03.2014 г.			общо за 02.03 и 03.03.2014 г.		
	фаза R	фаза S	фаза T	фаза R	фаза S	фаза T	фаза R	фаза S	фаза T
$U_{ср}$, V	211	228,7	219,1	215,6	226,1	222,1	214,2	226,9	221.2
σ, V	5,012	3,138	2,817	9,103	9,306	5,193	8,347	8,024	4,788
N, броя	58	58	58	132	132	132	190	190	190

В табл.3 са дадени определените средни стойности $U_{ср}$ и средноквадратично отклонение σ на захранващото напрежение за целия период на измерване.



Фиг.4. Хистограми на напрежението за целия период на измерване.

Краткотрайни спадания и пренапрежения на захранващото напрежение не се наблюдават. Измерените стойности на несиметрията на напрежението са в диапазона от 0,2 до 3,45%. Измерени са само 0,9% стойности на несиметрията на напрежението, които са по-големи от допустимата стойност от 2%. В 99,1% от периода на измерване, измерените стойности са в допустимия диапазон.

Таблица 3

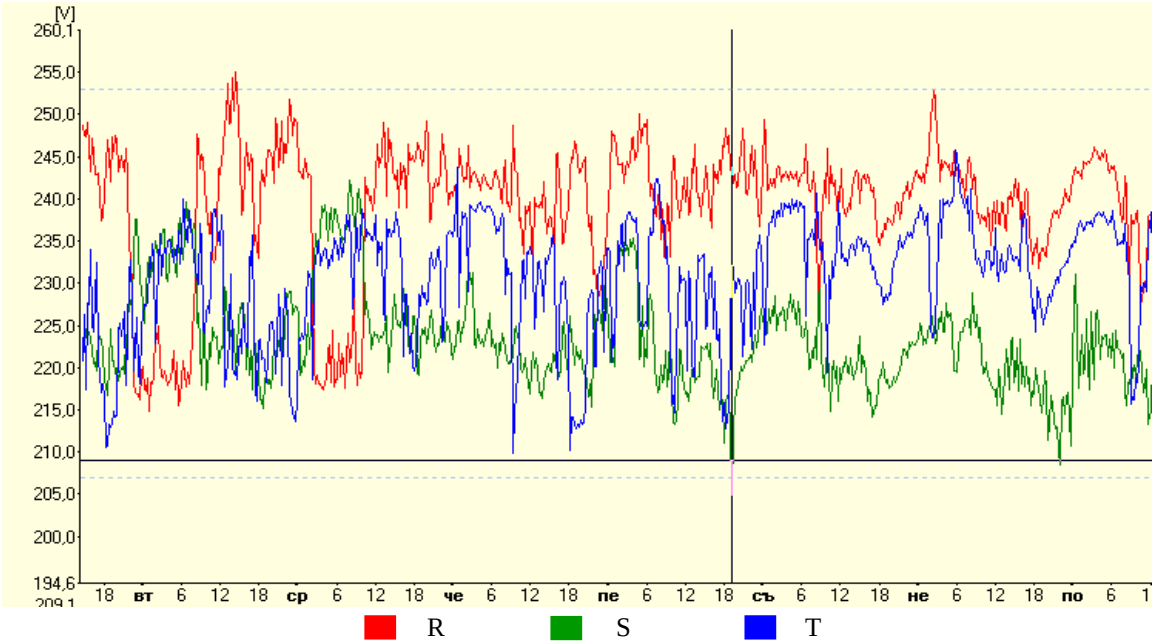
	фаза R	фаза S	фаза T
$U_{ср}$, V	218,6	228,4	220,9
σ, V	7,520	4,632	5,775
N, броя	14655	14655	14655

4. ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ В к.т. 2

Изследването е проведено в периода от 14,30 часа на 30.12.2013 г. до 12.10 часа на 06.01.2014 г.

Честотата на захранващото напрежение за периода на измерване е почти постоянна, със средна стойност за периода на измерване 50 Hz. Максималната стойност на честотата е 50.05 Hz, а минималната е 49.95 Hz. Максималното отклонение на честотата е 0,05 Hz (0,1%). Следователно 100% от измерените стойности на честотата на захранващото напрежение са в допустимата норма от 50Hz ± 1% (49,5 Hz до 50,5 Hz) [1, 2].

На фиг.5 е показано изменението на ефективните стойности на фазните напреженията за периода на измерване - за фази R, S и T.



Фиг.5. Ефективни стойности на фазните напрежения в к. т. 2

Таблица 4

Величина	Фаза	Стойност	
		Минимална	Максимална
U, V	R	214,5	256,2
	S	205,6	243,6
	T	208,7	246,0

В табл.4 са дадени минималната и максималната стойност на фазните напрежения. Максималното отклонение на напрежението е: 11,4% за фаза R, -10,6% за фаза S и 6,9% за фаза T.

От експерименталните данни се вижда, че отклонението на напрежението е извън допустимия диапазон за фаза R в 0,5% от случаите, за фаза S в 0,2% от случаите и за фаза T в 0% от случаите. Следователно стойностите на напреженията и на трите фази за 95% от периода на измерване са в допустимия диапазон $\pm 10\% U_H$ (от 207 до 253 V), регламентиран в БДС EN 50160.

Таблица 5

Величина	Фаза	Стойност	
		Минимална	Максимална
$\mathbf{P_{lt}}$	R	0,24	1,00
	S	0,96	2,08
	T	0,35	1,26

Краткотрайни спадания и пренапрежения на захранващото напрежение не се наблюдават. Краткотрайните изменения на напрежението се оценяват по стойността на фликера и неговата строгост за дълъг интервал от време P_{lt} .

В табл.5 са дадени минималната и максималната стойност на фликера за отделните фази. Вижда се, че в 0% за фаза R, в 33,3% за фаза S и в 33,3% за фаза T измерените стойности на фликера са над допустимата стойност 1, нормирана в БДС EN 50160. Следователно, стойностите на фликера, с изключение на фаза R са извън допустимата норма (95% от стойностите не трябва да надвишават 1), което е предпоставка за влошаване на качеството на захранващото напрежение и от тук нормалната и пълноценна работа на електрическите съоръжения на захранваните потребители. Измерените стойности на несиметрията на напрежението са в диапазона от 0,22 до 3,13%. 20,7% от измерените стойности на несиметрията на напрежението са над допустимата стойност от 2%, и само 70,9% са в допустимия диапазон (при норма от 95% от стойностите).

Измерените стойности на общото хармонично изкривяване на фазните напрежения е в диапазона от 2,62% до 5,14% за фаза R, от 2,61% до 5,79% за фаза S и от 3,47% до 6,11% за фаза T. Следователно в 100% от случаите големината на общото хармонично изкривяване на захранващото напрежение не превишава допустимата норма от 8%.

Таблица 6

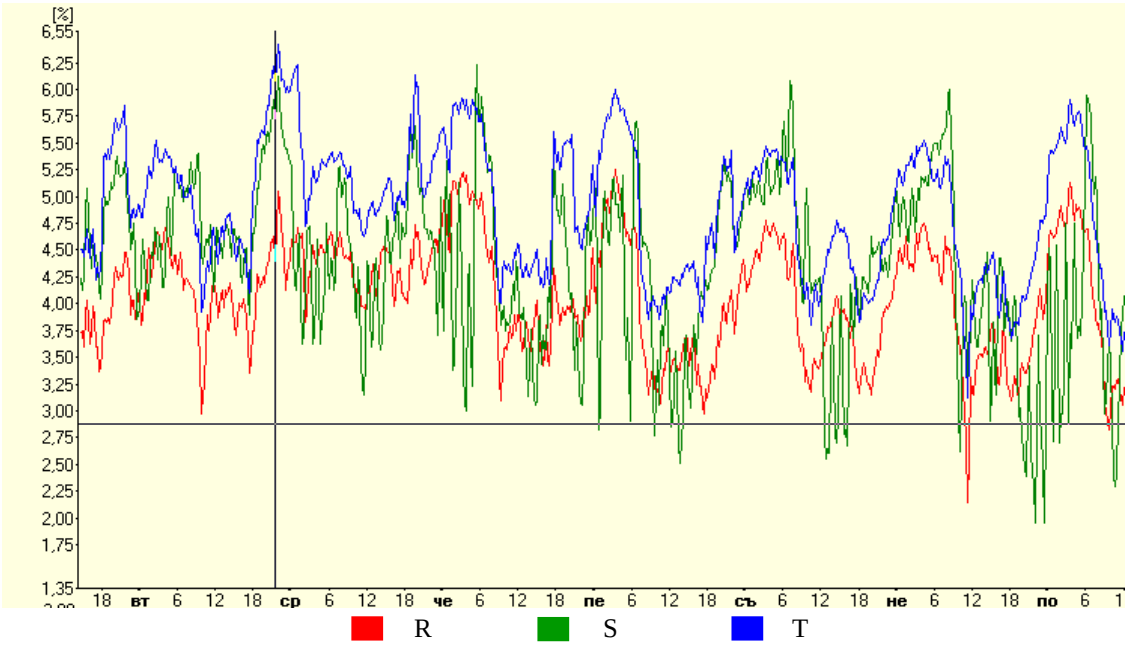
Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		R	S	T
3	5,0	**5,15**	**5,73**	**6,07**
5	6,0	1,20	2,10	1,30
7	5,0	1,10	0,90	1,05
9	1,5	1,00	1,25	1,00
11	3,5	0,70	1,05	0,85
13	3,0	0,55	0,60	0,45
15	0,5	**0,75**	**0,50**	**0,50**
17	2,0	0,30	0,25	0,20
19	1,5	0,25	0,25	0,30
21	0,5	0,20	0,25	0,15
23	1,5	0,20	0,20	0,15
25	1,5	0,20	0,20	0,20

Таблица 7

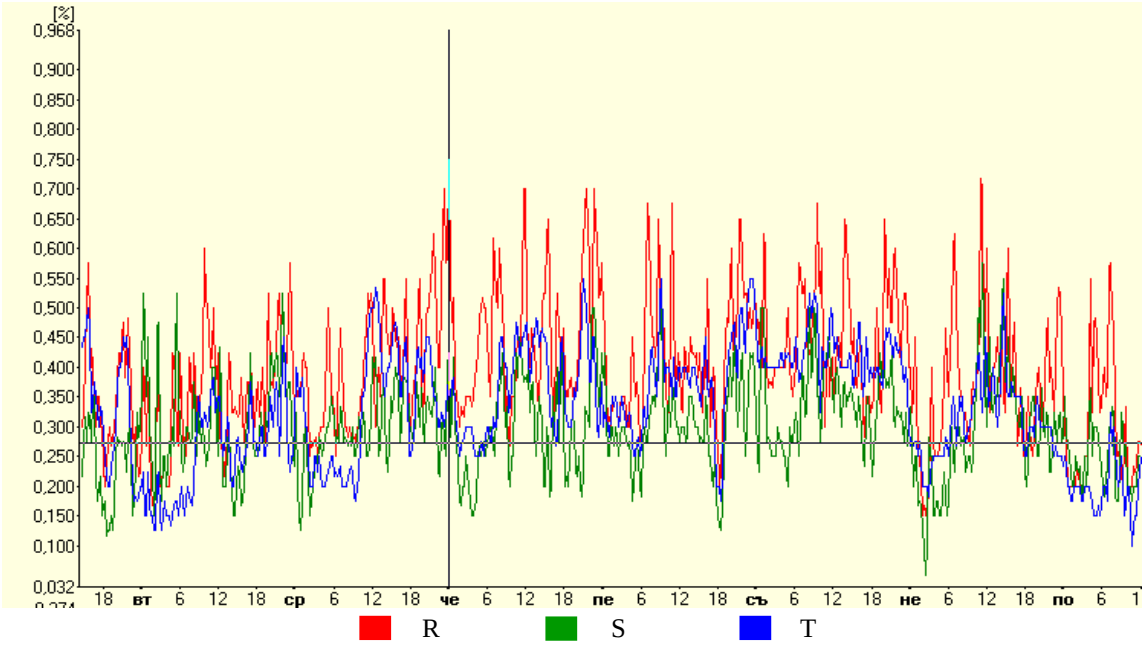
Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		R	S	T
2	2	0,10	0,20	0,20
4	1	0,10	0,15	0,15
6	0,5	0,05	0,10	0,05
8	0,5	0,25	0,10	0,25
10	0,5	0,25	0,15	0,15
12	0,5	0,20	0,15	0,10
14	0,5	0,15	0,20	0,10
16	0,5	0,10	0,05	0,15
18	0,5	0,05	0,10	0,05
20	0,5	0,05	0,05	0,05
22	0,5	0,10	0,05	0,05
24	0,5	0,10	0,10	0,10

В табл.6 и табл.7 са дадени съответно измерените максимални стойности на нечетните и на четните хармоници на напрежението, както и допустимата им стойност. Всички измерени стойности, на хармониците на напрежението, с изключение на 3^{ти} и 15^{ти} хармоник, са много по-ниски от допустимите норми дадени в БДС EN 50160.

На фиг.6 е показано изменението на 3^{ти} хармоник на напрежението, а на фиг.7 - на 15^{ти} хармоник на напрежението. От направеното измерване се установи, че измерените стойности на 3^{ти} хармоник в 3,8% от случаите за фаза R, в 26,5% за фаза S и в 46,3% за фаза T са по-големи от нормата от 5% дадена в БДС EN50160. Измерените стойности на 15^{ти} хармоник в 15% за фаза R и в 1,7% за фаза S и фаза T са по-големи от нормата от 0,5%.



Фиг.6. 3^{ти} хармоник на напрежението



Фиг.7. 15^{ти} хармоник на напрежението

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

И в двете контролни точки, в които са проведени измерванията има несъответствие между измерените стойности на показателите за качество на електрическата енергия и нормите регламентирани в БДС EN 50160. В к. т. 1 извън норми е отклонението на напрежението на първа и трета фаза. В к. т. 2 извън норми са четири показателя - отклонение на напрежението, фликер, несиметрия на напрежението и несинусоидалност по отношение на нивата на 3^{ти} и 15^{ти} хармоник на напрежението.

Стойности на показателите за качеството на електрическата енергия извън нормите могат значително да нарушат работата на повечето битови консуматори. На основата на направените измервания и анализ могат да се направят следните препоръки:

- част от битовите потребители да бъдат захранени от друг трафопост, или да се увеличи мощността на захранващия трансформатор;
- да се увеличи сечението на проводниците на захранващата мрежа;
- по-добро симетриране на товара между отделните фази.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Цанев Ц., С. Цветкова, ***Качество на електрическата енергия***, София, Авангард Прима, 2011

[2] БДС EN 50160 ***„Характеристика на напрежението на електрическата енергия доставяна от обществените разпределителни електрически системи”***, 2010

[3] БДС EN 61000-2-2 ***„Електромагнитна съвместимост (EMC) Част 2-2: Околна среда. Нива на съвместимост за нискочестотни кондуктивни смущаващи въздействия и пренасяне на сигнали в обществени захранващи системи ниско напрежение”***, 2004

[4] БДС EN 61000-4-30 ***„Електромагнитна съвместимост (EMC). Част 4-30: Методи за изпитване и измерване. Методи за управляване качеството на електрическата енергия”***, 2015

[5] Tzvetkova S., V. Tzvetkova, ***Electric Energy Quality in Low Voltage Electricity Supply System***, 12th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2008, 16-18 October 2008, pp. 182-185

Автори: Светлана Цветкова, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *stzvet@tu-sofia.bg*; Ангел Петлешков, ас., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *apetl@tu-sofia.bg*; Георги Жегов, инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *gjegov@tu-sofia.bg*; Ваня Петрова, инж, ПГЖТ „Н. Вапцаров“, E-mail address: *vaniatzvet@abv.bg*

Постъпила на 19.09.2015 г. **Рецензент:** доц. д-р Н. Матанов

НЕПРЕКЪСНАТОСТ НА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕТО В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНА МРЕЖА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Светлана Цветкова

Резюме: *В доклада са дадени резултати от изследване на прекъсванията в електроразпределителната мрежа средно напрежение на район Благоевград. Направена е класификация по различни показатели и анализ на получените данни за прекъсванията. Определени са показателите за качество на електроснабдяването и е направен сравнителен анализ със стойностите регламентирани от КЕВР. В заключение са направени препоръки за подобряване на качеството и сигурността на електроснабдяването.*

Ключови думи: *показатели за качество на електроснабдяването, прекъсвания.*

ELECTRICAL SUPPLY WITHOUT INTERRUPTIONS IN MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NET

Svetlana Tzvetkova

Abstract: *The results from study of interruptions in electrical distribution net in region Blagoevgrad are presented in paper. It has been classified by various criteria and analysis of the statistics of the interruptions. Certain indicators for quality of electricity supply are determined and a comparative analysis with the nominal values specified by the regulator. Finally, recommendations are made to improve the quality and security of electricity supply.*

Keywords: *quality of electricity supply, interruptions.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електроразпределителните предприятия са задължени да доставят електрическа енергия на присъединените към техните мрежи потребители с показатели за качество регламентирани в [1, 2]. Един от показателите за качество на електрическата енергия е прекъсването на електрозахранването на потребителите. Прекъсванията биват планирани, които са свързани с планови работи, като клиентите са уведомени за това и случайни (непланирани), които са по причина на устойчиви или преходни откази на съоръжения, неправилни манипулации и др., и за които не е възможно потребителите да бъдат предварително информирани.

От своя страна случайните прекъсвания се разделят на краткотрайни, при които прекъсването е с продължителност, по-малка или равна на 3 минути и дълготрайни - прекъсвания с продължителност, по-голяма от 3 минути.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

В статията са дадени резултати от изследване на прекъсванията и причините за тях в електроразпределителната мрежа (ЕРМ) средно напрежение (СН) на район Благоевград. Направена е класификация по различни показатели и анализ на получените данни за прекъсванията. Определени са показателите за качество на електроснабдяването и е направен сравнителен анализ със стойностите регламентирани от КЕВР [2]. Изследването, анализът и статистическата обработка на данните за възникнали прекъсвания на електроснабдяването се прави с цел определяне на мерки за повишаване на надеждността на електроразпределителната мрежа и намаляване до възможния минимум на прекъсванията.

2. КЛАСИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ НА ПРЕКЪСВАНИЯТА И ПОВРЕДИТЕ

На територията на район Благоевград териториално са обособени пет оперативни центъра:

- Оперативен център Благоевград, който обслужва общините Благоевград и Симитли и на територията му са разположени 3 районни подстанции 110/20kV, 34 кабелни електропровода 20kV, 18 въздушни електропровода 20kV, 5 възлови станции 20/0,4kV, 368 трафопоста 20/0,4kV, от които 284 са градски тип (зидани и панелни), 54 мачтови, 15 вградени, 13 БКТП и 2 МКТП;
- Оперативен център Сандански, който обслужва общините Сандански, Кресна и Струмяни и на територията му са разположени 2 районни подстанции 110/20kV, 10 кабелни електропровода 20kV, 25 въздушни електропровода 20kV, 449 трафопоста 20/0,4kV;
- Оперативен център Петрич, който обслужва община Петрич и на територията му са разположени 1 районна подстанции 110/20kV, 16 кабелни електропровода 20kV, 10 въздушни електропровода 20kV, 385 трафопоста 20/0,4kV;
- Оперативен център Разлог, който обслужва общините Разлог, Банско, Якоруда и Белица и на територията му са разположени 3 районни подстанции 110/20kV, 32 кабелни електропровода 20kV, 20 въздушни електропровода 20kV, 599 трафопоста 20/0,4kV;
- Оперативен център Гоце Делчев, който обслужва общините Гоце Делчев, Гърмен, Сатовча и Хаджидимово и на територията му са разположени 2 районни подстанции 110/20kV, 19 кабелни електропровода 20kV, 23 въздушни електропровода 20kV, 410 трафопоста 20/0,4kV.

Разпределителната мрежа СН на район Благоевград е изградена основно на 20kV, тук липсват 6 и 10kV с изключение на няколко заводски мрежи собственост на потребителите. Характерно за района е присъствието на планински пресечени местности във всичките пет оперативни центъра, което обуславя голям брой изключвания от релейната защита през гръмотевичния период от годината. Общата дължина на ЕРМ 20 kV е 2797 км, като от тях 2207 км (79%) са въздушните електропроводни линии (ВЕЛ), а 593 км (21%) са кабелните електропроводни линии (КЕЛ). Най-дългата линия СН е ВЕЛ 20kV „Ел Тепе“ от подстан-

ция Сандански с дължина 93 км. Средната дължина на линиите е 12,77 км. Линията с най-много трансформаторни постове (ТП) 69 броя е ВЕЛ 20kV „Оранжерии“ от подстанция Петрич. Средният брой ТП на линия е 11.

Общият брой на подстанциите 110/20kV в експлоатация е 11, в които са монтирани 22 трансформатора с обща инсталирана мощност 638 MVA. Общият брой изводи СН е 219 и се захранват 198973 броя потребители. Общият брой на ТП е 2346.

Мрежата ниско напрежение е кабелна и въздушна. В градската част, където гъстотата на товарите е голяма, преобладава кабелната мрежа (75%). В извънградските части преобладава въздушната мрежа.

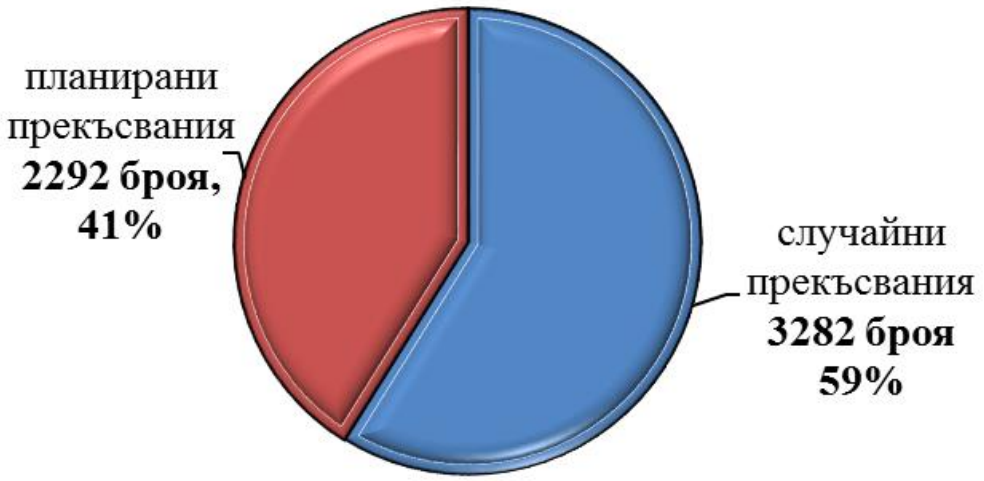
Обект на изследване и анализ е непрекъснатостта на електроснабдяването в разпределителна мрежа 20kV, експлоатирана на територията на район Благоевград за 2014 година. От извадката се получава информация за: мястото на прекъсване на електроснабдяването (подстанция, извод); вида на повредите; час на прекъсване на електроснабдяването; час на възстановяване на електроснабдяването; продължителност на прекъсването в минути; тип на прекъсването (планирано или случайно); причини, поради които е възникнало прекъсването; брой на потребителите засегнати от прекъсването на електроснабдяването; недоставена електрическа енергия, вследствие на прекъсването; метеорологичните условия в момента на прекъсването; сработили защити.

Обобщени данни за прекъсванията за 2014 г. са дадени в табл.1.

Таблица 1

Общ брой прекъсвания	5 574
Общ брой прекъснати потребители	10 620 013
Сумарна продължителност на прекъсванията, минути	509 139
Общ брой случайни прекъсвания	3 282
Сумарна продължителност на случайните прекъсвания, минути	204 006
Общ брой планирани прекъсвания	2 292
Сумарна продължителност на планираните прекъсвания, минути	305 133
Общ брой краткотрайни случайни прекъсвания	1 459
Сумарна продължителност на краткотрайните прекъсвания, минути	2 778
Общ брой дълготрайни прекъсвания	1 823
Сумарна продължителност на дълготрайните прекъсвания, минути	201 228

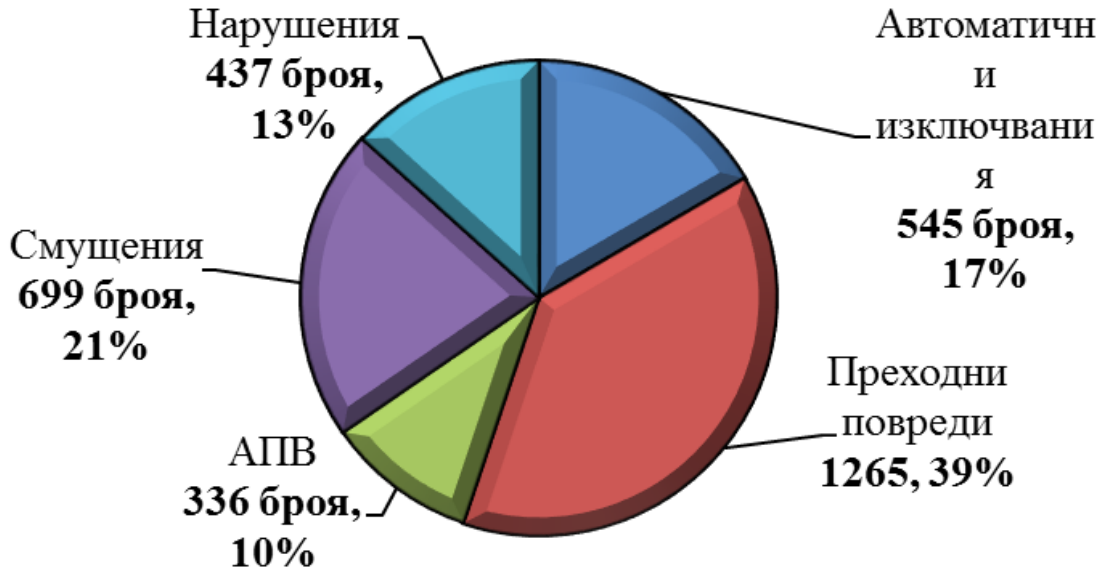
На фиг.1 е показано отношението на планираните и случайните прекъсвания на електроснабдяването. Общият им брой е 5574, като прави впечатление, че преобладават случайните прекъсвания, които са 59%, т.е. такива възникнали в резултат на непредвидени обстоятелства, докато планираните прекъсвания са 41%.



Фиг.1. Планирани и случайни прекъсвания за 2014 г.

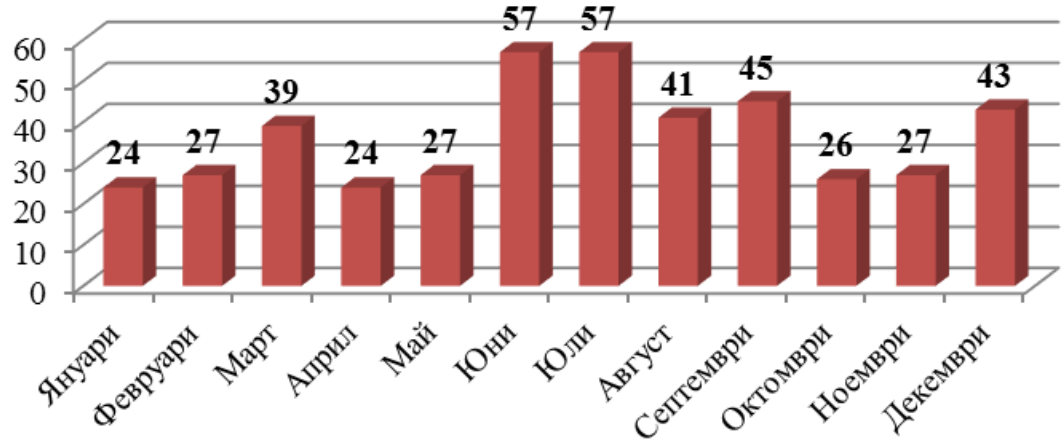
От случайните прекъсвания 1459 броя или 44,5% са краткотрайни прекъсвания и 1823 броя (55,5%) са дълготрайни. Преобладават дълготрайните прекъсвания 55,5%, т.е. прекъсвания с продължителност по-голяма от 3 минути, което се явява недостатък в процеса на електроснабдяването на потребителите с електрическа енергия и електроснабдителното предприятие би следвало да си постави за цел намаляване на процента на тези прекъсвания и повишаване на качеството на електроснабдяването на потребителите.

Случайните прекъсвания се класифицират като автоматични, преходни повреди, автоматично повторно включване (АПВ), смущения и нарушения. Както се вижда от фиг.2 най-многобройни са изключванията регистрирани като преходни повреди 39%, следват смущенията 21%, автоматичните изключвания 17%, нарушенията (това са изключвания с установена повреда) 13% и на последно място са изключванията регистрирани като АПВ 10%.



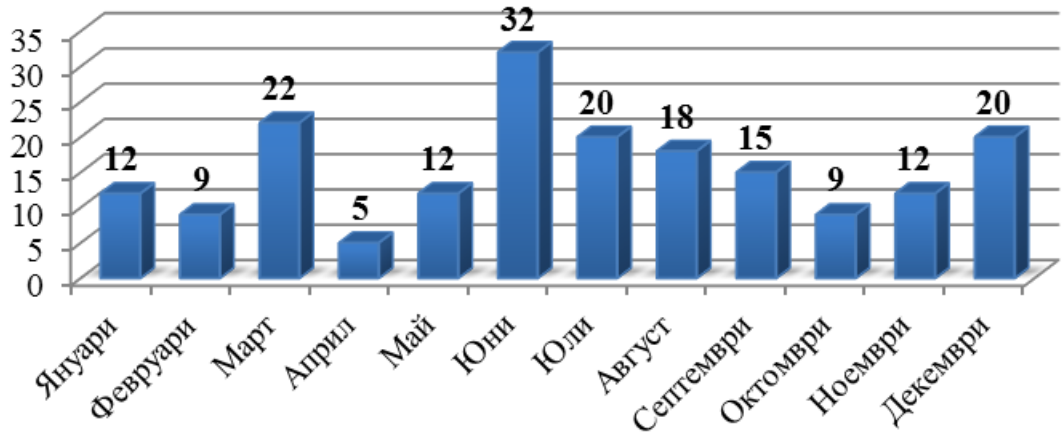
Фиг.2. Случайни прекъсвания по вид на регистрацията за 2014 г.

Тук ще се разгледат подробно регистрираните като нарушения прекъсвания, тъй като това всъщност са установените повреди в ЕРМ на район Благоевград.
На фиг.3 е показан броя на повредите в ЕРМ СН по месеци. Регистрирани са общо 437 броя повреди. Вижда се, че е увеличен броя на регистрираните повреди през месеците юни (57 броя) и юли (57 броя). На пръв поглед е необичайно, но трябва да се има в предвид, че лятото на 2014 г. ще се запомни като изключително влажно с многобройни гръмотевични бури, които са причина за така получените резултати.



Фиг.3. Брой повреди в ЕРМ СН за 2014 г.

На фиг.4 е показан броят на настъпилите повреди на ВЕЛ СН - общо 186. Най-голям брой повреди (32 броя) са регистрирани през месец юни.



Фиг.4. Брой повреди на ВЕЛ СН за 2014 г.

В табл.2 е показан броя и процентното съотношение на повредите на ВЕЛ според причините. 33 броя повреди са настъпили в резултат на бури, 9 броя поради паднали дървета, но основно повредите настъпват вследствие на механични повреди по елементите на електропроводите, като при регистриране на повредата не е посочена друга причина.
В табл.3 е направена класификация на повредите на ВЕЛ според повредения елемент. Най-слабото им място се оказва съединителната арматура (съединителен мост, превръзка), следват изолацията и проводниците.

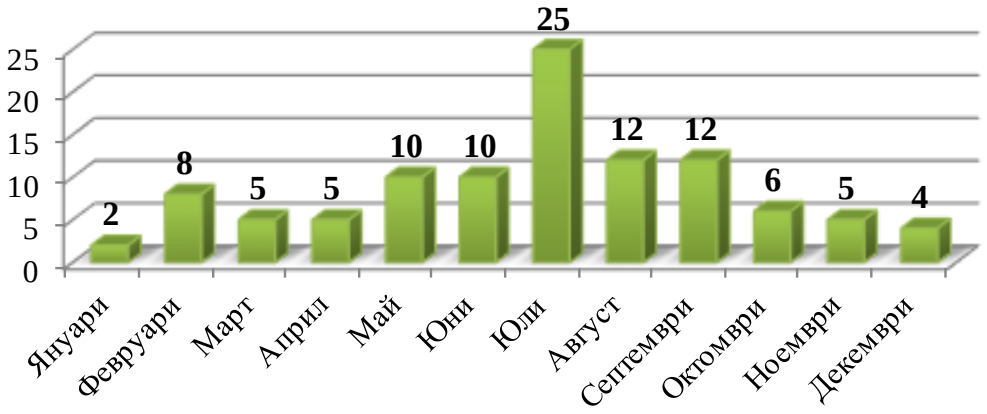
Общият брой установени повреди на КЕЛ СН, настъпили през 2014 г. е 104. На фиг.5 е показано разпределението им по месеци. С изключение на месец юли се вижда приблизително равен брой повреди с леко завишение през летните месеци, с изключение на месец юли когато са регистрирани 25 броя.

Таблица 2

Причина	Повреди	
	брой	%
Бури, мълнии, градушки	33	17,7
Кражби	1	0,54
Намеса на трета страна	7	3,80
Непреодолима сила	1	0,54
Паднали дървета	9	4,80
Повреда на елементите на ВЕЛ СН	123	66,1
Пожари	1	0,54
Проливни дъждове и наводнения	2	1,1
Птици (животни)	1	0,54
Снежни затрупвания, заледявания	7	3,80
Строителни работи	1	0,54

Таблица 3

Причина	Повреди	
	брой	%
Линейна изолация	42	22,6
Проводници	42	22,6
Съединителна арматура	50	26,9
Комутационна апаратура	35	18,8
Стълбове	10	5,3
Защита от пренапрежение	7	3,8



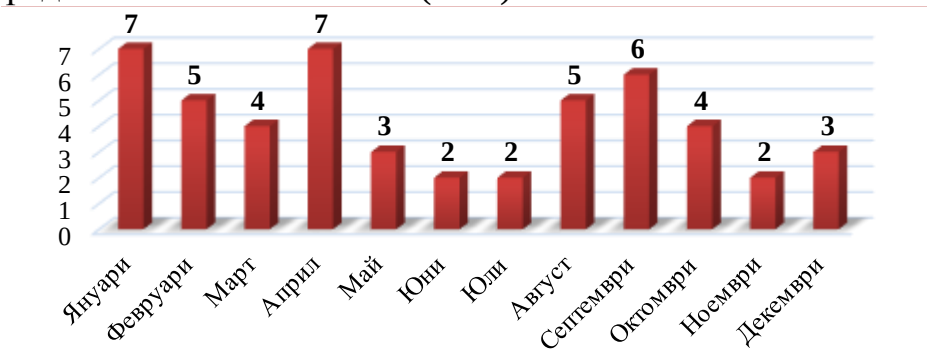
Фиг.5. Брой повреди на КЕЛ СН за 2014 година

В табл.4 е показан броя и процентното съотношение на повредите на КЕЛ според причините. 23 броя повреди са причинени при изкопни работи от трети лица, което обяснява увеличения брой повреди от фиг.5 през летните месеци. 80 броя от повредите се дължат на повреда на кабелната линия СН и само 1 брой на бури, мълнии и градушки. Основно повредите настъпват в кабелите (91 броя, 87,5%) и в по-редки случаи в кабелната арматура (кабелни глави, съединителни муфи) – 13 броя, 12,5%.

Таблица 4

Причина	Повреди	
	брой	%
Бури, мълнии, градушки	1	1,0
Повреда на кабелна линия СН	80	76,9
Строителни работи	23	22,1

На фиг.6 е показан броят на повредите настъпили през 2014 г. в ТП и възлови станции (ВСт). Най-голям е броят на повредите през месеците януари и април (по 7 броя), а най-малък през месеците юни, юли и ноември (по 2 броя).
В табл.5 е показан броят и процентното съотношение на повредите в ТП и ВСт според причините. От общо 50 повреди само 5 са причинени от намеса на трета страна, животни и течове. Всички останали повреди са причинени от механични повреди, износване, претоварване на елементите.
В табл.6 е показан броят и процентното съотношение на повредите в ТП и ВСт според повредения елемент. Най-често повредите настъпват в разединителите (28%), следват силовите трансформатори (24%), защити от пренапрежения (18%) и повреди на шинната система (14%).



Фиг.6. Брой повреди в ТП и ВСт за 2014 г.

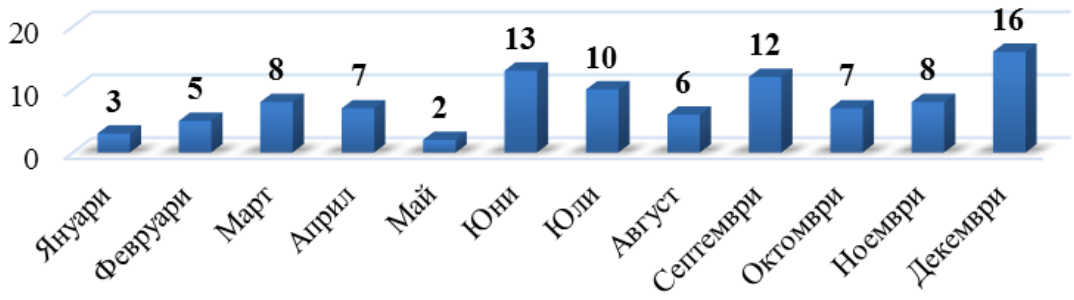
Таблица 5

Причина	Повреди	
	брой	%
Намеса на трета страна	1	2,0
Повреда в ТП и ВСт	45	90,0
Животни	3	6,0
Течове и кон-денз	1	2,0

Таблица 6

Причина	Повреди	
	брой	%
Защитни вентилни отводи, предпазители ВН	9	18,0
Измервателни трансформатори	2	4,0
Прекъсвачи	3	6,0
Разединители	14	28,0
Силови трансформатори	12	24,0
Шинна система	7	14,0
Подпорни изолатори	3	6,0

На фиг.7 са показани повредите настъпили през 2014 г. в съоръжения чужда собственост.

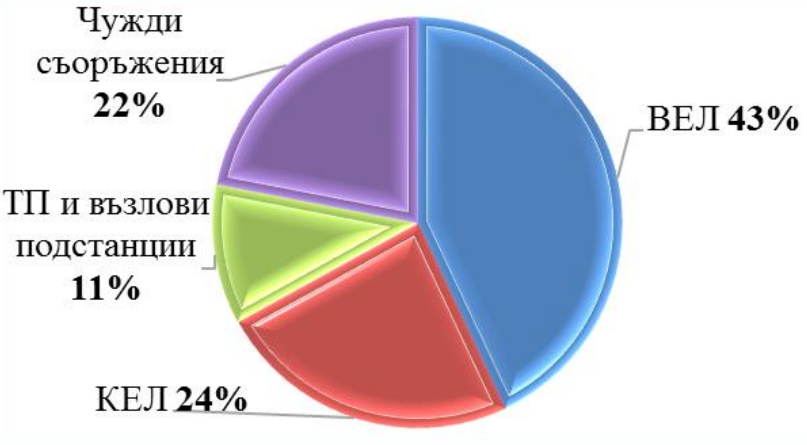


Фиг.7. Брой повреди в съоръжения чужда собственост за 2014 г.

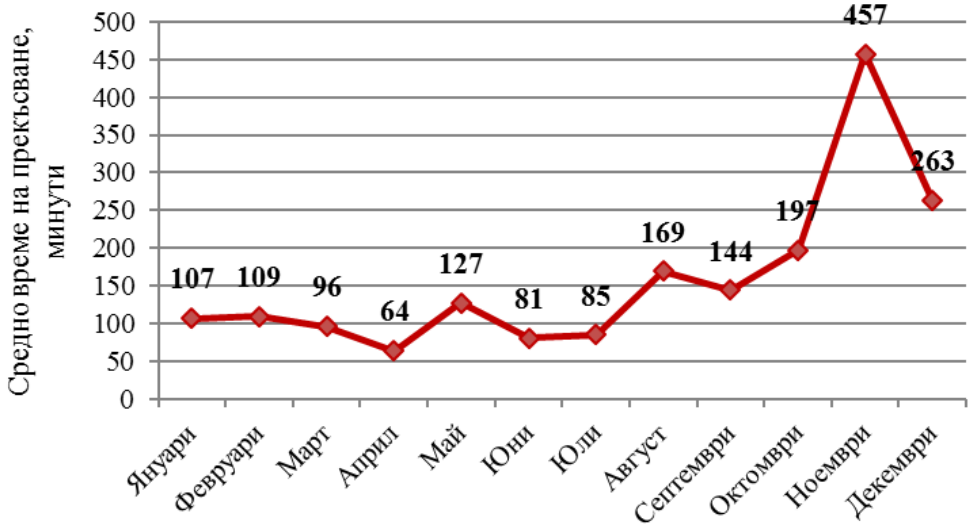
На фиг.8 е показано обобщено съотношението на повредите в проценти според типа на съоръжението. Вижда се, че най-голям процент повреди настъпват във ВЕЛ 43%, следвани от КЕЛ 24%. Голям е процента и на повредите в чуждите съоръжения 22%, въпреки че техния брой е значително по-малък. Това се дължи на липсата на квалифициран обслужващ персонал, не добрата поддръжка и експлоатация. Повредите в ТП и ВСт са 11%.

На фиг.9 са показани средните времена на прекъсванията в ЕРМ СН по месеци за 2014 година. През месеците ноември и декември е най-голяма средната продължителност на прекъсванията, съответно 457 и 263 минути. Средното време на прекъсване за 2014 година е 150,7 минути.

В табл.7 са дадени броя на прекъсванията, сумарните и средните времена на прекъсвания за 2014 г., за отделните съоръжения.



Фиг. 8. Повреди според типа на съоръжението.



Фиг.9. Средно време на прекъсване по месеци за 2014 г.

Таблица 7

Съоръжение	Сумарно време на прекъсване, мин.	Прекъсвания, бр.	Средно време на прекъсване, мин.
ВЕЛ	32 324	186	174
КЕЛ	12 394	104	119
ТП и ВСт	5 147	50	103
Чужди съоръжения	15 986	97	165
Общо	65 851	437	151

3. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОКАЗАТЕЛИТЕ ЗА КАЧЕСТВО НА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕТО

Индексът на средната честота на прекъсванията SAIFI и индексът на средната продължителност на прекъсванията SAIDI се определят по формулите

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^{m} n_i}{N}, \text{ броя/година} \quad (1)$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^{m} t_i n_i}{N}, \text{ минути,} \quad (2)$$

където: n_i е броят абонати, засегнати при i-тото прекъсване; N - общият брой на присъединените клиенти; m - броят на прекъсванията, t_i - времетраенето на i-тото прекъсване. В табл.8 са дадени резултатите от изчисленията за двата показателя за прекъсванията, съответно за случайни и планирани прекъсвания, при 198 973 потребители за 2014 г., както и препоръчителните стойности на SAIFI и SAIDI за 2014 г. [2].

Таблица 8

Период	Случайни прекъсвания		Планирани прекъсвания	
	SAIFI, бр./год.	SAIDI, мин.	SAIFI, бр./год.	SAIDI, мин.
I тримесечие	1,28	76,64	0,90	89,82
II тримесечие	1,82	69,62	1,62	174,23
III тримесечие	3,19	146,60	2,11	275,51
IV тримесечие	1,88	90,28	1,02	94,79
Общо за 2014	**8,16**	**383,14**	**5,64**	**634,35**
Норма за 2014	**3,45**	**184,4**	**5,15**	**290,80**

От табл.8 се вижда, че за планираните прекъсвания при норма за показателя SAIDI от 290,8 минути, реализираната стойност за региона е 634,35 минути. Това е показателно за лошото планиране на прекъсванията и не добрата координация между НЕК, ЕСО, ЧЕЗ и останалите участници в процеса. Постигнатата стойност на показателя SAIDI за случайните прекъсвания от 383,14 минути е също доста над нормата от 184,4 минути. От изключително значение за подобряване на показателя е осъвременяване на процеса по локализиране на повредите в електроразпределителната мрежа и монтиране на устройства с възможност за дистанционно управление от оператора на мрежата.

Стойността на показателя SAIFI за планираните прекъсвания е 5,64 бр./година, и се доближава до нормата от 5,15 бр./година. Не по този начин стоят нещата при показателя SAIFI за случайните прекъсвания. Вижда се, че получената стойност от 8,16 бр./година е почти двойно по-голяма от нормата от 3,45 бр./година. Необходимо е да се направи подробен анализ на случайните прекъсвания класифицирани като смущения, при които няма установена повреда. Както се вижда от фиг.2 броят им през 2014 г. е значителен (699 броя), което донякъде е причина за лошите показатели.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на прекъсванията и повредите в електроразпределителната мрежа СН, експлоатирана на територията на район Благоевград за 2014 г., показва голям брой прекъсвания и повреди в съоръженията, както и значителни загуби от недоставена електрическа енергия. Основни причини са механичните повреди по електрическите съоръжения, както и повреди причинени от къси съединения и претоварвания.

За повишаване на качеството на електроснабдяване на крайния потребител, е нужно да се вземат мерки, които да ограничат броя на повредите и прекъсванията в ЕРМ СН, намаляване на средното време за възстановяване на снабдяването с електрическа енергия, както и намаляване на броя на засегнатите от прекъсванията потребители.

За да се намалят повредите във ВЕЛ СН, е необходимо да се заменят всички износени и остарели механични части по електропроводите, да се осигури по-добрата им експлоатация и по-добро поддържане.

За намаляване на повредите в КЕЛ СН би спомогнало закупуването и използването на нова техника за откриване и локализиране на повредите в тях. Осигуряването на по-добра експлоатация на КЕЛ, както и по-добро поддържане, също би допринесло за ограничаване на повредите в тези съоръжения.

Модернизацията на електрическите съоръжения, използвани в ТП и ВСт, както и тяхното автоматизиране, ще намали броя на повредите в тях, както и времето за отстраняването им.

Повишаването на контрола върху съоръженията и създаване на условия за непримиримост към посегателствата върху електросъоръженията и към скритото ползване на електрическа енергия, би ограничило повредите, настъпили поради кражба.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Цанев Ц., С. Цветкова, ***Качество на електрическата енергия***, София, Авангард Прима, 2011.

[2] ДКЕВР, ***Методика за отчитане изпълнението на целевите показатели и контрол на показателите за качество на електрическата енергия и качество на обслужването на мрежовите оператори, обществените доставчици и крайни снабдители***, 2010-2013

[3] Цветкова С., И. Георгиев, А. Петлешков, Ц. Цанев, В. Петрова, ***Изследване на повредите в електроразпределителна мрежа средно напрежение***, Енергиен форум 2012, 13-17 юни 2012, Варна, стр. 318-329

Автор: Светлана Цветкова, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *stzvet@tu-sofia.bg*

Постъпила на 19.09.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р В. Господинов

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА МИНИМИЗИРАНЕ НА ДИСПЕРСИОННАТА СЪСТАВЯЩА НА ЗАГУБИТЕ НА МОЩНОСТ И ЕЛЕЛКТРОЕНЕРГИЯ В РУДНИК „ТРОЯНОВО 2“

Румен Киров, Никола Македонски, Владимир Чиков, Николай Найденов, Илиян Илиев

Резюме: *В работата са изследвани възможностите за минимизиране на дисперсионната съставяща на загубите на мощност и електроенергия. Чрез използване на корелационно-резонансен метод е минимизирана дисперсионната съставяща на груповия товаров график на активната мощност, което води до намаляване на загубите на активна мощност.*
Ключови думи: *загуби на мощност, корелационно-резонансен метод, електроенергийна ефективност*

STUDY OF OPPORTUNITIES FOR THE DISPERSION COMPONENT MINIMIZING OF THE POWER AND ENERGY LOSSES IN MINE TROYANOVO 2

Rumen Kirov, Nikola Makedonski, Vladimir Chikov, Nikolay Naydenov, Ilian Iliev

Abstract: *In the work some methods for the dispersion component minimizing of the power and energy losses are examined. The dispersion component of the group load profile of active power is minimized by use of a correlation-resonance method. This reduces the active power losses.*

Keywords: *power losses, correlation-resonance method, energy efficiency*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

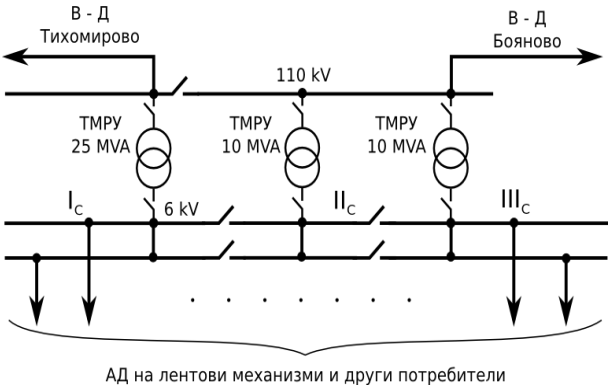
В енергийния възел Мини „Марица – изток“ АД, в радиус около 30 км, е съсредоточено около 30% от производството на електроенергия в Р. България. Тук са разположени три електроцентрали – ТЕЦ1, ТЕЦ2 и ТЕЦ3. Пренасянето на електроенергията се осъществява от въздушни електропроводи с дължина от 2 до 60 км. Разпределението се реализира от 18 подстанции, свързани в един енергиен пръстен. Всички те са захранени непосредствено от генераторните шини на централите. Технологичния цикъл в мините е разделен на три, като всяка част се обслужва от отделен рудник – Рудник 1, Рудник 2 и Рудник 3.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

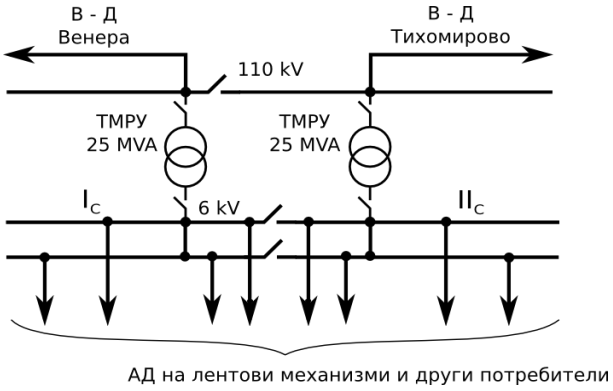
ISSN 1311-0829

2. СХЕМОТЕХНИЧЕСКИ ОСОБЕНОСТИ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ОБЕКТ И ДАННИ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА

По-голяма част от консуматорите в „Марица-Изток“ АД са мощни асинхронни двигатели и трансформатори, с потребление около половината на общата реактивна мощност. От подстанция „Гипсово“ и „Гледачево“ (фиг.1 и фиг.2) се захранват мобилни насипообразователи на рудник „Трояново 2“, като четири- и петлентовите механизми се задвижват от АД тип DSRCI – 500 kW, DSRCI – 280



Фиг.1*: Схема на п/ст Гледачево*



Фиг.2*: Схема на п/ст Гипсово*

kW и DSRC – 315 kW, обособени в три групи (табл.1).

В продължение на 90 дни в изследвания обект са измерени активните и реактивните товари и cos φ в денонощен разрез. В табл.2 са представени осреднени часови данни за $P_{ср}$ [MW], $Q_{ср}$ [MVAr], cos $\varphi_{ср}$ и съответните дисперсии за зимните месеци X(октомври), XI(ноември) и XII(декември), за трите групи насипообразователи, захранени от двете подстанции.

Таблица 1

I-ва група	II-ра група	III-та група
Два петлентови насипообразователя	Два петлентови насипообразователя	Три четирилентови насипообразователя
10 бр. АД DSRC 315 kW	2 бр. АД DSRC 500 kW 8 бр. АД DSRC 315 kW	4 бр. АД DSRC 500 kW 4 бр. АД DSRC 280 kW

Таблица 2

п/ст Гипсово				п/ст Гледачево		
Месеци	X	XI	XII	X	XI	XII
$P_{ср}$ [MW]	3,38	3,92	4,18	4,42	4,74	2,55
$Q_{ср}$ [MVAr]	3,62	4,27	4,38	4,85	5,02	2,88
cos $\varphi_{ср}$	0,68	0,67	0,65	0,64	0,64	0,61
D_P [MW]	1,14	1,59	1,56	1,52	1,74	1,18
D_Q [MVAr]	1,21	1,83	1,87	1,69	1,85	1,14
$D_{cos\ \varphi}$	0,038	0,029	0,054	0,058	0,066	0,074

Анализът показва, че трите изследвани параметъра се изменят в доста широки граници съответно : P = 0,28 ÷ 9,55 MW; Q = 0,55 ÷ 9,60 MVAr; cos φ = 0,42 ÷ 0,79, което се потвърждава и от доста големите стойности на дисперсиите, представени в табл.2. Това обуславя повишени дисперсионни загуби на мощност $\Delta P_Д$ и ЕЕ $\Delta W_Д$, определени с помощта на изразите [1, 2] :

$$\Delta P_Д = 3RD_I \text{ [kW]} ; \quad \Delta W_Д = 3RTD_I \text{ [kWh]} .$$

3. ПРИЛАГАНЕ НА КОРЕЛАЦИОННО-РЕЗОНАНСНИЯ МЕТОД

Ефективен метод за намаляване на $\Delta P_Д$ и $\Delta W_Д$, е разместване на началата на времената за започване на работа на различните групи потребители от табл.1. Всъщност задачата е да се организира такъв режим на съвместна работа на трите съоръжения, при който груповия товаров график (ГПТ), получен при наслагване на индивидуалните ТГ ще има минимална неравномерност, т.е. минимална дисперсия, определени по формулата [1] :

$$D_P = \sum_{i=1}^{3} D_{P_i} + 2\sum_{i<j} K_{P_{ij}} \qquad (1)$$

където: D_{P_i} - дисперсия на ТГ $P_i(t)$ (i = 1, 2, 3 – за трите групи насипообразователи); $K_{P_{ij}}(t_{ij})$- взаимнокорелационни моменти на ТГ на $i^{-та}$ и $j^{-та}$ група, които съвпадат с взаимнокорелационната функция (ВКФ) при $\tau = t_{ij}$; t_{ij} – разместване във времето между ТГ $P_i(t)$ и $P_j(t)$, т.е. интервал между моментите на включване на $i^{-та}$ и $j^{-та}$ група насипообразователи.

От израза (1) се вижда, че първото слагаемо не зависи от разместването t_{ij} , т.е. от режима на съвместна работа на трите насипообразователи, като неговото намаляване може да стане само с изменение на технологичния процес, което тук не се разглежда (приема се $D_{P_i} = const.$).

Следователно намаляването на D_P се реализира, чрез втората сума от формула (1), която се нарича корелационна съставяща :

$$D_k(t_{ij}) = 2\sum_{i<j} K_{P_{ij}}(t_{ij}) \qquad (2)$$

В съответствие с израза (1), минимална стойност на $D_k(t_{ij})$ е стойността

$$D_k = -\sum_{i=1}^{3} D_{P_i} \qquad (3)$$

т.к. максимума от ефекта на изравняване на ТГ на активната мощност P(t), е достигане до P(t) = const., при което D[P(t) = const.] = 0, откъдето и следва това твърдение.

Средночасовата стойност (математическото очакване) $P_{ср}$ на груповия товаров график за активната мощност на двете подстанции за трите зимни месеца в денонощен разрез е $P_{ср}$ = 3,86 [MW], а дисперсиите на отделните групи насипообразователи и за груповия товаров график, също в денонощен разрез, са съот-

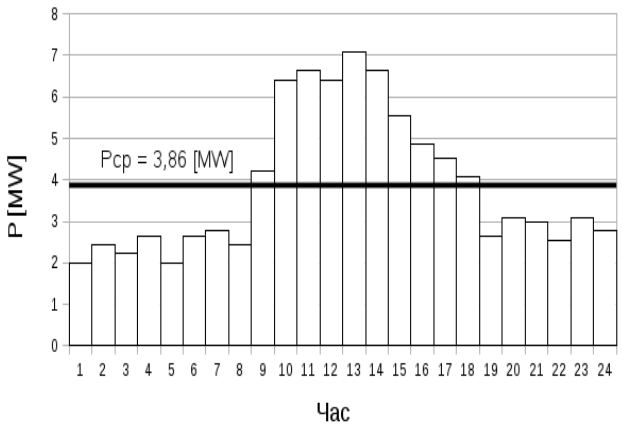
ветно : D_{P1} = 1,23 [MW] ; D_{P2} = 1,54 [MW] ; D_{P3} = 1,76 [MW] и $D_{P\Sigma}$ = 1,68 [MW]. Взаимно-корелационните функции на ТГ за трите изследвани групи се определят с помощта на израза :

$$K_{P_{ij}}(l) = \frac{1}{n-l}\sum_{i=1}^{n-l}\left(P_i - P_{cp_i}\right)\left(P_{i+l} - P_{cp_j}\right) \qquad (4)$$

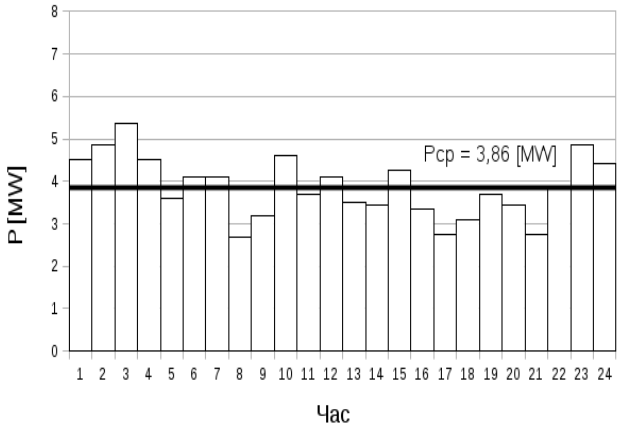
където : n = 24 – дискретизация при 24 часов товаров график ; P_i и P_j – стойности на активния товар в момента t за съответния товаров график ; l = 1, 2, 3, ..., (n – 1).

С помощта на израза (4) са направени изчисления и е установено, че най-голямата отрицателна стойност на ВКФ е в 11 часа от денонощието и е за графиците на първа и втора група (петлентовите насипообразователи). Следователно, в съответствие с израза (3), първата стъпка за изравняване на груповия товаров график е да се разместят графиците за P_1 и P_2 през 11 часа. Втората по големина отрицателна стойност на ВКФ определена с помощта на израза (4), се отнася за втори P_2 и трети P_3 товаров график и е в 15 часа. Така че, товаровия график на първа, втора и трета група трябва да разместят както следва : вторият от първият на 11 часа, третият от втория на 15 часа и третият от първият на 15 + 11 = 26 часа, т.е. на 2 часа.

На фиг.3 и фиг.4 са показани груповите товарови графици преди разместването и след разместването. Стойностите на дисперсията след разместването $D_{P\Sigma}$ = 0,538 [MW], т.е. тя е намаляла 1,68 / 0,538 = 3,12 пъти. Със толкова всъщност се намаляват и загубите на активна мощност от дисперсията на груповия товаров график.



Фиг.3: *Преди разместване на ТГ.*



Фиг.4: *След разместване на ТГ.*

Необходимо е да се отбележи, че изменението на дисперсията на товара не променя неговата средна стойност, т.е. полезно консумираната ел. енергия е една и съща и за двата случая.

Опитът от експлоатацията на лентовите багери показва, че те преобладаващо работят с товарови графици, идентични с тези от това изследване. Следователно направените препоръки са в голяма степен целесъобразни и тяхното осъществяване ще доведе до добър технико-икономически ефект.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното изследване и направените препоръки показват, че в ЕСС на промишлени обекти могат да се използват подходящи организационни мероприятия, неизискващи разходи за технически средства, които водят до постигане на добра икономическа ефективност. Чрез използване на корелационно-резонансен метод е минимизирана дисперсионната съставяща на груповия товаров график на активната мощност, което води до намаляване на загубите на активна мощност.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Гордеев В. И. (1996), *Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей*, М., Энергоатомиздат, 1996.

[2] Василев Р. Н. (2003), *Изследване възможностите за подобряване ефективността на ЕСС на промишлени обекти в режим на непълно натоварване*, Дисертация, Варна, 2003.

Автори: Румен Киров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“, ТУ-Варна, E-mail address: *roumen.kirov@tu-varna.bg* ; Владимир Чиков, гл. ас. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“, ТУ-Варна, E-mail address: *vladimir_128@abv.bg* ; Никола Македонски, ас. инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“, ТУ-Варна, E-mail address: *n.makedonski@tu-varna.bg* ; Николай Найденов, маг. инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“, ТУ-Варна, директор индустрия Schneider Electric, E-mail address: *nikolay.naydenov@schneider-electric.com* ; Илиян Илиев, маг. инж., Energy and Water Regulation Commission - София, E-mail address: *itr_e@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Николай Матанов

МОДЕЛ ЗА ОПТИМАЛНО ИЗПОЛЗВАНЕ НА ОБРАТИМИТЕ АГРЕГАТИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ ЧАСТ I: МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ

Димо Стоилов, Веселина Трашлиева

Резюме: *Статията представя модел за динамично планиране използването на акумулиращите мощности при електроенергиен пазар на едро, основан на почасовите предложения за цена и мощност на всички производители и на прогнозираните общосистемни товарови графици за сезонни типови денонощия. Търсените акумулирана и генерирана енергия за всеки единичен пазарен период през различните типови денонощия се представят от отделен набор променливи. Моделът отчита техническите ограничения на агрегатите и на електроенергийната система (ЕЕС) и цели максимално обществено благополучие.*

Ключови думи: *оптимално акумулиране и произвеждане на електроенергия, оптимално управление на ЕЕС, оптимални стратегии за работа*

OPTIMAL OPERATION MODEL OF THE STORAGE CAPACITIES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS PART I: MATHEMATICAL MODEL

Dimo Stoilov, Vesselina Trashlieva

Abstract: *The article presents a model for dynamic planning of the optimal operation of the storage capacities in whole sale electricity markets, based on hourly price-energy bids of the producers and forecasted system loads for seasonal typical days. Intended stored and generated energy for each single market period during typical days is presented by different sets of variables. The model considers unit's and system's technical constraints and aims at maximization of public welfare.*

Keywords: *optimal power storage and production, EPS optimal control and operation, optimal operation strategies*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Търсени величини (независими променливи) при задачата за оптимално използване на обратимите водно енергийни агрегати или акумулиращи батерии [1, 2] са работните мощности за всеки единичен пазарен интервал (час) на всеки отделен акумулатор (като генератор или като товар). Зададените величини (параметри) са почасовите общосистемни товари и почасовите предложения за цена и мощност на всички производители в ЕЕС, подреждането на които по възходяща

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

стойност представлява кривата на предлагане на електроенергия. За следващия ден те са обявените (фактически предложени) цени-мощност, а за следващите седмици са прогнозни стойности. Това прави задачата динамична (решението за единичен интервал зависи от решението за всички интервали през плановия хоризонт).

При решаване на задачата във вертикално интегрирани електроенергийни системи (ЕЕС) класическата оптимизационна цел е минимизация на оперативните разходи, което се постига при изравняване на прирастните разходи на отделните производители, коригирани с прираста на загубите в мрежата. При либерализиран централизиран електроенергиен пазар (пул или тържище/борса), предложените от производителите цени отразяват прирастните им разходи, в т.ч. очакваната от тях принадена стойност (благо) [2], [4], [5]. Пазарната цена за всеки час се определя от цената на прирастния агрегат при уравняването на търсенето и предлагането. По този начин се постига максимално обществено благополучие, което е подобно на решението при класическите вертикално интегрирани системи. Така се постига и целта за определяне на максимална принадена стойност за собственика на акумулиращите мощности.

Разработеният и описан по-долу модел позволява използване на единични интервали с различна продължителност. Моделът е предназначен както за средносрочно (месечно, годишно), така и за краткосрочно (денонощно, седмично) планиране на използването на акумулиращите мощности. Въпреки че изложението е насочено към акумулиращи мощности от ПАВЕЦ, то лесно може да бъде обобщено за произволни такива, например зареждане на електромобили.

2. ФОРМУЛИРАНЕ НА МОДЕЛА

Разглежда се ЕЕС с централизиран пазар на електрическа енергия. За всеки единичен пазарен интервал (час) е налична прогноза на кривата на предлагане от производителите, която всъщност определя еквивалентна разходна характеристика в ЕЕС [2]. Отчитайки техническите ограничения на разполагаемите акумулиращи мощности следва да се определи оптималното им натоварване като генератори и като товари. Оптимизационната цел е минимизация на разходите за закупуване не електроенергия през съответния планов период, което съответства на максимизиране на общественото благополучие.

Акумулираната и генерирана енергия през всеки единичен интервал (час, няколко часа) на всяко типово денонощие се представят в модела чрез набор от три типа променливи, всяка от които се характеризира с двойка индекси (съответно за сезон и денонощие) и друг (отделен втори) индекс за номер на единичен интервал през денонощието. Първият индекс в двойката показва сезона, към който се отнася съответното типово денонощие, а вторият - вида на денонощието (работно или почивно). В табл.1 е пояснено обозначаването на типовите денонощия чрез съответните индекси.

Табл.1.

Индексиране на типовите денонощия

Сезон/ вид денонощие	Работно денонощие - втори индекс 1	Почивно денонощие - втори индекс 2
Лято – първи индекс 1	11	12
Зима – първи индекс 2	21	22
Междинен – първи индекс 3	31	32

В модела се използват още следните означения:

j - индекс за единичен интервал от типовото денонощие i (тук индексът i приема стойностите пояснени в Таблица 1, т.е. е елемент на множеството {11, 12, 21, 22, 31, 32});

l - индекс на участък от линейната апроксимация на еквивалентната разходна характеристика (РХ) на ЕЕС;

d - продължителност на единичния интервал от типовото денонощие в часове

D_{ij} - прогноза за товара в интервала j от типовото денонощие i;

L_{ij} - брой на участъците l на линейната апроксимация на РХ за интервала j от типовото денонощие i;

B_{ij} - еквивалентен разход (лв.), определящ еквивалентната РХ на ЕЕС за интервала j за всяко i;

b_{lij} - прираст на разхода (цена за енергия) за участък l на апроксимацията на РХ за интервала j за всяко i;

P_{lij} - мощност в участъка l на апроксимацията на РХ за интервала j от типово денонощие i;

$P_{l,ij}^{\max}$ - максимална мощност в участъка l на апроксимацията на РХ за j от типово денонощие i;

P_{ij} - произведена мощност през интервала j от типово денонощие i;

v_{ij} - двоична променлива за работа на ПАВЕЦ в акумулиращ (помпен) режим. $v_{ij}=1$ ако помпите работят в интервал j на типовото денонощие i;

$P_{a,ij}$ - акумулирана през интервала j мощност за денонощния цикъл на акумулиране[1] за всяко типово денонощие;

$P_{aw,ij}$ - акумулирана през интервала j мощност за седмичния цикъл на акумулиране за всяко типово денонощие;

$P_{ay,ij}$ - акумулирана през интервала j мощност за годишния цикъл на акумулиране за всяко типово денонощие;

$P_a^{\max}$ - технически допустима максимална стойност за единичен интервал на помпената мощност;

[1] Цикъл на акумулиране означава времето, през което се изравнява зареждането и разреждането на акумулатора.

$P_{Ga,ij}$ - генерирана от акумулиращите източници мощност за денонощния цикъл на акумулиране през интервала j през съответното типово денонощие i (за всяко типово денонощие) ;

$P_{Gaw,ij}$ - генерирана от акумулиращите източници мощност за седмичния цикъл на акумулиране през интервала j за всяко типово денонощие ;

$P_{Gay,ij}$ - генерирана от акумулиращите източници мощност за годишния цикъл на акумулиране през интервала j за всяко типово денонощие ;

$P_{Ga}^{\max}$ - технически допустима максимална стойност за единичен интервал на генерираната от акумулиращите източници мощност (определя се от инсталираната мощност на разглежданите ВЕЦ);

η , η_w и η_y - кпд на енергийното акумулиране за денонощен, седмичен и годишен цикъл;

$E_{\max}$ - технически допустима максимална стойност за денонощния цикъл на акумулираната енергия. Определя се от инсталираната помпена мощност и обемите на водохранилищата (обеми на горния и долния изравнител на ПАВЕЦ, обем на резервоар за сгъстен въздух (при акумулиране на енергията чрез сгъстен въздух) или капацитет на акумулаторни батерии);

$E_{W\max}$ - технически допустима максимална стойност за седмичния цикъл на акумулираната енергия (определя се от инсталираната помпена мощност и обемите на водохранилищата);

$E_{Y\max}$ - технически допустима максимална стойност за годишния цикъл на акумулираната енергия (определя се от инсталираната помпена мощност и обемите на водохранилищата).

Целевата функция представлява общите разходи за закупуване на енергия:

$$\min J = 13{,}036d\left(\begin{array}{c} 5\sum_j B_{11j}(P_{11j}) + 2\sum_j B_{12j}(P_{12j}) + 5\sum_j B_{21j}(P_{21j}) + \\ +2\sum_j B_{22j}(P_{22j}) + 2\left(5\sum_j B_{31j}(P_{31j}) + 2\sum_j B_{32j}(P_{32j})\right) \end{array}\right) \quad (1)$$

Използва се интервално-линейна нарастваща изпъкнала апроксимация на еквивалентната разходна характеристика (РХ) на ЕЕС - B_{ij} :

$$P_{ij} = \sum_{l=1}^{L_{ij}} P_{lij} \text{ за всеки период } j \text{ от типовото денонощие } i \quad (2)$$

$$B_{ij} = \sum_{l=1}^{L_{ij}} b_{lj} P_{lij} \text{ за всеки период } j \text{ от типовото денонощие } i \quad (3)$$

$$0 \le P_{lij} \le P_{l,ij}^{\max} \text{ за всеки период } j \text{ и участък } l \text{ от типовото денонощие } i \quad (4)$$

Балансови ограничения за всеки разглеждан период j за всички типови денонощия:

$$D_{11,j} + P_{a11,j} + P_{ay11,j} = P_{11,j} + P_{Ga11,j} + P_{Gaw11,j} \text{ за всяко } j \quad (5)$$

$$D_{12,j} + P_{a12,j} + P_{aw12,j} + P_{ay12,j} = P_{12,j} + P_{Ga12,j} \text{ за всяко } j \quad (6)$$

$$D_{21,j} + P_{a21,j} = P_{21,j} + P_{Ga21,j} + P_{Gaw21,j} + P_{Gay21,j} \text{ за всяко } j \quad (7)$$

$$D_{22,j} + P_{a22,j} + P_{aw22,j} = P_{22,j} + P_{Ga22,j} + P_{Gay22,j} \text{ за всяко } j \quad (8)$$

$$D_{31,j} + P_{a31,j} + P_{ay31,j} = P_{31,j} + P_{Ga31,j} + P_{Gaw31,j} + P_{Gay31,j} \text{ за всяко } j \quad (9)$$

$$D_{32,j} + P_{a32,j} + P_{aw32,j} + P_{ay32,j} = P_{32,j} + P_{Ga32,j} + P_{Gay32,j} \text{ за всяко } j \quad (10)$$

Балансови ограничения за денонощния цикъл на акумулиране:

$$\eta \sum_j P_{a,ij} = \sum_j P_{Ga,ij} \text{ за всяко типово денонощие } i \quad (11)$$

Балансови ограничения за седмичния цикъл на акумулиране:

$$2\eta_w \sum_j P_{aw12,j} = 5 \sum_j P_{Gaw11,j} \text{ за летния сезон} \quad (12)$$

$$2\eta_w \sum_j P_{aw22,j} = 5 \sum_j P_{Gaw21,j} \text{ за зимния сезон} \quad (13)$$

$$2\eta_w \sum_j P_{aw32,j} = 5 \sum_j P_{Gaw31,j} \text{ за преходния сезон} \quad (14)$$

Балансово ограничение за годишния цикъл на акумулиране:

$$\eta_y \left(10 \sum_j P_{ay31,j} + 4 \sum_j P_{ay32,j} + 5 \sum_j P_{ay11,j} + 2 \sum_j P_{ay12,j} \right) = 5 \sum_j P_{Gay21,j} + 2 \sum_j P_{Gay22,j} + \\ + 2 \left(5 \sum_j P_{Gay31,j} + 2 \sum_j P_{Gay32,j} \right) \quad (15)$$

Ограничения за забрана на едновременна работа на помпени и производствени мощности на ПАВЕЦ (16) – (27):

$$P_{a11,j} + P_{ay11,j} - v_{11,j} P_a^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (16)$$

$$P_{Ga11,j} + P_{Gaw11,j} - \left(1 - v_{11,j}\right) P_{Ga}^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (17)$$

$$P_{a12,j} + P_{aw12,j} + P_{ay12,j} - v_{12,j} P_a^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (18)$$

$$P_{Ga12,j} - \left(1 - v_{12,j}\right) P_{Ga}^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (19)$$

$$P_{a21,j} - v_{21,j} P_a^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (20)$$

$$P_{Ga21,j} + P_{Gaw21,j} + P_{Gay21,j} - \left(1 - v_{21,j}\right) P_{Ga}^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (21)$$

$$P_{a22,j} + P_{aw22,j} - v_{22,j} P_a^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (22)$$

$$P_{Ga22,j} + P_{Gay22,j} - \left(1 - v_{22,j}\right) P_{Ga}^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (23)$$

$$P_{a31,j} + P_{ay31,j} - v_{31,j} P_a^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (24)$$

$$P_{Ga31,j} + P_{Gaw31,j} + P_{Gay31,j} - \left(1 - v_{31,j}\right) P_{Ga}^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (25)$$

$$P_{a32,j} + P_{aw32,j} + P_{ay32,j} - v_{32,j} P_{a}^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (26)$$

$$P_{Ga32,j} + P_{Gay32,j} - \left(1 - v_{32,j}\right) P_{Ga}^{\max} \le 0 \text{ за всяко } j \quad (27)$$

Ограничения за водните обеми:

$$13,036\left(5\sum_j P_{ay31,j} + 2\sum_j P_{ay32,j} + 5\sum_j P_{ay11,j} + 2\sum_j P_{ay12,j}\right) + 2\sum_j P_{aw12,j} + \sum_j P_{a12,j} \le E_{Y\max}/d \quad (28)$$

$$13,036\left(5\sum_j P_{ay31,j} + 2\sum_j P_{ay32,j} + 5\sum_j P_{ay11,j} + 2\sum_j P_{ay12,j}\right) + 2\sum_j P_{aw12,j} + \sum_j P_{a11,j} \le E_{Y\max}/d \quad (29)$$

Ограничения (28) и (29) осигуряват ненадвишаване на възможния обем при акумулиране през летния сезон, а също и през прехождалия го сезон.

$$13,036\left(10\sum_j P_{ay31,j} + 4\sum_j P_{ay32,j} + 5\sum_j P_{ay11,j} + 2\sum_j P_{ay12,j}\right) + 2\sum_j P_{aw32,j} + \sum_j P_{a32,j} \le E_{Y\max}/d \quad (30)$$

$$13,036\left(10\sum_j P_{ay31,j} + 4\sum_j P_{ay32,j} + 5\sum_j P_{ay11,j} + 2\sum_j P_{ay12,j}\right) + 2\sum_j P_{aw32,j} + \sum_j P_{a31,j} \le E_{Y\max}/d \quad (31)$$

Ограничения (30) и (31) осигуряват ненадвишаване на възможния обем при акумулиране през преходните сезони и през лятото.

$$13,036\left(10\sum_j P_{ay31,j} + 4\sum_j P_{ay32,j} + 5\sum_j P_{ay11,j} + 2\sum_j P_{ay12,j}\right) + 2\sum_j P_{aw22,j} + \sum_j P_{a21,j} \le E_{Y\max}/d \quad (32)$$

$$13,036\left(10\sum_j P_{ay31,j} + 4\sum_j P_{ay32,j} + 5\sum_j P_{ay11,j} + 2\sum_j P_{ay12,j}\right) + 2\sum_j P_{aw22,j} + \sum_j P_{a22,j} \le E_{Y\max}/d \quad (33)$$

Ограничения (32) и (33) осигуряват ненадвишаване на възможния обем при акумулиране през зимата, когато и през лятото и през предходните периоди е било акумулирано.

$$13,036\left(-\frac{1}{\eta_y}\left(10\sum_j P_{Gay31,j}+4\sum_j P_{Gay32,j}\right)+5\sum_j P_{ay11,j}+2\sum_j P_{ay12,j}\right)+2\sum_j P_{aw22,j}+ \\ +\sum_j P_{a21,j}\le E_{Y\max}/d \quad (34)$$

$$13,036\left(-\frac{1}{\eta_y}\left(10\sum_j P_{Gay31,j}+4\sum_j P_{Gay32,j}\right)+5\sum_j P_{ay11,j}+2\sum_j P_{ay12,j}\right)+2\sum_j P_{aw22,j}+ \\ +\sum_j P_{a22,j}\le E_{Y\max}/d \quad (35)$$

Ограничения (34) и (35) осигуряват ненадвишаване на възможния обем при акумулиране през зимния сезон, когато през летния сезон е имало акумулиране, а следващия (есенния) сезон е имало генериране.

Ограничения (36)÷(41) осигуряват ненадвишаване на възможния обем при акумулиране в денонощния цикъл.

$$\sum_j P_{a11,j}+\sum_j P_{ay11,j}\le E_{\max}/d \quad (36)$$

$$\sum_j P_{a12,j}+\sum_j P_{aw12,j}+\sum_j P_{ay12,j}\le E_{\max}/d \quad (37)$$

$$\sum_j P_{a21,j}\le E_{\max}/d \quad (38)$$

$$\sum_j P_{a22,j}+\sum_j P_{aw22,j}\le E_{\max}/d \quad (39)$$

$$\sum_j P_{a31,j}+\sum_j P_{ay31,j}\le E_{\max}/d \quad (40)$$

$$\sum_j P_{a32,j}+\sum_j P_{aw32,j}+\sum_j P_{ay32,j}\le E_{\max}/d \quad (41)$$

Ограничения (42)÷(47) осигуряват ненадвишаване на възможния обем при акумулиране в седмичния цикъл.

$$\sum_j P_{a11,j}+2\sum_j P_{aw12,j}+2\sum_j P_{ay12,j}+5\sum_j P_{ay11,j}\le E_{W\max}/d \quad (42)$$

$$\sum_j P_{a12,j}+2\sum_j P_{aw12,j}+2\sum_j P_{ay12,j}+5\sum_j P_{ay11,j}\le E_{W\max}/d \quad (43)$$

$$\sum_j P_{a21,j}+2\sum_j P_{aw22,j}\le E_{W\max}/d \quad (44)$$

$$\sum_j P_{a22,j}+2\sum_j P_{aw22,j}\le E_{W\max}/d \quad (45)$$

$$\sum_j P_{a31,j}+2\sum_j P_{aw32,j}+2\sum_j P_{ay32,j}+5\sum_j P_{ay31,j}\le E_{W\max}/d \quad (46)$$

$$\sum_j P_{a32,j}+2\sum_j P_{aw32,j}+2\sum_j P_{ay32,j}+5\sum_j P_{ay31,j}\le E_{W\max}/d \quad (47)$$

Простите граници за променливите са както следва:

$$P_{lij} \le P_{l,ij}^{\max},\ P_{ij} \ge 0,\ v_{ij} = \{0,1\} \tag{48}$$

$$P_{a,ij} \ge 0,\ P_{aw,ij} \ge 0,\ P_{ay,ij} \ge 0 \tag{49}$$

$$P_{Ga,ij} \ge 0,\ P_{Gaw,ij} \ge 0,\ P_{Gay,ij} \ge 0 \tag{50}$$

Допълнително, в седмичния цикъл не може да се акумулира през работни дни и не може да се генерира през почивни дни, т.е. простите граници за съответните променливи (49) и (50) приемат вида:

$$\begin{matrix} P_{aw11,j} = 0 \\ P_{aw21,j} = 0 \\ P_{aw31,j} = 0 \end{matrix} \quad \text{и} \quad \begin{matrix} P_{Gaw12,j} = 0 \\ P_{Gaw22,j} = 0 \\ P_{Gaw32,j} = 0 \end{matrix} \tag{51}$$

Аналогично, за годишния цикъл, не може да се акумулира през зимния сезон и не може да се генерира през летния сезон и така простите граници за съответните променливи (49) и (50) приемат вида:

$$\begin{matrix} P_{ay21,j} = 0 \\ P_{ay22,j} = 0 \end{matrix} \quad \text{и} \quad \begin{matrix} P_{Gay11,j} = 0 \\ P_{Gay12,j} = 0 \end{matrix} \tag{52}$$

Предлаганият математичен модел, даден с изрази (1)÷(52), е смесено целочислен и линеен [3]. За i на брой типови денонощия, j на брой интервала от типовото денонощие и l участъка от линейната апроксимация на разходната характеристика (РХ) моделът обхваща $(l+8)ij$ на брой променливи, ij от които са двоични. Броят на ограниченията от тип равенство е $2ij+i+4$, а на тези от тип неравенство $12j+20$. Така при продължителност на единичния интервал от 1 час, за 24-часови графици, 6 типови денонощия и 7 интервала на РХ, броят на променливите е 2160, 144 от които са двоични, ограниченията от тип равенство са 298 на брой, а ограниченията от тип неравенство са 308. За 4-интервален товаров график при 6 типови денонощия и 7 интервала на РХ броят на променливите се редуцира до 360, като само 24 от тях са двоични, ограниченията от тип равенство са 58, а тези от тип неравенство 68.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработеният модел може да се ползва като инструмент за планиране работата на ЕЕС и да служи за получаване на оптимални графици за използване на акумулиращите мощности с възможност за прилагане на денонощен, седмичен и годишен цикли на акумулиране. Освен на собственици или оператори на акумулиращи мощности, работещи в условията на електроенергиен пазар, той може да служи като отделен модул в състава на програмна система за планиране производството и заангажирането на агрегатите [4] във вертикално интегрирани ЕЕС, както и при пулов или борсов пазар.

Моделът може да бъде използван и като модул в състава на програма за оптимално развитие на ЕЕС.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите благодарят на Министерство на Образованието и Науката и на Научно-Изследователския Сектор на Технически Университет – София за оказаната подкрепа с научно-изследователския проект в помощ на докторанти № 121ПД0065-08 на тема „Модели за оптимално управление на енергийни ресурси”.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Wood A., Wollenberg. B., Power Generation, Operation, and Control, *John Wiley & Sons, New York*, 1996.

[2] Стоилов Д., Янев К., Режими на електроенергийни системи, *Издателство на ТУ-София*, 2011.

[3] Williams, H. P.: Model Building for Mathematical Programming. *John Willey & Sons Ltd*, 1999.

[4] Stoilov D., Gyurov P., Ignatovski D., Applications for Short-Term Optimal Power Planning in Liberalized Power Markets, *Proceedings of Int. Conf. ELMA '2008, Sofia, Bulgaria*, 2008.

[5] Стоилов, Д. Г., Анализ на електроенергийния пазар в България, *Технически университет-София*, 2013 г.;

Автори: Димо Стоилов, доц. д-р, катедра „Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg***;** Веселина Трашлиева, маг. инж. докторант, катедра „Системи и Управление”, Факултет Автоматика, ТУ-София, E-mail address: *vesselina.trashlieva@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Валентин Колев

МОДЕЛ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ОБРАТИМИТЕ АГРЕГАТИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ ЧАСТ II: АЛГОРИТЪМ ЗА РЕШЕНИЕ, ПРИМЕРНИ РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ

Веселина Трашлиева, Димо Стоилов

Резюме: *Статията представя алгоритъм и числови примери за решение на задачата за планиране използването на акумулиращите мощности в електроенергийна система (ЕЕС) при функциониращ пазар, моделирана в [5]. Използват се товарови графици за шест типови денонощия за четири сезона. Акумулираната и генерирана енергия се представят от отделен набор променливи за всеки един сезон и всеки от трите цикъла на пълнене и празнене - денонощен, седмичен и годишен. Примерът показва определянето на оптималните количества енергия, които се акумулират и тези, които се вкарват в мрежата при трите цикъла по критерий за максимално обществено благополучие. За решаване на задачата се използва среда LPSolve, а структурата на модела се генерира с помощта на Matlab®.*

Ключови думи: *акумулиране и производство на електроенергия, оптимално управление на ЕЕС, оптимални стратегии за работа*

OPTIMAL OPERATION MODEL OF THE STORAGE CAPACITIES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS PART II: SOLUTION ALGORITHM, RESULTS AND ANALYSIS

Vesselina Trashlieva, Dimo Stoilov

Abstract: The article presents an *algorithm and numeric examples for solution of the problem for planning of the optimal operation of the storage capacities according to the model presented in [5]. Load curves for six typical days in four seasons are considered. Stored and generated energy from the storage utilities is obtained using different sets of variables, according to the season and charge-discharge cycles (daily, weekly and for the year). The examples show the determination of the optimal stored and generated power quantities for each cycle in order to achieve maximization of the public welfare. The problem is solved in the LPSolve IDE environment and the model structure is generated through Matlab®.*

Keywords: *power storage and production, EPS optimal control and operation, optimal operation strategies*

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В [5] е представен математичен модел за оптимално планиране на използването на акумулиращите мощности. В тази втора част представяме алгоритъм за решение на модела, както и числени примери. Примерът обхваща осреднените товари и условия за шест типови денонощия от различните сезони. Илюстрират се два вида представяне на денонощните товарови графици: 24-часов товаров график и еквивалентен 4-интервален график с продължителност на единичния интервал от 6 часа. Броят на променливите е 2160 при 24-часови графици при 7 интервала на еквивалентната РХ на ЕЕС, 144 от които са двоични. При четири интервален товаров график броят на променливите се редуцира до 360, като само 24 от тях са двоични.

В примерите са използвани инсталирани акумулиращи мощности и технически характеристики на ЕЕС близки до тези на Българската. За опростяване не се отчитат деформациите от задължителното изкупуване на електроенергия по преференциални цени при съставяне на кривата на предлагане на електроенергия.

2. ИЗХОДНИ ДАННИ

Използваните криви на предлагане на електроенергия според сезона са показани в табл.1. Товаровите графици за шестте типови денонощия при 4-интервален график са дадени в табл.2. Зимните денонощия се характеризират с най-висок среден товар, следвани от тези за преходните сезони и лятото. Средният товар през почивните дни е по-нисък от този през работните дни за всеки един сезон. За формиране на товаровите графици са използвани данните от 24-часови графици (фиг.1).

Табл.1:

Параметри на линейната апроксимация на еквивалентната РХ на ЕЕС

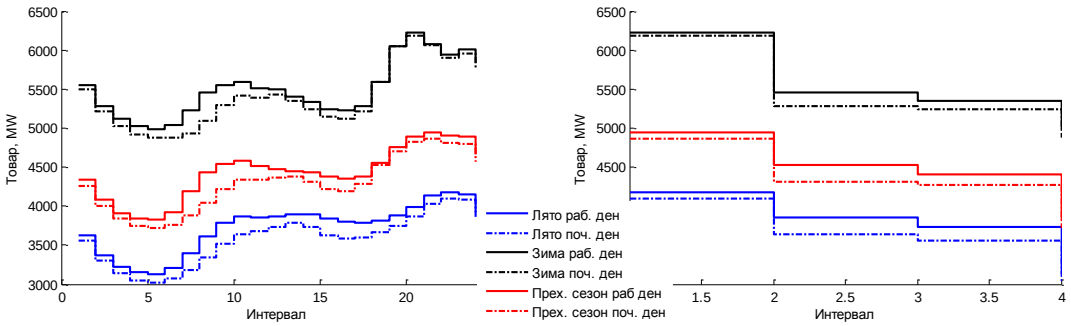
Денонощие		Участъци l						
	l	1	2	3	4	5	6	7
11	b_l, лв./MWh	15,30	30	40	45	95	130	200
	P_l, MW	1000	1800	500	500	1000	500	1650
12	b_l, лв./MWh	15,30	30	35	40	90	130	200
	P_l, MW	1000	1800	500	500	1000	500	1250
21	b_l, лв./MWh	15,30	46	55	65	125	135	200
	P_l, MW	2000	2700	500	800	1450	900	1650
22	b_l, лв./MWh	15,30	39	50	60	125	130	200
	P_l, MW	2000	2700	500	800	1450	900	1650
31	b_l, лв./MWh	15,30	35	45	70	115	130	200
	P_l, MW	1400	1000	300	400	1000	800	1650
32	b_l, лв./MWh	15,30	30	40	45	105	130	200
	P_l, MW	1400	1000	300	400	1000	800	1650

Максималното количество енергия, което може да се акумулира, се определя от обемите на резервоарите на акумулиращите мощности в системата: за денонощния цикъл $E_{\max} = 9000$ MWh, за седмичния цикъл $E_{W\max} = 19800$ MWh и за годишния цикъл - $E_{Y\max} = 150000$ MWh. Прието е, че к.п.д. на циклите акумулиране-производство е еднакъв за трите сезона, т.е. $\eta = \eta_w = \eta_y = 0,7$.

Табл.1:

Стойности на товарите (в MW) за шестте типови денонощия

Интервал	Лято раб. ден	Лято поч. ден	Зима раб. ден	Зима поч. ден	Преходен раб. ден	Преходен поч. ден
1	4180	4097	6219	6188	4949	4869
2	3857	3646	5453	5284	4523	4312
3	3735	3553	5352	5245	4413	4269
4	3128	3021	4979	4874	3825	3717



Фиг.1: 24-часови и 4-интервални графици на товарите за шестте типови денонощия

Технически допустимата максимална стойност за единичен интервал на помпената мощност е $P_a^{\max} = 917$ MW, а технически допустимата максимална стойност за единичен интервал на генерираната от акумулиращите източници мощност е $P_{Ga}^{\max} = 1399$ MW.

3. АЛГОРИТЪМ, ЧИСЛЕНИ РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ

Задачата се решава в средата на *LPSolve*, а въвеждането на параметрите и изграждането на математическия модел от [5] става чрез програма на *Matlab*®.

Стойността на целевата функция, изчислена по формула (1) от [5] при 4-интервални типови денонощия, е 1 718 912 676 лв., което включва 6 457 899 лв. сумарни разходи за акумулиране. Ако тази акумулирана и в последствие генерирана от акумулиращите източници енергия трябва да се генерира от конвенционалните централи в състава на разходната характеристика на ЕЕС, това би възлязло на общо 6 990 932 лв. (табл.3).

Така, стойността на целевата функция, без възможността за акумулиране на енергия, ще бъде 1 719 445 709 лв. С други думи, възможността за акумулиране струва 6 457 899 лв. и дава общ принос за намаляването на общите разходи определени в целевата функция в размер на 533 033 лв. В процентно съотношение,

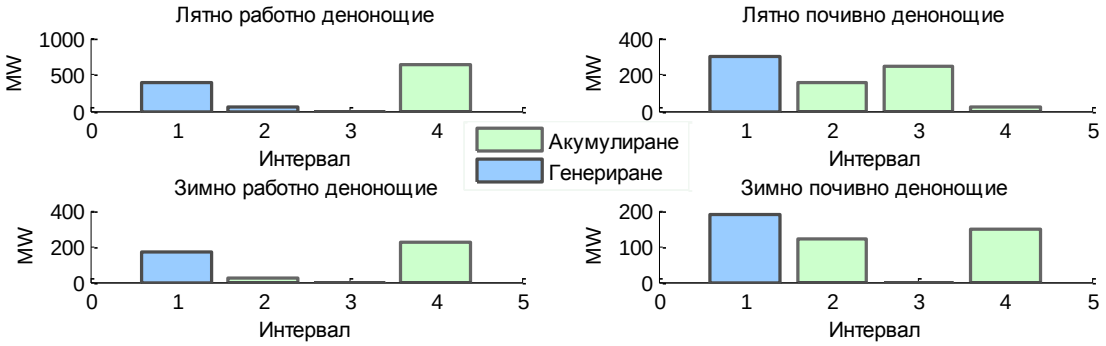
стойността на акумулирането е 0,38 % от ЦФ, а цялостното й намаление възлиза на 0,03 %.

Табл.3:

Резултати при различната продължителност на единичния интервал

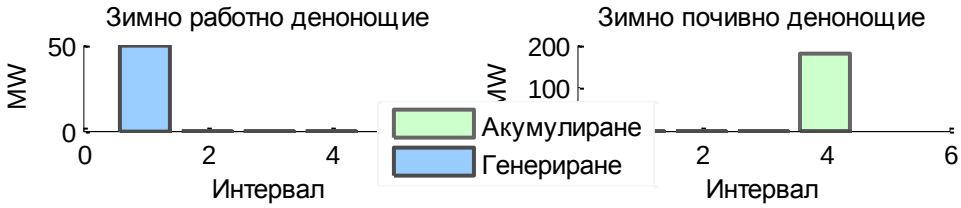
	4-интервален график	24-часов график
Ст-т на ЦФ	1 718 912 676 лв.	1 713 359 334 лв.
Ст-т на акумулирането, лв.	6 457 899 лв.	16 970 837 лв.
Ст-т на акумулирането в %	0,38 %	0,99 %
Завишение за генерация	6 990 932 лв.	160 744 748 лв.
Ст-т на ЦФ без акумулиране	1 719 445 709 лв.	1 857 133 244 лв.
Размер на икономията в лв.	533 033 лв.	143 773 910 лв.
Размер на икономията в %	0,03 %	7,74 %

Денонощен цикъл на акумулиране се осъществява през летния и зимен сезони (фиг.2).



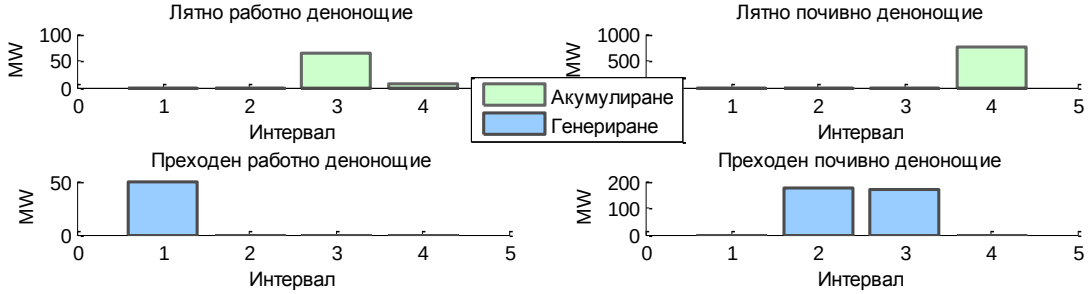
Фиг.2: Денонощен цикъл при 4-интервални типови денонощия.

Седмичен цикъл на акумулиране се осъществява през зимния сезон, като енергията се акумулира през почивните дни и се отдава през пиковите периоди на работните дни (фиг.3).



Фиг.3: Седмичен цикъл при 4-интервален график.

Акумулиране и генериране за годишен цикъл се осъществява като енергия се акумулира през летния сезон и се отдава през преходните (Фиг. 4).



Фиг.4: Годишен цикъл при 4-интервален график.

Конкретните стойности на променливите в оптималното решение, свързани с трите цикъла на акумулиране и генериране, са дадени в табл.4.

Табл.4:

Стойности на променливите, свързани с акумулиране и генериране

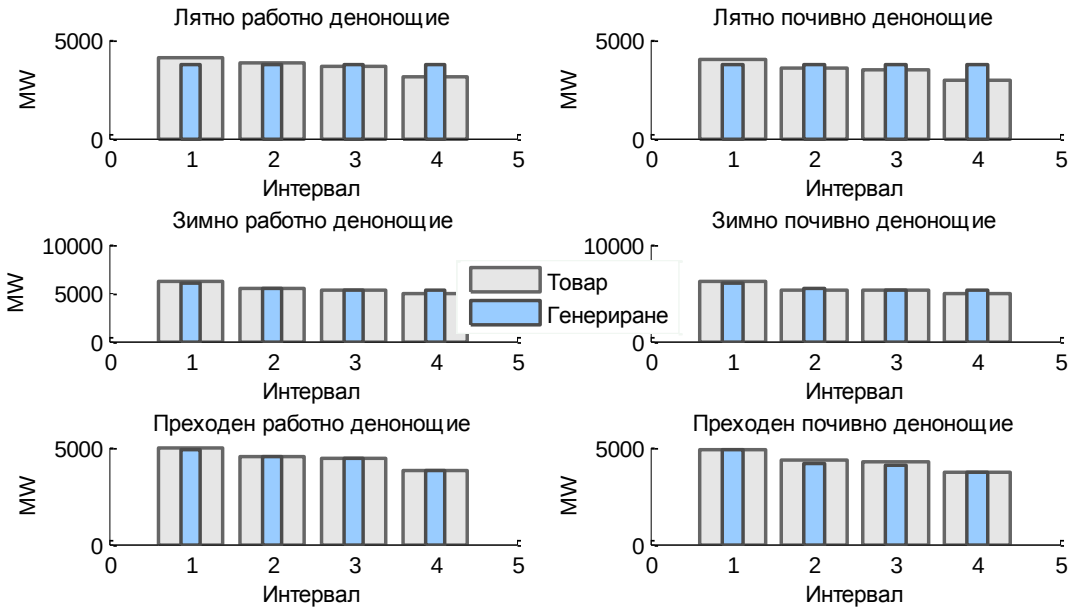
Денонощие	Интервал	P_{ij}	$P_{a,ij}$	$P_{Ga,ij}$	$P_{aw,ij}$	$P_{Gaw,ij}$	$P_{ay,ij}$	$P_{Gay,ij}$	$\sum P_a$	$\sum P_G$
Лято раб. ден	1	3800	0	380	0	0	0	0	0	380
	2	3800	0	57	0	0	0	0	0	57
	3	3800	0	0	0	0	65	0	65	0
	4	3759	624,3	0	0	0	6,69	0	630,98	0
Лято поч. ден	1	3800	0	297	0	0	0	0	0	297
	2	3800	154	0	0	0	0	0	154	0
	3	3800	247	0	0	0	0	0	247	0
	4	3800	23,3	0	0	0	755,71	0	779	0
Зима раб. ден	1	6000	0	169,2	0	49,8	0	0	0	219
	2	5473,7	20,71	0	0	0	0	0	20,71	0
	3	5352	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	5200	221	0	0	0	0	0	221	0
Зима поч. ден	1	6000	0	188	0	0	0	0	0	188
	2	5404,4	120,4	0	0	0	0	0	120,43	0
	3	5245	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	5200	148,1	0	177,86	0	0	0	326	0
Пр. с-н раб. ден	1	4900	0	0	0	0	0	49	0	49
	2	4523	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	4413	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	3825	0	0	0	0	0	0	0	0
Пр. с-н поч. ден	1	4869	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	4136	0	0	0	0	0	175,97	0	175,97
	3	4100	0	0	0	0	0	169	0	169
	4	3717	0	0	0	0	0	0	0	0

На фиг.5 са онагледени резултатите от ефективното намаляване на генерацията спрямо товара в пиковите интервали. На фиг.6 е показан еквивалентния график на работа на обратимите агрегати.

Табл.5:

Стойности за потребление, закупуване, акумулиране и генерация

Ден *i*	Потребление	E_{BUY}	E_A	E_G
1	2	3	4	5
11	89 399	90 506,42	3003,42	1 896
12	85 896	91 200	6218	914
21	132 018	131 709,4	37,43	346
22	129 543	130 812,4	1 566,43	297
31	106 260	106 201	0	59
32	103 003	100 325,8	0	2 677,21



Фиг.5: Генерация и товар при 4-интервален график

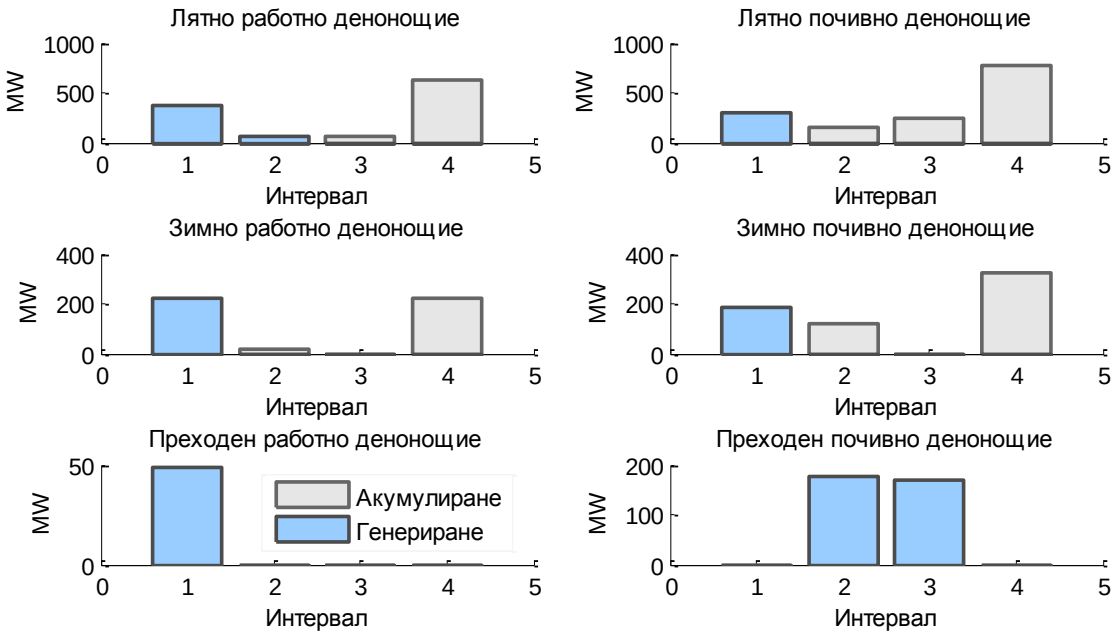
Стойността на целевата функция при 24-часови товарови графици е 1 713 359 334 лв. (табл.3), като разходите за акумулиране са в размер на 16 970 837 лв. Ако тази енергия трябва да се произведе от конвенционалните ЕЦ това би струвало 160 744 748 лв., т.е. стойността на ЦФ би била 1 857 133 244 лв. В процентно отношение, акумулирането е 0,99 % от стойността на ЦФ, но допринася за 7,74 % намаление на общите разходи.

Стойности на променливите за всички денонощия за общото потребление $\sum D_j$, закупената енергия $E_{BUY} = \sum P_{ij}$, акумулираната през денонощието енергия $E_A = \sum (P_a + P_{aw} + P_{ay})$ и генерираната от акумулиращите източници енергия $E_G = \sum (P_{Ga} + P_{Gaw} + P_{Gay})$ са дадени в табл.5.

Енергиите (обозначени като суми на мощности), свързани с трите цикъла на акумулиране и генериране за разглежданите типови денонощия са дадени в табл.6.

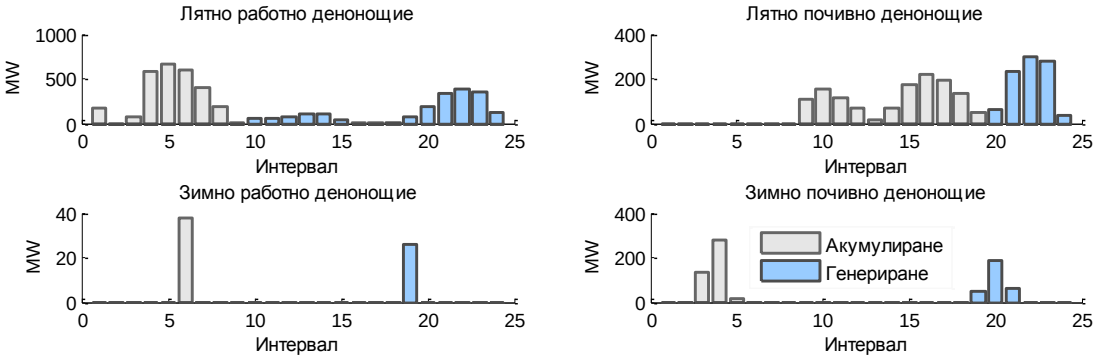
Табл.6:
Стойности на енергиите от трите цикъла при 24-часов график

Ден i	$\sum_j P_{a,ij}$	$\sum_j P_{Ga,ij}$	$\sum_j P_{aw,ij}$	$\sum_j P_{Gaw,ij}$	$\sum_j P_{ay,ij}$	$\sum_j P_{Gay,ij}$
11	2 708,57	1 896	0	0	294,85	0
12	1 305,71	914	0	0	4 912,29	0
21	37,43	26,2	0	319,8	0	0
22	424,29	297	1 142,14	0	0	0
31	0	0	0	0	0	59
32	0	0	0	0	0	2 677,21



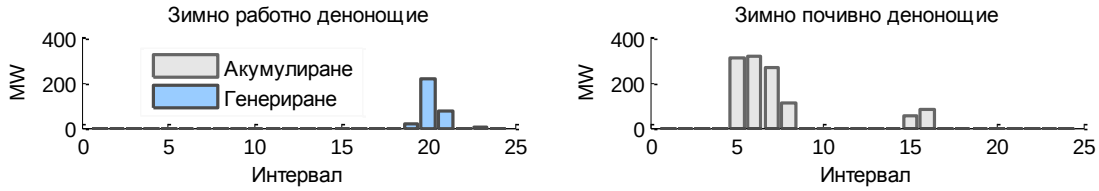
Фиг.6: Работа на обратимите агрегати при 4-интервален график.

Дневният цикъл на акумулиране (фиг.7) се осъществява през летния и зимен сезони.



Фиг.7: Дневен цикъл при 24-часов график на типовите денонощия.

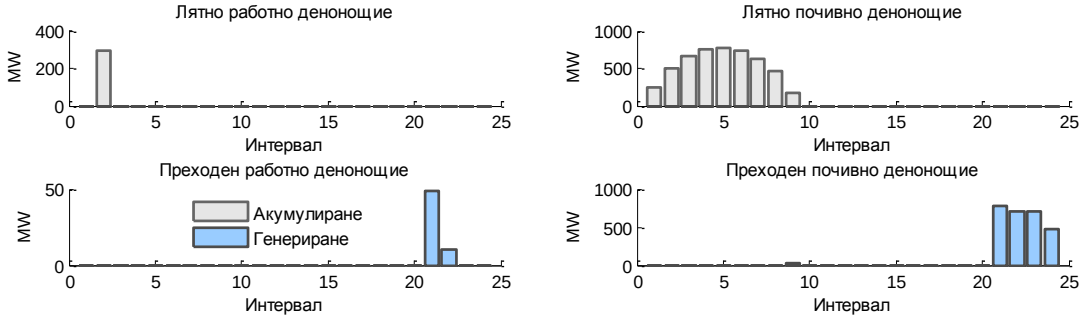
Седмичният цикъл на акумулиране се осъществява отново само през зимния сезон (фиг.8), като енергията се акумулира през почивните дни и се отдава през пиковите периоди на работните дни.



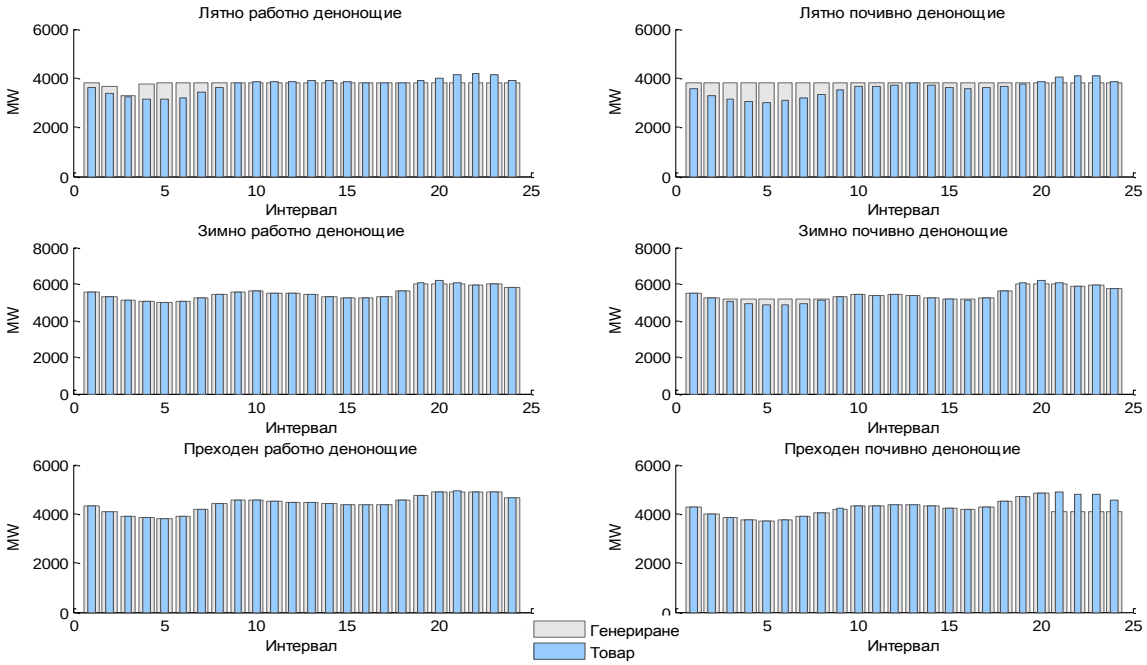
Фиг.8: Седмичен цикъл при 24-часов график.

Акумулиране за годишния цикъл се осъществява през лятото и акумулираната за този цикъл енергия се отдава през преходните сезони (фиг.9). На фиг.10 са онагледени резултатите от ефективното намаляване на генерацията спрямо то-

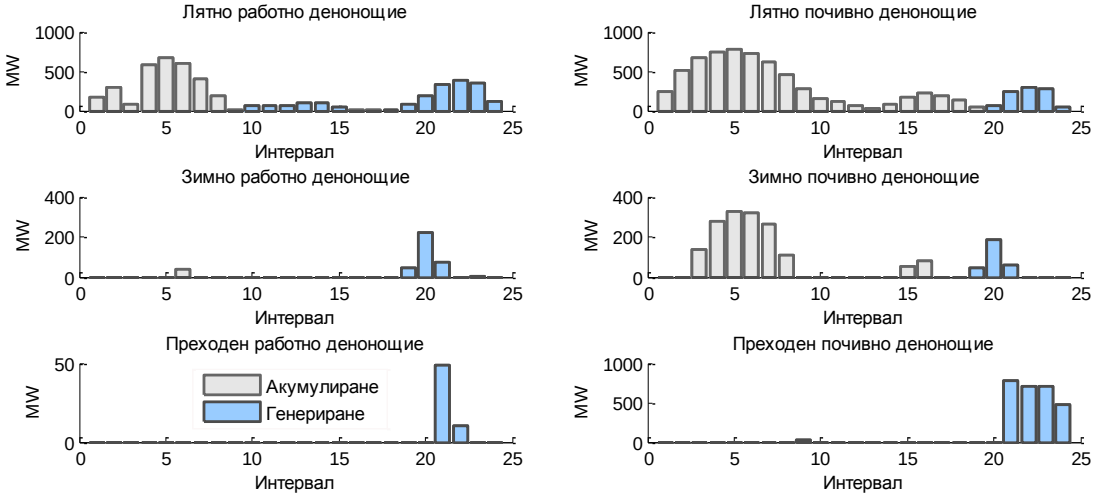
вара в пиковите интервали, а на фиг.11 е показана работата на обратимите акумулиращи агрегати.



Фиг.9: Годишен цикъл при 24-часов график.



Фиг.10: Генерация и товар при 24-часов график.



Фиг.11: Работа на акумулиращите мощности при 24-часов график за всички типови денонощия.

Видно от представените резултати, структурата на решението не се влияе от избраната продължителност на единичния интервал (табл.7).

Табл.7:
Сравнение при различна продължителност на единичния интервал

	4 интервала		**24 часа**	
	Раб. ден	Поч. ден	Раб. ден	Поч. ден
Денонощен цикъл				
Лято	Ак./ Ген.	Ак./ Ген.	Ак./ Ген.	Ак./ Ген.
Зима	Ак./ Ген.	Ак./ Ген.	Ак./ Ген.	Ак./ Ген.
Преходен				
Седмичен цикъл				
Лято				
Зима	Генериране	Акумулиране	Генериране	Акумулиране
Преходен				
Годишен цикъл				
Лято	Акумулиране	Акумулиране	Акумулиране	Акумулиране
Зима				
Преходен	Генериране	Генериране	Генериране	Генериране

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представените резултати показват, че за моделираната ЕЕС се реализира ефективно генериране през преходните сезони чрез ресурс акумулиран през летния. Продължителността на единичния интервал не оказва влияние върху структурата на оптималното решение – циклите и при едната и при другата продължителност са еднакви. Използването, обаче, на по-кратка продължителност (1ч.) дава възможност за по-точно моделиране на товаровите графици, в резултат на което нараства ефектът на оптимизацията, видно от разликата в стойностите на двете ЦФ.

Разработеният модел служи за получаване на оптимални графици за използване на акумулиращите мощности при приемане на денонощен, седмичен и годишен цикли на акумулиране и производство и може да се използва като инструмент за планиране работата на ЕЕС. Освен на собственици или оператори на акумулиращи мощности, работещи в условията на електроенергиен пазар, той може да служи като отделен модул в състава на програмна система за планиране производството и заангажирането на агрегатите [4] във вертикално интегрирани ЕЕС или в такива с функциониращи пулов или борсов пазар.

Моделът може да бъде използван и за определяне на оптималния ежегоден ефект от изграждане на акумулиращи мощности в ЕЕС, т.е. като модул в състава на програма за оптимално развитие на ЕЕС.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Wood A., Wollenberg. B., Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, New York, 1996.

[2] Стоилов Д., Янев К., Режими на електроенергийни системи, София, Издателство на ТУ-София, 2011.

[3] Williams, H. P.: Model Building for Mathematical Programming. John Willey & Sons Ltd, 1999.

[4] Stoilov D., Gyurov P., Ignatovski D., Applications for Short-Term Optimal Power Planning in Liberalized Power Markets, Proceedings of Int. Conf. ELMA '2008, Sofia, Bulgaria, 2008.

[5] Стоилов Д., Трашлиева В., Модел за оптимално използване на обратимите агрегати в електроенергийни системи - Част I: Математическо описание

Автори: Веселина Трашлиева, маг. инж. докторант, катедра „Системи и Управление”, Факултет Автоматика, ТУ-София, E-mail address: *vesselina.trashlieva@gmail.com*; Димо Стоилов, доц. д-р, катедра „Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Валентин Колев

ОПТИМИЗАЦИЯ НА ФОРМАТА НА ЛЕЩА НА LED ОСВЕТИТЕЛ ЗА ВЪТРЕШНО ОСВЕТЛЕНИЕ С АКСИАЛНА СИМЕТРИЯ НА СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО

Милко Йовчев, Пламен Цанков

Резюме: *В настоящата разработка са представени резултати от итеративно оптимизиране на формата на триизмерно компютърно моделирана леща на прототип на промишлен LED осветител. Извършва се избор и настройка на параметри за фотометричен анализ по метода Монте Карло Raytracing. Направен е сравнителен анализ на реализирани количествени и качествени светлотехнически показатели от компютърно моделираните форми на лещата на LED осветителя за промишлено помещение.*
Ключови думи: *фотометричен анализ, леща, компютърно моделиране, оптимизация, светлоразпределителни криви, LED*

OPTIMIZATION OF THE LENS SHAPE OF LED LUMINAIRE FOR INTERIOR LIGHTING WITH AXIAL SYMMETRY OF THE LIGHT DISTRIBUTION

Milko Yovchev, Plamen Tsankov

Abstract: *In this paper are presented results of iterative optimization of the lens shape of three-dimensional computer modelled prototype of industrial LED luminaire. Selection and adjustment of parameters for photometric analysis using Monte Carlo Ray-tracing are performed. A comparative analysis of quantitative and qualitative indicators of lighting of computer modelled lens shapes of LED luminaire for industrial premise is made.*
Keywords: *photometric analysis, lens, computer modelling, optimization, light distribution curves, LED*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Внедряването на осветители със светлодиодни (LED) светлинни източници е основна предпоставка за повишаване на електроенергийната ефективност на осветлението. Освен с предимствата, като висок светлинен добив, дълъг срок на експлоатация, различна цветна температура и др., LED осветителите имат и проблеми за изследване и решаване. Един от тях е свързан с особеностите в светлотехническите характеристики, които предявяват специфични изисквания към проектирането и произвеждането на оптичните системи за този вид източници на светлина [4].

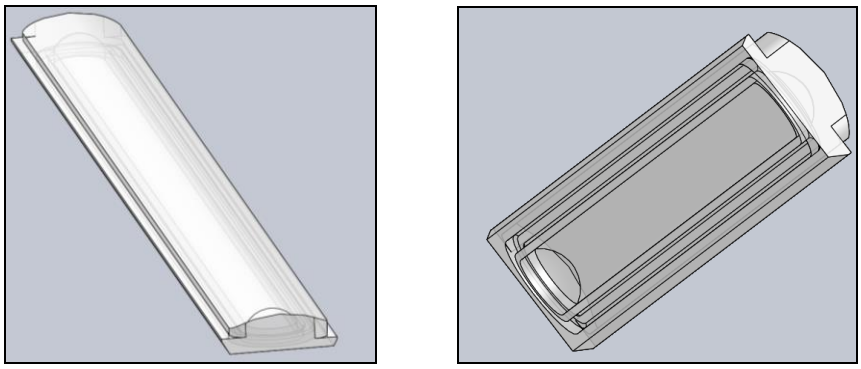
© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Най-разпространеното светлоразпределение на конвенционалните осветители (с луминесцентни светлинни източници), използвани в промишлените обекти с височина до 4 m, е тип „batwing“ [3], което е различно от повечето LED осветители, които имат косинусно светлоразпределение и голяма част от светлинния поток се излъчва при ъгли, които са по-големи от 45^{o}. В настоящата разработка се извършва компютърно моделиране и итеративно оптимизиране на формата на леща, като етап от проектиране на промишлен LED осветител в рамките на международен проект „Разработка и производство на иновативни енергоспестяващи промишлени осветителни тела с вградени светодиоди“, финансиран по Норвежки финансов механизъм 2009-2014 – Програма „Иновации в зелената индустрия“. Предложена е методика, реализирана на базата на комбиниране на специализиран софтуер за триизмерно компютърно моделиране на LED осветител, фотометричен анализ на оптичната му система и светлотехнически изчисления за примерно промишлено помещение.

2. СЪЗДАВАНЕ НА 3D МОДЕЛИ ЗА ИТЕРАТИВНО ИЗМЕНЕНИЕ НА ФОРМАТА НА ЛЕЩА НА ПРОМИШЛЕН LED ОСВЕТИТЕЛ С АКСИАЛНА СИМЕТРИЯ НА СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО

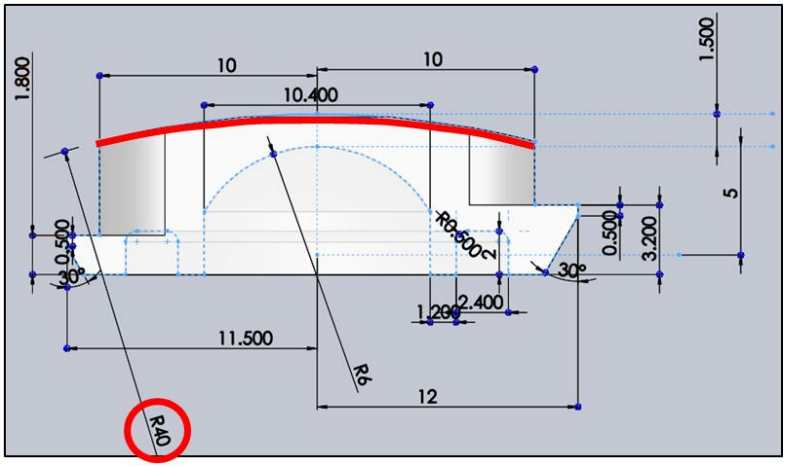
Създаването на триизмерни модели за различните форми на оптичната леща се извършва в средата на SolidWorks [6]. На фиг.1 са показани 3D изгледи на форма на лещата на един от вариантите за прототип на LED осветителя.



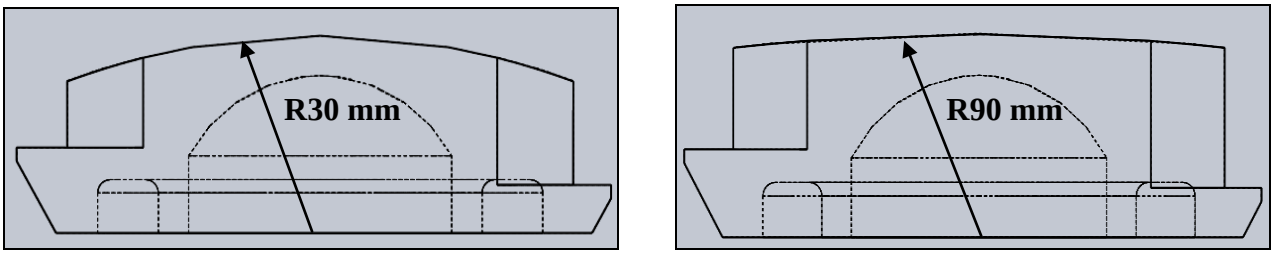
Фиг.1. *3D изгледи на формата на лещата.*

Итеративното изменение на формата на лещата се извършва с преминаване от 3D в 2D-мерно пространство, където могат да се задават различни размери и да се получават различни геометрични форми на обекта (лещата). От технологични съображения, единственият параметър, който подлежи на изменение, е външният радиус R на лещата (в mm), т.к. промяната на всеки друг параметър ще конфигурира нова геометрична форма на лещата, която ще предизвика нарушаване на съществуващия технологичен процес за нейната изработка. На фиг.2 е показана лещата в двумерното пространство, където подлежащите на изменение елементи са удебелени. Визуалната промяна на формата на лещата, след задаване на различни стойности на външния радиус R, е показана на фиг.3 за два варианта: R=30 mm и R=90 mm. Така получаваните различни форми на лещата

предизвикват различно пречупване на светлинните лъчи, което влияе на светло-разпределението на LED осветителя.

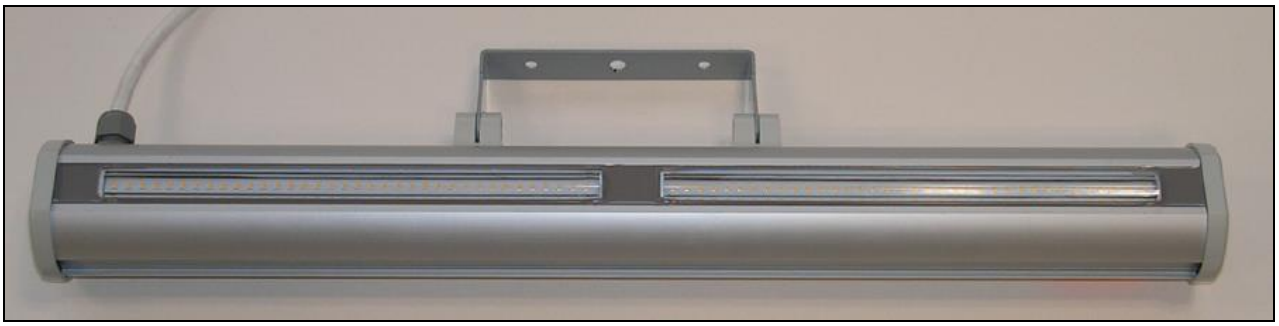


Фиг.2. *Изменение на външния радиус за промяна на формата на лещата.*



Фиг.3. *Изображение на вариантни форми с различен радиус.*

На фиг.4 е показана снимка на изработен прототип за един от триизмерните модели на оптичната леща на промишлен LED осветител - с радиус на външната дъга на лещата R=40 mm.

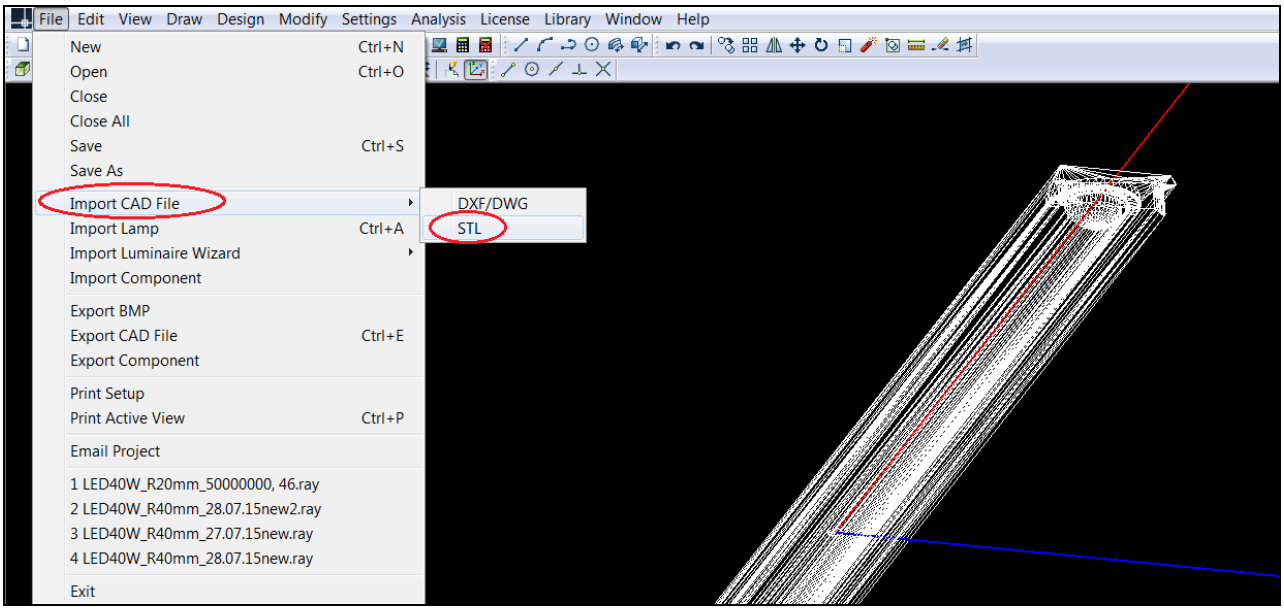


Фиг.4. *Снимка на прототип на промишлен LED осветител.*

3. ЗАДАВАНЕ НА ОТРАЖАТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ НА ОПТИЧНАТА СИСТЕМА НА LED ОСВЕТИТЕЛЯ

Коректното задаване на отражателни характеристики на елементите на оптичната система на LED осветителя изисква избор на подходящ файлов формат за успешно импортиране на елементите от оптичната система от софтуер за триизмерно компютърно моделиране в инструмент за присвояване на пречупващи

и отражателни свойства на материали, съответстващи на използваните в производството. На фиг.5 е показан процесът на импортиране на предварително конструирана модификация на оптична леща във файлов формат STL (Stereo Lithography) в специализирания софтуер за фотометричен анализ на оптични системи Photopia [7, 8].



Фиг.5. *Импортиране във Photopia на файл, създаден в SolidWorks.*

Останалите елементи от оптичната система на осветителя, които оказват влияние върху фотометричния анализ и формата на светлоразпределението, са платка, върху която се поставят LED светлинните източници и залят около оптичната леща уплътняващ слой. Критерий за избор на материал се явяват отражателните характеристики, които трябва да съответстват на действителните от елементите на оптичната система в производството. За платката се избира материал, съответстващ за бяла печатна платка с отвори за поставяне на светлодиодните източници във вид на масив от 36 броя, който има коефициент на отражение 85 %. Материалът на залетия около лещата слой се избира с огледална повърхност и коефициент на отражение 90 %. Като материал на лещата (рефрактора) се избира устойчив на ултравиолетови излъчвания поликарбонат, който се характеризира с показател на пречупване на светлината n = 1,586 (фиг.6).

Manufacturer	Designation	Description	Index of Refraction
Abrisa	Industrex	Industrex ptrn on acrylic	1.491
Abrisa	Industrex	Industrex ptrn on PC	1.586
Abrisa	Pattern 73	Pattern 73 on acrylic	1.491
Abrisa	Pattern 73	Pattern 73 on PC	1.586
Abrisa	Solite	Solite ptrn on acrylic	1.491
Abrisa	Solite	Solite ptrn on PC	1.586
Bayer	LEDPC	LED polycarbonate	1.586
Bayer	LEDPCUV	UV LED polycarbonate	1.586

Фиг.6. *Присвояване на характеристики на пречупване на лещата.*

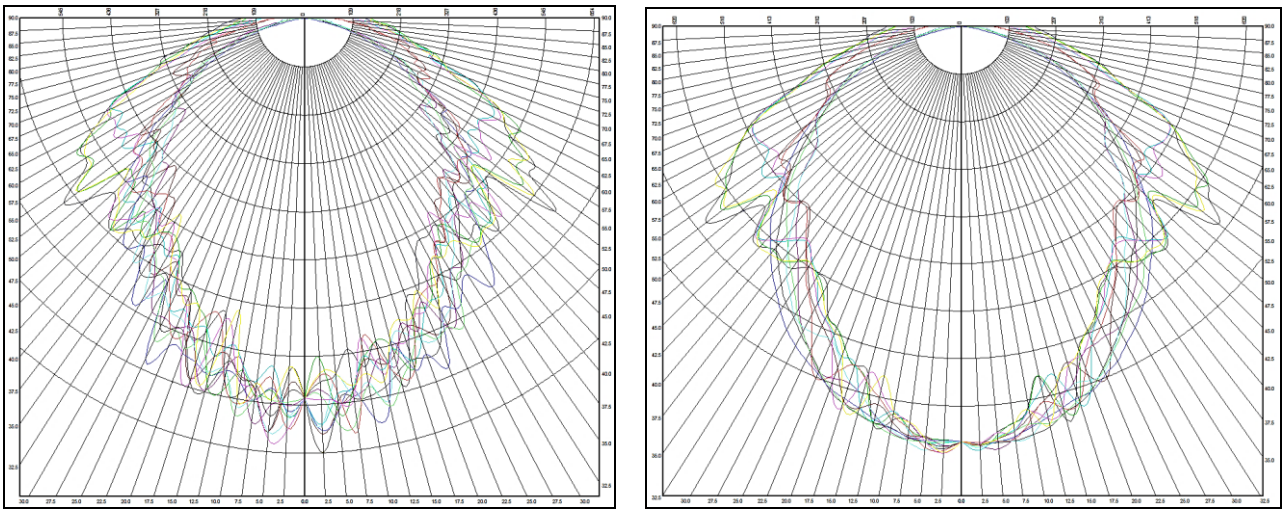
4. ИЗБОР И НАСТРОЙКА НА ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ЗА ФОТОМЕТРИЧЕН АНАЛИЗ ПО МЕТОДА МОНТЕ КАРЛО RAYTRACING

Точността на фотометричния анализ, извършван чрез приложение на вероятностни светлотехнически изчисления по метода Монте Карло Raytracing, изисква правилен избор и прецизна настройка на параметрите [1]. Основните параметри, подлежащи на настройка за извършване на фотометричния анализ на разработените триизмерни модели на LED осветители, са:

- *брой на проследяваните („трасирани“) лъчи*, излъчвани от масива със светлодиодите в елементите на оптичната система на LED осветителя;

- *брой реакции (на отражение и пречупване)* на проследяваните светлинни лъчи.

Параметърът *брой „трасирани“ лъчи* оказва съществено влияние върху точността на фотометричния анализ и плавността на генерираната форма на светлоразпределителната крива (СРК) на LED осветителя. В процеса на изследване на неговото влияние, се установява, че за конкретните моделирани елементи на оптичната система (платка с масив от 36 LED, леща и залят около нея слой), неговата оптимална стойност е 50000000. При тази стойност на параметъра се получава нормално изгладена форма на светлоразпределението. По-високите стойности не водят до подобряване на изглаждането на СРК на LED осветителя, но значително удължават изчислителния процес. На фиг.7-а) и фиг.7-б) са показани два варианта на светлоразпределителни криви, получени при различна настройка на параметъра *брой „трасирани“ лъчи*.



а) брой трасирани лъчи 1000000 *б) брой трасирани лъчи 50000000*

Фиг.7. *Резултати от получени СРК по метода Raytracing при различна настройка на параметъра брой „трасирани“ лъчи.*

Параметърът *брой реакции (отразяване и пречупване)* на проследяваните лъчи, определя колко пъти един проследяван лъч ще достигне границата на две среди (средите имат различен показател на пречупване и се получава вътрешно отражение) преди да напусне оптичната система на осветителя. Стойността на параметъра е свързан с неотчетения светлинен поток при прекратяване на неговото

проследяване, т.е. броят на реакциите се използва като критерий за прекратяване на проследяването на лъча, когато остатъчното ниво на светлинния поток е толкова малък, че той не оказва влияние върху точността на фотометричния анализ. За използваните материали при възпроизвеждане на отражателните характеристики на платката, лещата и залетия около лещата уплътняващ слой, се установява, че оптималната стойност на броя на реакциите, при установен *брой на „трасираните“ лъчи* 50000000, е 46. При по-малка стойност на параметъра *брой реакции*, би останал неотчетен светлинен поток, което намалява точността на резултатите.

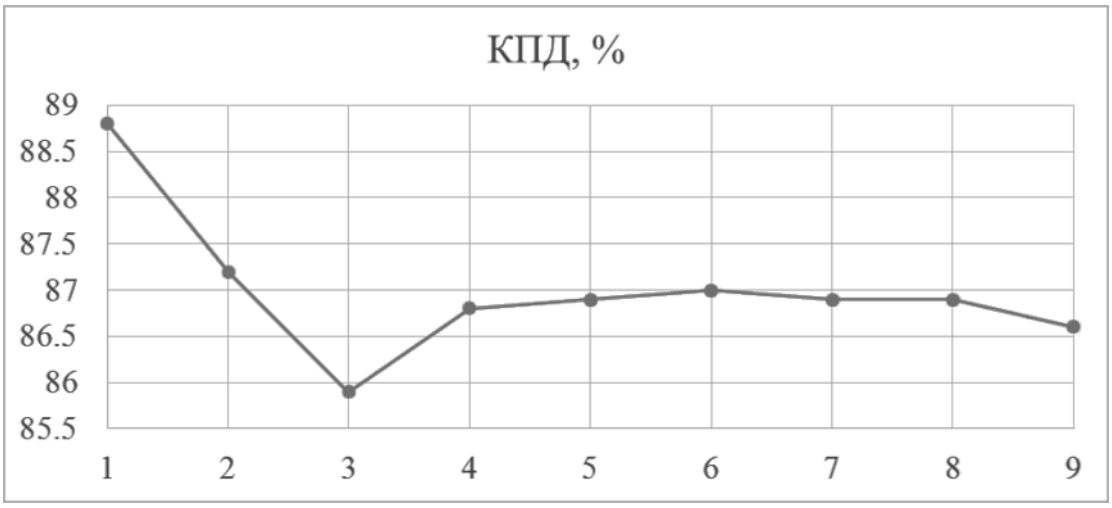
5. СРАВНИТЕЛЕН СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНИТЕ ЛЕЩИ НА LED ОСВЕТИТЕЛЯ ЗА ПРОМИШЛЕНО ПОМЕЩЕНИЕ

Следващ етап от предлаганата методика е извършването на сравнителен анализ на фотометричните характеристики и реализираните количествени и качествени светлотехнически и електроенергийни показатели за промишлен цех. Сравнителният анализ се извършва за всички компютърно моделирани модификации на формата на лещата на LED осветителя [2].

В табл.1 и на фиг.8 са представени резултати на изчислени стойности на коефициента на полезно действие (КПД) за девет варианта на итеративно модифицирани форми (чрез промяна на външния радиус R, mm) на лещата при еднакви други настройки на фотометричния анализ по метода Монте Карло.

Таблица 1

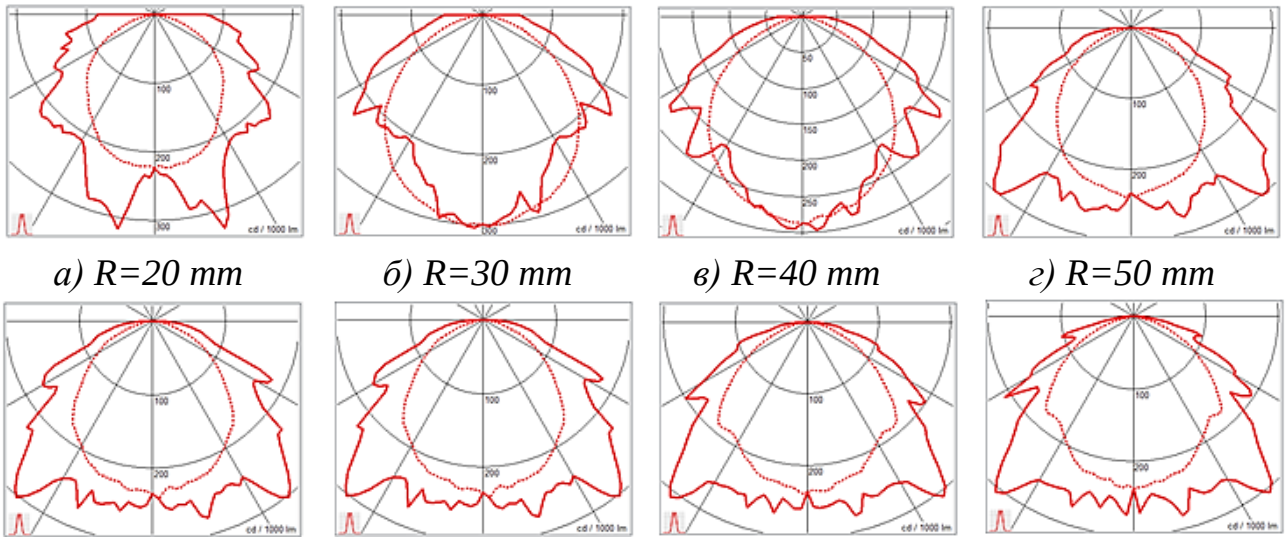
Вариант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R, mm	20	30	40	50	60	70	80	90	100
КПД, %	88,8	87,2	85,9	86,8	86,9	87	86,9	86,9	86,6



Фиг.8. *Изменение на КПД при вариантите за промяна на външния радиус R на лещата*

От реализираните варианти на формата на оптичната леща се установява, че КПД на осветителя се изменя нелинейно и има два екстремума (табл.1, фиг.8). При по-големите радиуси (R≥50 mm), КПД на осветителното тяло има по-ниски, но установени стойности, което се обяснява с увеличаване на загубите на светлинен поток в опитичната система на LED осветителя. Максималната разлика за отделните варианти е 2,9 %. Най-висок КПД е реализиран при външен радиус на лещата R=20 mm – 88,8 %, а най-нисък при R=40 mm – 85,9 %.

На фиг.9 са показани получените светлоразпределителни криви в резултат от модификацията на формата на лещата на LED осветителя. Както се вижда от фиг.9 за отделните варианти, с увеличаване на външния радиус на лещата – R≥50 mm, се получава и по-широко светлоразпределение в аксиалната равнина на LED осветителя, като максимумът на интензитетът на светлината за тези стойности на радиусите е при ъгъл 37,5°. В радиалното направление на осветителя за реализираните варианти на формата на лещата – R=(20÷100) mm, типът на светлоразпределението несъществено се променя, оставайки косинусно.



а) R=20 mm *б) R=30 mm* *в) R=40 mm* *г) R=50 mm*

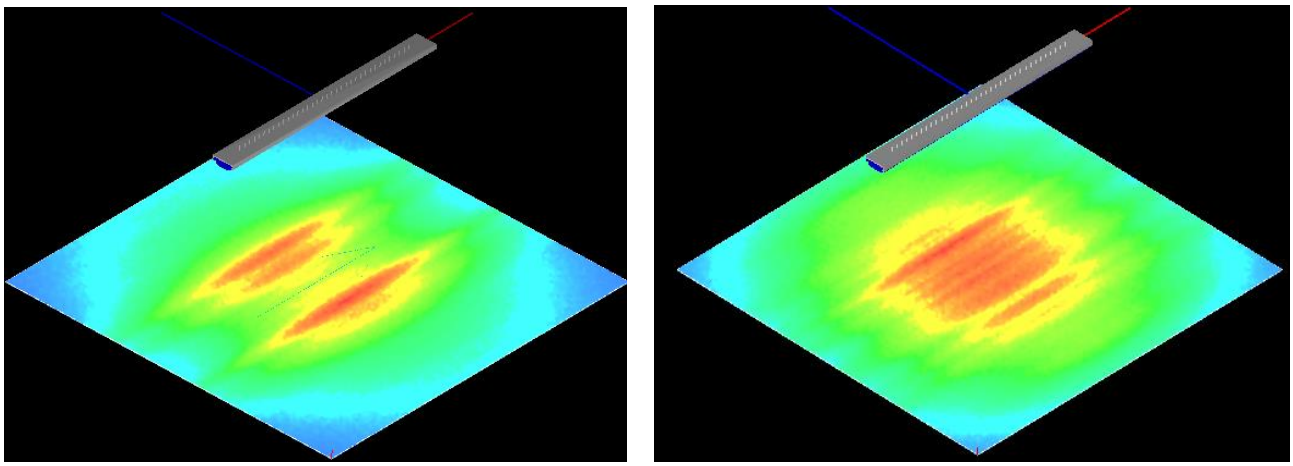
д) R=60 mm *е) R=70 mm* *ж) R=80 mm* *з) R=90 mm*

Фиг.9. *Сравнение на получени СРК от компютърно моделираните форми на лещата на LED осветителя.*

На фиг.10 е показана триизмерна визуализация на равномерността на разпределение на осветеността от светлодиодния осветител за два варианта на компютърно моделираните лещи.

От получените фотометрични характеристики на LED осветителя за 9-те компютърни модификации на формата на лещата, се извършват светлотехнически изчисления и анализ на реализираните количествени и качествени показатели за промишлен цех. Размерите на цеха са 40x20 mm, като за удовлетворяване на нормените показатели за категория промишлени помещения, съгласно БДС EN 12464-1:2011 [5], за отделните варианти са използвани 120 броя LED осветители с единична мощност 23,8 W. Резултатите от светлотехническите изчисления за отделните варианти са показани в табл.2. Техният анализ показва, че с увелича-

ване на външния радиус R на лещата, се увеличава средната реализирана осветеност $E_{ср}$ на работната повърхност и равномерността на осветеността $E_{мин.}/E_{ср}$, въпреки постигнатия по-нисък КПД (табл.1).



а) R=20 mm *б) R=90 mm*

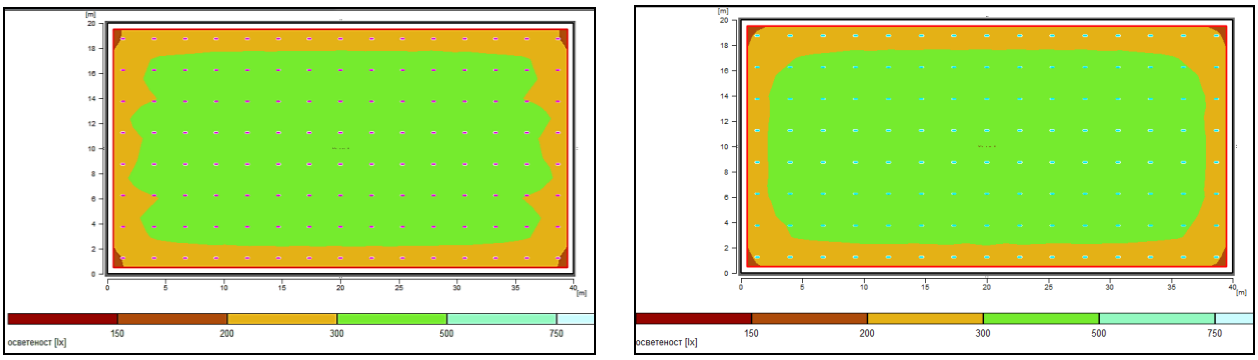
Фиг.10. *3D визуализация на равномерността на разпределение на осветеността от LED осветителя за различни форми на лещата.*

Таблица 2

Реализирани показатели	Промишлен цех с площ 800 m^2, височина на окачване на LED осветителите – 3,8 m								
	Варианти от компютърно моделираните форми на лещата								
	R20 mm	R30 mm	R40 mm	R50 mm	R60 mm	R70 mm	R80 mm	R90 mm	R100 mm
Средна осветеност $E_{ср}$, [lx]	313	314	311	315	316	317	317	317	317
Равномерност $E_{мин.}/E_{ср}$	0,64	0,73	0,72	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68	0,69
Специфична мощност за 100 lx, [W/m^2 /100 lx]	1,14	1,13	1,13	1,13	1,13	1,12	1,12	1,12	1,12

По-висока средна осветеност се получава при вариантите с по-голям радиус на външната дъга на лещата (от R=70 mm до R=100 mm – 317 lx), докато при вариантите с радиус от R=20 mm до R=40mm, осветеността е в интервала от 311 lx до 313 lx.

На фиг.11 е показано разпределението на изолиниите на реализираната осветеност в промишления цех при два варианта на геометричната форма на лещата [9].



а) R=20 mm *б) R=90 mm*

Фиг.11. *Разпределение на изолиниите на реализираната осветеност в промишления цех*

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Правилният избор на основните настройки на изчисленията по метода Монте Карло Raytracing оказват съществено влияние върху точността на извършвания фотометричен анализ за изследваната оптична система.

Критерии за избор на оптималното решение са светлоразпределението, КПД на осветителя и получаваните светлотехнически показателите за примерен промишлен обект. Представените сравнителни резултати за различните вариантни форми на лещата показват, че няма пълно съвпадение между оптималните варианти, оценени по различните критерии. Предлага се избор на крайно решение чрез комплексна оценка с водещ критерий - максимизиране на количествените светлотехнически показатели на примерната LED осветителна уредба.

Сравнителният светлотехнически анализ от реализираните количествени и качествени показатели за промишлен цех не показва значително изменение на реализираната средна осветеност с точен екстремум. Най-високи средни осветености се получават при вариантите с по-голям радиус на външната дъга на лещата (от R=70 mm до R=100 mm – табл.2). Аналогичен е резултатът за показателя за електроенергийна ефективност на осветителните уредби „W/m^2 /100 lx“, който се понижава слабо с увеличаване на външния радиус R на лещата - табл.2. При моделиране на по-големи радиуси на външната дъга на лещата (варианти R=60 mm, R=70 mm, R=80 mm, R=90 mm и R=100 mm), се получават по-широки и близки до желаната форми на светлоразпределителните криви в напречната равнина на LED осветителя - фиг.9. За изследваната оптична леща, КПД на LED осветителя се изменя нелинейно и има два екстремума, като за оптимален по този критерий се приема варианта с външен радиус R=70 mm, тъй като при другия екстремум, светлоразпределението не е близко до оптималното (табл.1, фиг.8). Комплексната оценка по критериите за избор на оптимално решение показва, че най-целесъобразен е варианта с външен радиус на лещата R=70 mm.

Реализираните в разработката изследвания и производството на прототип на промишлен LED осветител, потвърждават работоспособността на предлаганата методология за проектиране и оптимизация на формата на оптични лещи.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Цанков, П. ***Оптимизация на оптични системи на осветителни тела***. Дисертационен труд, Габрово, 2013.

[2] Цанков, П. ***Проектиране на оптична леща за светлодиод***. УНИТЕХ'2011, 18–19 ноември 2011, Габрово, 2011.

[3] Василев, Х., В. Георгиев, Г. Ганчев, М. Недева, Б. Мечков. ***Оптимизиране светлоразпределението на офисни осветители***. XV Национална конференция с международно участие BulLight 2014, 10-13 юни 2014, Созопол, 2014.

[4] Myer, M., M. Paget, R. Lingard. ***Performance of T12 and T8 Fluorescent Lamps and Troffers and LED Linear Replacement Lamps***, CALiPER Benchmark Report for U.S. Department of Energy, 2009.

[5] БДС EN 12464-1:2011 – ***Светлина и осветление. Осветление на работни места. Част 1. Работни места на закрито***.

[6] ***SolidWorks – Базово моделиране и чертежи*** - ДиТра ООД, 2012.

[7] ***Photopia – Optical design and analysis software focused on lighting.***

[8] www.ltioptics.com/en/photopia-swaddin-2015.html.

[9] www.relux.biz - Software ReluxPro.

Автори: Милко Тодоров Йовчев, ас. инж., лаборатория „Осветителна и инсталационна техника“, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Технически университет - Габрово, E-mail address: *milkoyovchev1986@gmail.com*; Пламен Ценков Цанков, доц. д-р. инж., лаборатория „Осветителна и инсталационна техника“, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Технически университет - Габрово, E-mail address: *plamen@tugab.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл. ас. д-р Ива Петринска

МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА КОЛИЧЕСТВЕНИТЕ И КАЧЕСТВЕНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ДНЕВНАТА ЕСТЕСТВЕНА СВЕТЛИНА

Ива Петринска, Дилян Иванов

Резюме: *Настоящата публикация представлява литературен обзор методите за количествена и качествена оценка на дневното естествено осветление. На база на разгледаните литературни източници е избран подход за оценка на качеството и количеството на естествената светлина, навлизаща в помещения със странични светлинни отвори. Поради динамиката на дневната светлина и необходимостта от поне едногодишни измервания на хоризонтална и вертикална естествена осветеност, в доклада са публикувани частични резултати за избраните количествени и качествени показатели, заснети със специално окомплектован лабораторен стенд.*
Ключови думи: *количествена и качествена оценка на естествено осветление, вертикална осветеност, коефициент на естествено осветление, отношение вертикална – хоризонтална осветеност*

METHODS FOR ESTIMATION OF THE QUALITY AND QUANTIY OF THE NATURAL DAYLIGHT

Iva Petrinska, Dilian Ivanov

Abstract: *The current publication presents the methods for qualitative and quantitative estimation of daylight in buildings' interiors. Based on literature overview an approach for daylight quality estimation in side lit rooms is chosen. Because of the dynamic character of the natural light and the necessity of at least yearlong measurement of the horizontal and vertical illuminance from daylight, the paper presents only partial results on the qualitative and quantitative characteristics of daylight, taken with specialized laboratory equipment*
Keywords: *qualitative and quantitative estimation of daylight, vertical illuminance, daylight factor, vertical to horizontal illuminance ratio*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Дневната светлина е единственият естествен светлинен източник и има динамичен характер. С времето се променят нивото на осветеност, създадена от нея, посоката й на разпространение и спектралният й състав, което оказва положително влияние върху хората - както визуално така и невизуално. Визуално разпределението на естествената светлина в дадено вътрешно пространство влияе не само върху видимостта, но и върху възприятието на дадено пространство. Посредством оптимизиране на използването на естествената светлина като основен

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

светлинен източник е възможна значителна икономия на електрическа енергия за изкуствено осветление. Максималното използване на естествената светлина в сгради, обаче не трябва да води до визуален или топлинен дискомфорт. Ето защо е необходимо да се оцени оптималното съотношение на проникващата в помещенията естествена светлина и използването на слънцезасенчващи устройства. С цел максимално използване на наличната дневна светлина, архитектите интегрират слънцезащитни устройства още при проектирането на сградни фасади. Освен изследванията по отношение възможностите за икономия на електрическа енергия за осветление е необходимо да се обърне внимание и на индивидуалните светлинни предпочитания на обитателите на сградното пространство по отношение на светлинните нива и проникването на директна слънчева светлина.

Настоящата публикация се занимава с литературен обзор на методите за оценка и определяне на качеството на дневната естествена светлина и приложението им за конкретни експериментални изследвания, извършени в ТУ-София. Целта на изследването е да се отговори на три основни въпроса а именно:

- Какви са преимуществата на дневната естествена светлина?
- Кои характеристики на естествената светлина оказват влияние върху методите за оценка на качеството й?
- Какви изчислителни методи и методи за оценка на качеството на дневното естествено осветление съществуват и служат за изучаването му.

2. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

2.1. ПРЕИМУЩЕСТВА НА ЕСТЕСТВЕНАТА СВЕТЛИНА СПРЯМО ИЗКУСТВЕНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ

Съществуват изследвания, показващи, че естествената светлина е предпочитана от хората [1], [2], тъй като тя е по – „удобна“ от изкуственото осветление и води до намаляване на стреса от работата. Според [3] хората предпочитат наличието на прозорци в работната им среда, като 73% от запитаните отбелязват, че наличието на осветителни отвори е важно и само 4% показват предпочитание на изкуствената пред естествена светлина. Според [4] болшинството офис служители и студенти вярват, че работата им е най-ползотворна, когато се намират в помещения, в които е налична естествена светлина.

Въпреки, че изкуственото осветление може да осигури добра видимост на зрителната задача, добавката на естествена светлина прави помещенията по-атрактивни. Според [5] кратковременните промени на естествената светлина водят до разнообразие по начин, който не може да се постигне с изкуствено осветление. Основната причина, поради която хората предпочитат естествената светлина, обаче е факта, че тя е полезна за здравето [6], [7], [8]. В мащабно проучване [9] е установено, че офис служители, които не са изложени на достатъчно дневна светлина страдат по-често от умора, болки в главата или очите. Понастоящем голям интерес представляват изследванията на влиянието на светлината върху циркадните ритми на човека [2].

2.2. ОЦЕНКА НА ЕСТЕСТВЕНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ

Посредством постоянни промени в зрителния анализатор и адаптационната способност на мозъка, хората имат огромен естествен капацитет да променят чувс-

твителността си към светлина [10], [11]. Освен това светлинните възприятия и предпочитания варират в широки граници от човек до човек [10], [2]. Това прави качеството на естествената светлина трудно за оценяване. Когато става въпрос за оценка на естествената светлина, навлизаща през прозоречни площи е необходимо да се обърне внимание на два допълнителни критерия: естествената светлина се променя динамично и е необходимо дълготрайно изследване; яркостта на прозоречните площи не може да бъде разграничена от съдържанието и приятността на гледката. Психологическият аспект на възприятието на естествената светлина не може да бъде пренебрегнат. Той може да бъде изследван с помощта на субективни критерии за оценка [12]: колко естетична е компонентната на естествената светлина (прозорец, щори, материали); колко привлекателни са светлинните ефекти в помещенията (разпределение на светлината, светлинни лъчи, отражения, цветове); доколко приятна и необходима е гледката навън.

2.3. ОСВЕТЕНОСТ НА РАБОТНОТО МЯСТО И РАВНОМЕРНОСТ НА ОСВЕТЕНОСТТА

Осветеността е оценка за количеството светлина, което попада на дадена площ от определена повърхност. Обикновено стандартите за осветление поставят изискване за определено минимално ниво на хоризонталната осветеност на работната повърхност. В европейския стандарт EN 12464-1 [13] са оказани минимални нива на хоризонталната осветеност за различни типове помещения. Тъй като нивата на естествена осветеност варират с времето, тези изисквания важат основно за изкуственото осветление. В помещения с налична дневна светлина, предпочитаните нива на осветеност от електрическото осветление зависят от разстоянието на работната повърхност до прозоречните площи [2]. Съществуват множество изследвания, които показват, че като цяло в работните пространства се предпочитат по-високи нива на осветеност от предписаните в стандарта [16], [14], [15]. Според [17] ако слънцезащитните устройства се контролират автоматично, минималното ниво на осветеност в офис помещения трябва да бъде 650 lx на нивото на работната повърхност. Освен това вариацията на светлинните нива трябва да бъде в рамките на 40% от нивото на осветеността на работната повърхност.

Въпреки, че различни автори в разработките си показват предпочитания към по-високи нива на осветеност, според изследване на осветлението на съвременни офиси в Европа, повечето хора са доволни от светлинните условия на работните си места [11]. В същото изследване оценката на осветлението показва, че то почти не зависи от нивата на осветеност. Според [9] нивото на хоризонтална осветеност има незначително влияние върху представянето на работещите - те са по-чувствителни към промяната на нивата на естествената осветеност.

Резултатите в съществуващите литературни източници по отношение равномерност на осветеността и предпочитани светлинни нива не се съгласуват и не водят до единствен извод. Като цяло стандартите предписват минимално ниво на осветеност на работната повърхност, като предпочитанията на хората са към по-високи от предписаните осветености. Също така са приемливи по-високи от-

ношения между осветеността на работната повърхност и обкръжението й, отколкото стандарта предписва [18], [19], [14]..

2.4. ВЕРТИКАЛНА ОСВЕТЕНОСТ

Понастоящем се правят множество проучвания на възможността за използване на вертикална, а не хоризонтална осветеност като основна количествена оценка на осветлението. Това се налага от факта, че офис работата е свързана с използването на компютъри и човешките невизуални нужди от естествена светлина изглежда се отнасят по-скоро за нивата на вертикалната осветеност, отколкото на хоризонталната такава [20], [21], [22], [23]. Литературата все още не дава ясно и изчерпателно обяснение на въпроса какви трябва да бъдат нивата на вертикалната осветеност. Европейският стандарт EN 12464-1 [13] поставя изискване за средна цилиндрична осветеност, която представлява средна вертикална осветеност на повърхността на цилиндър, която трябва да бъде поне 50 lx с минимално ниво на неравномерността на осветеността U_0>1,10. В [20] е установено, че вертикална осветеност на нивото на окото от 1000 до 2000 lx се приема нормално и не води до заслепяване, но такива високи нива на осветеност не се постигат през целия ден.

2.5. КОЕФИЦИЕНТ НА ЕСТЕСТВЕНА ОСВЕТЕНОСТ (КЕО), АВТОНОМНОСТ НА ЕСТЕСТВЕНАТА СВЕТЛИНА (DA) И ПОЛЕЗНА ЕСТЕСТВЕНА ОСВЕТЕНОСТ (UDI)

КЕО е много използвана мярка за определяне нивата на естествена осветеност в помещения. КЕО представлява отношение между осветеността в помещението и дифузната съставка на осветеността навън в същото време [24], [25]. Разпределението на яркостите при тези условия се дефинира по формулата на Муун и Спенсър [26]:

$$L(\alpha) = L_z \frac{1+2cos\alpha}{3} \quad (1)$$

където L(α) е яркостта на небосвода, L_z е яркостта при зенит и α е ъгъл на издигане на слънцето.

Небесната компонента е най-важната компонента на КЕО. Други фактори, които му влияят са компонентите на вътрешно и външно отражение и светлинните загуби в прозорците. КЕО може да бъде определен по изчислителен и експериментален начин. Най-често този показател се изчислява по формулата [25]:

$$\text{КЕО} = (SC + ERC + MF.IRC)C_g \quad (2)$$

където КЕО е коефициента на естествена осветеност SC е небесната компонента, ERC е компонентата на външното отражение, MF е експлоатационен фактор, IRC е компонентата от вътрешно отражение и C_g е коефициент, зависещ от остъклението.

В много държави стандартите за естествено осветление предписват минимална стойност на коефициента на естествена осветеност в помещението или на височината на работната повърхност [27]. Минималните нива варират от 0.75% до 2%. Коефициент на естествено осветление от 1% е минималното ниво при което естествената осветеност се възприема като преобладаваща от хората [28], [18]. Когато КЕО е по-голям от 3%, съответното работно място се възприема като много добре осветено с естествена светлина. В [18] е доказано, че при стойности

на КЕО по-големи от 5% може да има заслепяване, особено при работа с компютър. Според [28] при стойности на КЕО над 10% се появяват и проблеми с инфрачервената компонента на слънчевата радиация. Научна обосновка на горепоменатите стойности и адекватността на показателя КЕО за описание на качеството на естественото осветление е дадена от [29]. Недостатъците на този показател са, че: по дефиниция не би следвало до работната повърхност, на която се прави измерването на осветеността да достига пряка слънчева светлина, а навън се отчита само дифузната съставка на осветеността; измерените стойности на този показател варират значително при условия на плътна облачност; той се определя трудно при ясно небе, тъй като се променя с позицията на слънцето; осветлението на повърхности, различни от работната оказва решаващо влияние върху възприятието на пространството като осветено. Това налага търсенето на допълнителни критерии за оценка на количеството и качеството на дневното естествено осветление. Според [20] такъв индикатор е отношението на вертикалната и хоризонтална осветеност (ВХ) за дадено работно място. Той може да се използва като показател за оценка на естественото осветление тъй като: вариациите на КЕО в дадено пространство при определени условия са значително по-големи от тези на ВХ; ВХ дава информация за посоката на разпространение на навлизащата в помещението светлина; ВХ носи информация за качеството на осветлението по отношение на заслепяването; вариацията на ВХ с времето дава информация за промяната на разпределението на светлината в пространството; върху промяната на ВХ по-голямо влияние има вида на прозоречните площи, отколкото атмосферните условия. По абсолютните стойности на показателя ВХ може да се съди за наличие или отсъствие на директна слънчева светлина, заслепяване, контраст и баланс на естествената осветеност в пространството.

Като алтернатива на коефициента на естествена осветеност е възприето да се използват и базирани на климата измервателиза естествена осветеност. Най-често използваните такива величини са автономност на естествената светлина (DA) [30] и полезната естествена осветеност (UDI), [31]. DA се дефинира като процента часове от годината, през които прага на минимална осветеност се осигурява само от естествената светлина [30]. Прага на осветеността, който се използва при изследванията е 500 lx. Dietrich предлага да се изисква стойност на DA от 30% за офиси. UDI използва два прага за определяне на времето от годината, през което има прекомерно големи и съответно малки количества естествена светлина [31]. Горният праг е определен като 2000 lx, а долният – 100 lx.

2.6. АБСОЛЮТНИ ЯРКОСТИ И ЯРКОСТНИ ОТНОШЕНИЯ

Яркостта е мярка за количеството светлина, излъчвана от дадена повърхност в определена посока. Хората най-общо предпочитат вътрешни пространства с ярко осветени стени и тавани, с висока стойност на яркостта [32], [18], [19]. Абсолютната стойност на яркостта, определена в различни експерименти варира, което показва, че тя не е добра мярка за определяне на визуалния комфорт. Яркостните отношения описват по-добре възприеманата от човека яркост на околното пространство. Няколко стандарта препоръчват яркостно отношение между зрителната задача (компютърен екран или лист хартия) и непосредственото ѝ

обкръжение от 3:1 (ергорама) и отношение на яркостите от 10:1 между задачата и по-широкото обкръжение (панорама) [18], [33]. При естествено осветление тези стойности често се надвишават, тъй като хората толерират по-високи светлинни нива от естествена светлина, отколкото от електрическо осветление [34], [35], [36]. Остава неясно до какво ниво яркостният контраст е приемлив [18], [35]. В [20] е определено, че отношението между ярки източници и околните повърхности не трябва да е повече от 40:1, но е за предпочитане да бъде 20:1.
Съществуващите стандарти и препоръки за осветление се базират основно на визуални критерии. Резултати от изследване на влиянието на светлината върху циркадните ритми все още не са интегрирани в нормите. Изискванията за поддържане на определени светлинни нива се базират на статични ситуации, докато естествената светлина има динамичен характер, който е приятен за хората. В [21] е направено заключението, че целта за поддържане на постоянно ниво на осветеност (от естествена и изкуствена светлина) на работната повърхност в офиси с налично естествено осветление не е подход, който отговаря на човешките нужди от светлина. Вероятно е невизуалните ефекти да бъдат включени в стандартите в бъдеще, като вертикалната осветеност на нивото на окото е най-значимата оценка за тяхното действие. Според [20], [37] експозицията на по-високи нива на вертикалната осветеност през деня от характерните днес нива, а именно 1000-2000 lx вместо 200 до 500lx имат положителен ефект върху качеството на нощния сън. Според [23] спектралното разпределение на светлината също трябва да бъде измервано, тъй като светлинната чувствителност на циркадната система е различна от тази на зрителния анализатор (480 nm срещу 555nm пик). В [37] е установено, че цвета на светлината влияе върху качеството на съня.

2.7. ЗАСЛЕПЯВАНЕ ОТ ЕСТЕСТВЕНА СВЕТЛИНА

Един от основните недостатъци на естествената светлина е, че тя може да причини заслепяване, което от своя страна може да повлияе негативно работоспособността на хората [9]. Могат да бъдат разграничени два типа заслепяване: дискомфорт и физиологично заслепяване. За разлика от дискомфорта, заслепяването прави виждането невъзможно [38], [18]. Съществуват много модели за оценка на заслепяването от изкуствено осветление. Заслепяването от естествената светлина, обаче изглежда по-лесно за прогнозиране, отколкото са моделите на заслепяване от електрическо осветление [2]. Именно затова са създадени няколко метода за оценка на заслепяването от естествена светлина, най-използваните от които са DGI [26], DGIN [39], PGSV [40], and DGP [41]. За да се определи възможността за поява на заслепяване може да се използват и яркостния контраст и яркостните отношения в помещенията. За този тип анализ могат да бъдат използвани яркостни хистограми [42], [43]. Този вид хистограми могат да се базират на снимки от HDR камера. За обработка на снимките може да се използва специализиран софтуер Radiance.

3. МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА ЕСТЕСТВЕНАТА СВЕТЛИНА

Съществуват много инструменти за оценка или измерване на светлинните нива във вътрешни пространства. Използват се програми за светлинни симулации за

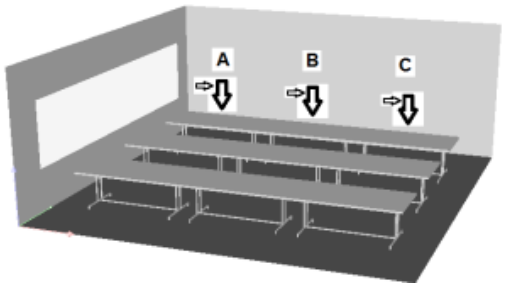
изчисляване на нивата на естествена осветеност в новостроящи се сгради. Такива са Radiance, Desktop Radiance, Adeline, DAYSIM, Dialux, ReluxSuite, Daylight Visualizer. Тези програми имат недостатъка, че не включват възможността за анализ на гледката навън и визуалните качества на прозорците. Преди бързото развитие на компютърните технологии, проектанти и изследователи са използвали числови методи, диаграми и/или таблици. В [44] тези похвати са разделени на следните категории: уравнения, прости стъпкови методи; луменови методи, таблици, номограми, протрактори, точкови диаграми, диаграми на Уолдрам, методи за градски анализ, контрол на заслепяването. В гореизброените методи за оценка не са включени слънчевите диаграми, които дават яснота за периода от време, през който в дадено пространство би навлизала естествена светлина в условия на ясно небе [34]. Не са разгледани и методите за оценка чрез интервюта и въпросници по отношение на предпочитанията на хората за светлинната ситуация в различни помещения (Post Occupant Evaluations POE).

4. ПОДХОД ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ДНЕВНАТА СВЕТЛИНА И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Фокусът на настоящото изследване е насочен към работата на хората през светлата част от денонощието. Според [20] светлинният поток, попадащ върху ретината е определящата величина за оценка на светлинната експозиция на човешкото око. Тази величина, обаче не може да бъде директно използвана, тъй като е невъзможно коректното й измерване и определяне. Универсално измеримата и директно свързана с проектирането на осветителни уредби величина е вертикалната осветеност пред окото. Посредством измерване на хоризонтална осветеност на нивото на работната повърхност и вертикалната осветеност на нивото на окото при различна посока на наблюдение и позиция на наблюдателите в лабораторни условия при дневно естествено и смесено осветление се получава триизмерна карта на помещението, която показва като визуалните, така биологичните „тъмни и светли“ петна. Това е достатъчна информация за проектиране на здравословна светлинна среда.

В настоящото изследване са включени четири помещения – учебни лаборатории съответно със северно, южно, западно и източно географско изложение със странично естествено осветление фиг.1. Във всички тях са разположени системи за измерване на хоризонтална осветеност – в три точки в дълбочина на помещението, разположени на най-задния ред работни места и измерване на вертикална осветеност за три ъгъла на наблюдение (напред и на 45 градуса наляво и надясно) на нивото на човешкото око (1.25 м) при седнал наблюдател. Зад датчиците за осветеност са поставени плоскости, които служат за симулация на засенчването от човешкото тяло над работната повърхност. Вертикалната и хоризонтална осветеност са извършени с калибрирани датчици с косинусна корекция. Разглежданите помещения се характеризират с бели стени и тавани и сив под. Столовете са бежови, масите – светло-зелени. Изкуственото осветление е изпълнено с T8 луминесцентни лампи, монтирани по 4 в осветители с двойно параболична огледална решетка. Освен хоризонталната осветеност в помещени-

ето, системата за измерване включва и датчик, отчитащ дифузната съставка на осветеността навън. Заснемането на гореизброените стойности на естествената осветеност става на всеки 5 минути. Целта на изследването е измерването на хоризонтални и вертикално осветености в помещения с различно географско изложение за период от поне една година. Посредством тази информация могат да бъдат определени средни стойност на показателя КЕО, както и отношението $E_{верт}/E_{хор}$. Резултатите от извършените изследвания са показани в табл.1.



Фиг.1. Общ изглед на контролните помещения и точки.

Таблица 1

Резултати от измерванията на хоризонтална и вертикална осветеност

	Точка 1=0,5м от прозорците						Точка 2=1,5м от прозорците						Точка 3=3м от прозорците								
Ориентация	Ex, lx	Ев 0°, lx	Ев 0°/Ex	Ев 45°, lx	Ев 45°/Ex	Ев-45°, lx	Ев-45°/Ex	Ex, lx	Ев 0°, lx	Ев 0°/Ex	Ев 45°, lx	Ев 45°/Ex	Ев-45°, lx	Ев-45°/Ex	Ex, lx	Ев 0°, lx	Ев 0°/Ex	Ев 45°, lx	Ев 45°/Ex	Ев-45°, lx	Ев-45°/Ex	Забележка
Изток	6400.00	2400.00	0.38	2800.00	0.44	1925.00	0.30	1700.00	1750.00	1.03	2075.00	1.22	1027.50	0.60	540.00	415.00	0.77	1557.50	2.88	312.50	0.58	Смесен ден
Запад	2740.00	1340.00	0.49	2820.00	1.03	790.00	0.29	584.00	380.00	0.65	802.50	1.37	243.50	0.42	160.00	111.00	0.69	290.50	1.82	103.00	0.64	
Север	1550.00	660.00	0.43	1405.00	0.91	605.00	0.39	503.00	360.00	0.72	740.00	1.47	225.00	0.45	120.00	130.00	1.08	245.00	2.04	85.00	0.71	
Юг	2840.00	1730.00	0.61	3070.00	1.08	1025.00	0.36	500.00	420.00	0.84	705.00	1.41	258.50	0.52	204.00	130.00	0.64	315.00	1.54	110.00	0.54	
Изток	2230.00	1960.00	0.88	3715.00	1.67	1075.00	0.48	670.00	1640.00	2.45	1980.00	2.96	888.00	1.33	255.00	220.00	0.86	305.00	1.20	198.50	0.78	Мрачен ден
Запад	3850.00	2320.00	0.60	3945.00	1.02	1271.50	0.33	662.00	330.00	0.50	780.00	1.18	230.00	0.35	242.00	160.00	0.66	395.00	1.63	142.50	0.59	
Север	4260.00	1808.00	0.42	3814.00	0.90	1068.00	0.25	1245.00	820.00	0.66	1780.00	1.43	480.00	0.39	420.00	250.00	0.60	664.00	1.58	172.50	0.41	
Юг	6050.00	1730.00	0.29	3070.00	0.51	1025.00	0.17	550.00	370.00	0.67	725.00	1.32	235.00	0.43	240.00	180.00	0.75	350.00	1.46	136.50	0.57	
Запад	1200.00	1400.00	1.17	2475.00	2.06	935.00	0.78	566.00	650.00	1.15	1235.00	2.18	425.00	0.75	275.00	260.00	0.95	585.00	2.13	218.00	0.79	Слънчев ден
Север	1528.00	1330.00	0.87	1915.00	1.25	765.00	0.50	507.00	380.00	0.75	880.00	1.74	240.00	0.47	280.00	170.00	0.61	385.00	1.38	130.00	0.46	
Юг	2600.00	2330.00	0.90	3305.00	1.27	1480.00	0.57	775.00	660.00	0.85	1105.00	1.43	417.50	0.54	400.00	420.00	1.05	605.00	1.51	290.00	0.73	
Запад	1150.00	1400.00	1.22	2135.00	1.86	805.00	0.70	530.00	700.00	1.32	1245.00	2.35	435.00	0.82	265.00	360.00	1.36	625.00	2.36	260.00	0.98	Слънчев ден
Север	1385.00	900.00	0.65	1675.00	1.21	555.00	0.40	485.00	420.00	0.87	880.00	1.81	270.00	0.56	230.00	135.00	0.59	347.50	1.51	127.50	0.55	
Юг	2370.00	2600.00	1.10	3690.00	1.56	1510.00	0.64	682.00	600.00	0.88	990.00	1.45	390.00	0.57	385.00	290.00	0.75	525.00	1.36	220.00	0.57	

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРОГНОЗИ ЗА БЪДЕЩА РАБОТА

Естествената светлина, навлизаща в затворени помещения посредством странични светлинни отвори е източник на значителна вертикална компонента на осветеност, за разлика от осветителните уредби за общо осветление. Отношението $E_{верт}/E_{хор}$ в зоната на прозорците е определящо в случай на естествено осветление. Независимо от посоката на наблюдение и позицията на наблюдателя в условия на изкуствено осветление $E_{верт}/E_{хор}$ остава почти постоянно докато при естествено осветление се променя чувствително. Интерес представлява и сравнението на отношението $E_{верт}/E_{хор}$ в случай на естествено осветление и смесено такова, което е обект на бъдеща работа. След едногодишни изследвания на хоризонталната и вертикална осветености в помещения с различно географско изложение се предвижда статистическа обработка и обобщение на резултатите, на базата на които да се разработи алгоритъм за управление на изкуственото осветление в сгради.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Показаните в настоящата публикация резултати са свързани с разработка по договор 152ПД0065-01.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Bodart, M., Deneyer, A., Analyse of the survey on the office workers' interest in windows, IEA 31, Subtask A, working document, 2004

[2] Galasiu, A.D., Veitch, J.A., Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review, Energy and Buildings, Vol. 38, No. 7, 2006, p. 728-742

[3] Roche, L., Dewey, E., Littlefair, P., Slater, A., Daylight in offices: occupant assessments, Proceedings of Lux Europa 2001, Reykjavik, Iceland, 2001, p. 435-440

[4] Veitch, J.A., Gifford, R., Assessing beliefs about lighting effects on health, performance, mood, and social behavior, Environment and Behavior, Vol. 28, No. 4, 1996, p. 446–470

[5] Collins, B.L., Review of the psychological reaction to windows, Lighting Research and Technology, Vol. 8, No. 2, 1976, p. 80-88

[6] Edwards, L., Torcellini, P., A literature review of the effects of natural light on building occupants, National Renewable Energy Laboratory, 2002

[7] Van den Beld, G. Van Bommel, W., Industrial lighting, productivity, health and well-being, 2001 Van der Linden, A.C., Bouwfysica, Utrecht/Zuthpen: ThiemeMeulenhoff, 2006

[8] Figueiro, M.G., Rea, M.S., Stevens, R.G., Rea, A.C., Daylight and productivity – a possible link to circadian regulation, Light and Human Health, Proceedings of EPRI/LRO 5th International Lighting Research Symposium, Palo Alto, 2002, p. 185-193.

[9] Heschong Mahone Group, Windows and offices: A study of office worker performance and the indoor environment, Technical Report for the California Energy Commission, 2003

[10] Boyce, P.R.,Human factors in lighting, 2nd edition, Lighting Research Center, London: Taylor &Francis, 2003

[11] Nicol, F., Wilson, M., Chiancarella, C., Using field measurements of desktop illuminance in European offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effect on occupant satisfaction, and the use of lights and blinds, Energy and Buildings, Vol. 38, No. 7, 2006, p. 802-813

[12] Fontoynont, M., Perceived performance of daylighting systems: lighting efficacy and agreeableness, Solar Energy, Vol. 73, No. 2, 2002, p 83-94 (www.sciencedirect.com)

[13] European Standard EN 12464-1 Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places, 2011

[14] Veitch, J.A., Newsham, G.R., Determinants of lighting quality 2: Research and recommendations, National Research Council of Canada, 1996

[15] Logadottir, A., Christoffersen, J., Fotios, S.A., Investigating the use of an adjustement task to set preferred illuminances in a workplace environment, Lighting Research and Technology, Vol. 43, NO. 4, 2011, p. 403-422

[16] Fleischer, S., Krueger, H., Schierz, C., Effect of brightness distribution and light colours on office staff: Results of the 'Lighting Harmony' project, Lux Europa 2001, Proceedings of the Ninth European Lighting Conference, Reykjavik, June 18-20, 2001, p. 76-80

[17] Kim, S.-Y, Kim, J.-J., Influence of light fluctuation on occupant visual perception, Building and Environment, Vol. 42, No. 8, 2007, p. 2888-2899

[18] Dubois, M., Impact of shading devices on daylight quality in offices; Simulations with Radiance, Lund University, Lund Institute of Technology, Department of Construction & Architecture, 2001

[19] Newsham, G.R., Marchand, R.G., Veitch, J.A., Preferred surface luminances in offices, by evolution, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 33, No. 1, 2004, p. 14-29

[20] Ariës, M.B.C., Human lighting demands: Healthy lighting in an office environment Eindhoven: Technical University of Eindhoven, Faculty of Architecture, Building and Planning, 2005

[21] Begemann, S.H.A., Van den Beld, G.J., Tenner, A.D., Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 20, No. 3, 1997, p. 231-239

[22] Cuttle, C., Towards the third stage of the lighting profession, Lighting Research and Technology, Vol. 49, No. 1, 2010, p. 73-93

[23] Heschong, L, Roberts, J.E., Linking daylight and views to the reduction of sick building syndrome, Proceedings of Healthy Buildings 2009, paper 797

[24] Van der Linden, A.C., Bouwfysica, Utrecht/Zuthpen: ThiemeMeulenhoff, 2006

[25] Robbins, C.L., Daylighting: Design and Analysis, New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1986

[26] Hopkinson, R.G., Glare from daylighting in buildings, Applied Ergonomics, Vol. 3, No. 4, 1972, p 206-215
[27] Tiimus, P., Daylighting standardisation in northern Europe, MSc report, University College London, The Barlett School of Graduate Studies, 2007
[28] Dietrich, U., Daylight - Characteristics and Basic Design Principles, Lighting Design: Principles, Implementation, Case Studies, 2006, p. 16-41
[29] Roche, L., Dewey, E., Littlefair, P., Occupant reactions to daylight in offices, Lighting Research and Technology, Vol. 32, No. 3, 2000, p. 119-126
[30] Reinhart, C.F., Walkenhorst, O., Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds, Energy and Building, Vol. 33, No. 7, 2001, p.683-697
[31] Nabil, A., Mardaljevic, J., Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors, Energy and Buldings, Vol. 38, No. 7, 2006, p. 905-913
[32] Wright, M.S., Hill, S.L., Cook, G.K., Bright, K.T., The perception of lighting quality in a nonuniformely lit office environment, Facilities, Vol. 17, No. 12/13, 1999, p. 476-484
[33] Andersen, M., Light distribution through advanced fenestration systems, Building Research &Information, Vol. 30, No. 4, 2002, 264-281
[34] Hopkinson, R.G, Bradley, R.C., Glare from very large sources, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 55, No. 5, 1965, p. 288–297
[35] Veitch, J.A., Psychological processes influencing lighting quality, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 30, No. 1, 2001, p. 124-140
[36] Parpairi, K., Baker, N.V., Steemers, K.A., Compangon, R., The luminance differences index: a new indicator of user preferences in daylit spaces, Lighting Research and Technology, Vol. 34, No. 1, 2002, p. 53-66
[37] Hubalek, S., Brink, M., Schiertz, C., Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood, Lighting Research and Technology, Vol. 42, No. 1, 2010, p. 33-50
[38] Tuaycharoen, N., Tregenza, P.R., View and discomfort glare from windows, Lighting Research and Technology, Vol. 39, No. 2, 2007, p. 185-200
[39] Nazzal, A.A., A new daylight glare evaluation method, Journal of Light and the Visual Environment, Vol. 24, No. 2, 2000, p. 19-27
[40] Tokura, M., Iwata, T., Shukuya, M., Experimental study on discomfort glare caused by windows: Development of a method for evaluating discomfort glare from a large light source, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering – Transactions of Architecture Institute (Japan), No. 489, 1996, p. 17-25
[41] Wienold, J., Christoffersen J., Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras, Energy and Buildings, Vol. 38, Issue 7, 2006, p. 743-757
[42] Davies, M., Raynham,, P., Osterhaus, W., Curtis, S., A different toolbox for glare studies – can new techniques improve our understanding of glare, LUX-Europa 2005, Proceedings of the Tenth European Lighting Conference, Berlin, 2005, p. 452-456
[43] Osterhaus, W., Analysis of luminance histograms for the assessment of discomfort glare in daylit offices, Proceedings of Balkan Light, 2008, p. 155-164
[44] Baker, N.V., Fanchiotti, A., Steemers, K., Daylighting in Architecture: A European Reference Book, London: CEC DGII/James & James, 1993 (Chapter 9: Evaluation and design tools, and Appendix F: Review of design tools)
[45] Hygge, S., Löfberg, H.A., Post occupancy evaluation of daylight in buildings, Report of IEA Task 21/Annex 29, 1999
[46] Meerdink, G., Rozendaal, E.C., Witteveen, C.J.E., Daglicht en uitzicht in kantoorgebouwen, DGMR, ISBP, 1988

Автори: Ива Чавдарова Петринска, гл. ас. д-р, катедра ЕСЕОЕТ, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *ipetrinska@tu-sofia.bg*; Дилян Иванов, ас., катедра ЕСЕОЕТ, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *divanov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл. ас. д-р Иван Ангелов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛИ

Христо Василев, Станимир Стефанов

Резюме: *В доклада са разгледани условия за използване на фотоволтаични улични осветители със стандартни фотоволтаични панели, както и с такива, с повишено КПД и понижена цена, със светлодиоди с повишен светлинен добив и при използване на акумулиращи батерии с възможности за нормално функциониране при ниски температури. Анализа е извършен на база на енергийните характеристики и цените на наличните към момента на пазара фотоволтаични системи и осветители, и на очакваните да се появят в близко бъдеще тънкослойни фотоволтаични системи с повишено КПД и осветители с по-висок светлинен добив.*
Ключови думи: *светлинен добив, улични осветители, фотоволтаични системи*

RESEARCH OF THE POSSIBILITIES FOR APPLICATION OF PHOTOVOLTAIC STREET LUMINAIRES

Hristo Vasilev, Stanimir Stefanov

Abstract: *In the report was carried out research into the possibilities for application of photovoltaic street LEDs luminaries with increased luminous efficacy, thin-film photovoltaic cells with increased efficiency and reduced costs, and by using rechargeable batteries capable of normal operation at low temperatures. The study was carried by comparison of energy features and prices on currently available on the market photovoltaic systems and luminaires with high luminous efficacy and expected to appear in the near future thin-film photovoltaic systems and luminaires with higher luminous efficacy.*

Keywords: *luminous efficacy, photovoltaic systems, street luminaries*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Обсъждането на възможностите за използването на фотоволтаични системи в уличното осветление на територията на Р България и реализирането на улични уредби с такива системи предизвиква доста спорове относно тяхната ефективност. В повечето случаи тези спорове се основат на ЗА или ПРОТИВ фотоволтаичните системи за улично осветление като цяло, без да се отчита, че различните улици, характеризиращи се с различни светлини класове, ще имат различни енергийни потребности относно уличното им осветление. Съответно тези различни енергийни потребности биха могли да се удовлетворят с едно или

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

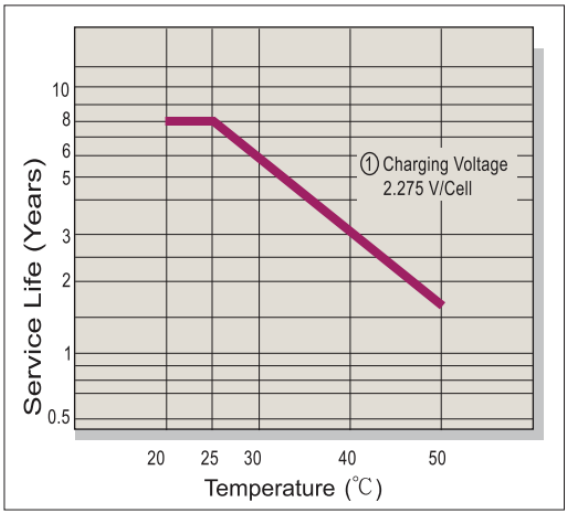
друго техническо решение (включително и чрез използването на фотоволтаични или хибридни системи), в зависимост от икономическите параметри на решенията и качеството на използваните в тях елементи. Основният проблем е в това, да се изясни за какви енергийни потребности са удачни фотоволтаичните системи и доколко такива системи са ефективни при конкретни климатични условия през зимния сезон в конкретни райони на територията на нашата страна, ако те бъдат реализирани като индивидуални фотоволтаични комплекти „осветител-фотоволтаик-батерия“, както и с какви технически параметри е необходимо да бъдат техните елементи и каква ще е цената им.

2. ОСНОВНИ АКТИВНИ ЕЛЕМЕНТИ НА УЛИЧНИТЕ ФОТОВОЛТАИЧНИ ОСВЕТИТЕЛИ

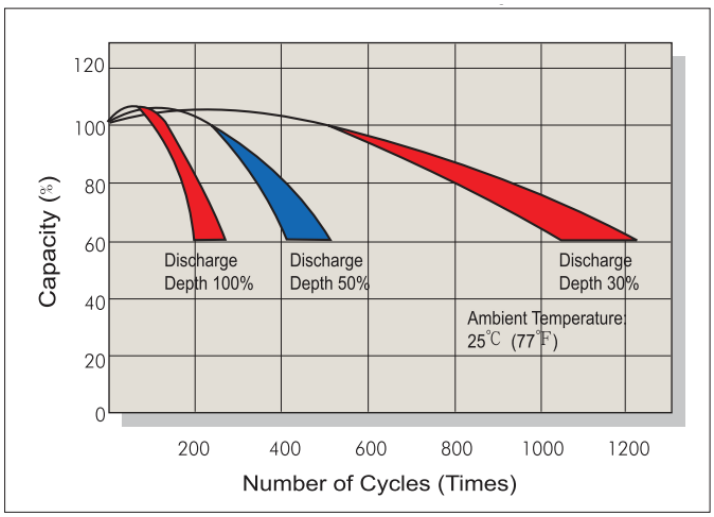
Основен и най-уязвим елемент на фотоволтаичните улични осветители са акумулиращите батерии. Ако се използват най-евтините типове батерии - оловно-киселинните батерии, то трябва да се има в предвид, че те обикновено имат малък брой цикли при дълбок разряд и се нуждаят от прецизно управление на зареждането за да запазят своите параметри продължително време. Нуждата от управление на зареждането на такава батерия според околната температура е – за всеки 1 градус над 25°C трябва да се свалят 0,005V и за всеки 1 градус под 25 градуса трябва да се добавят 0,005 V[6].

Продължителността на живота на батериите е зависим от температурата при която те функционират – по-високата температура води до по-бързи химически реакции, което скъсява живота на батериите. Така примерно приблизително може да се каже, че за всеки 10 градуса по-висока температура на околната среда, един месец живот на батерията се брои за два – например, ако номиналната температура за нормално функциониране на батерията е 25 °C, то при 35 °C температура на околната среда за един месец тя ще се амортизира толкова, все едно че е работила 2 месеца при 25 °C[6].

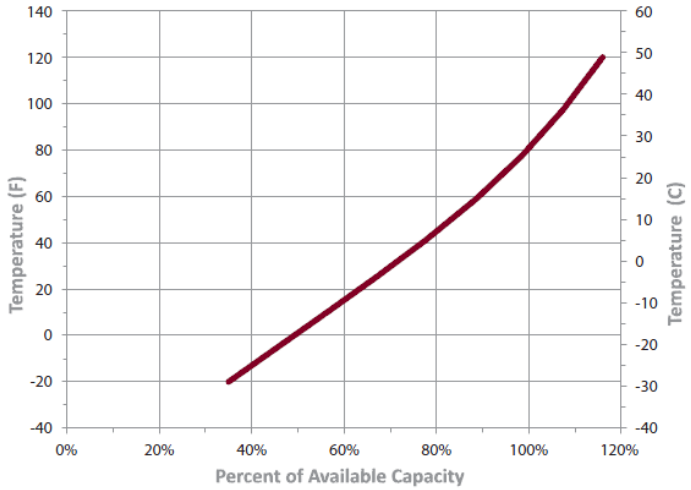
Дълбочината на разряда, съкращаваща значително броя цикли - фиг.2, в



Фиг.1. [1]



Фиг.2. [1]



Фиг.3. [6]

комбинация със значително редуцирания енергиен капацитет при работа при ниски температури - фиг.3, са предпоставки за силно съкращаване на живота на батерията и тя, ако не е с удачно подбран енергиен капацитет, не би могла да осигурява необходимото количество енергия и да издържи проектния си експлоатационен срок. Превенция срещу ниските температури е батериите да се монтират на дълбочина под замръзващия почвен слой, който за различните райони у нас е 0,2÷1,5m.

Естествено, освен оловно-киселите батерии са разработени и други видове батерии, и то специално за нуждите на фотоволтаичните системи с акумулиращи елементи. Тези батерии, при 50% разряд при номинална работна температура от 25^{o}C, достигат почти десетократно по-голям брой цикли в сравнение с оловно-киселите, но те имат недостатъците, че техния работен диапазон е основно в рамките на положителните температури [3] и са със значително по-високи цени.

Очевидно е, че по отношение на батериите на фотоволтаичните улични осветители, когато се извършва техния избор те трябва да бъдат съобразени с: долната и горната граница на температура на околната среда; енергийният капацитет на батерията, който е разполагаем при тези температури; количеството енергия, което ще е необходимо да отдаде акумулиращия елемент; възможността този акумулиращ елемент да захранва съответния осветител с необходимата мощност достатъчно дълго време – например през зимата в продължение на 3 нощи по 14 часа, и то без да има възможност да бъде зареден от фотоволтаичния панел. В противен случай се попада в ситуация, задаваща следния въпрос - за какво ни е такава осветителна уредба, когато ще останем без осветление в най-дългите нощи при лоши климатични условия. Естествено избора трябва да бъде съобразен и с цената и да е ясно указано, след колко години или дни ще е необходимо акумулиращите елементи да бъдат подменени с нови и колко би струвала фотоволтаичната уредба за един 10 годишен цикъл, отчитайки, че батериите се явяват „консуматив“.

Втория основен елемент от фотоволтаичните осветители за улично осветление е фотоволтаичният панел. Използваните в уличното осветление към момента фотоволтаични панели са с КПД между 10% и 16% при температура 25^{o}C, като панелите се монтират неподвижно на стълбовете от уличното осветление с наклон

от 30^{o} спрямо хоризонта, а КПД на използваните инвертори е между 95% и 98%. Цената на тези панели в комплект със стойността на инверторната система и носещата конструкция на панела към момента е около 0,65€ за 1 Wp мощност. Първия въпрос, който следва да се разгледа е как тези панели биха зареждали акумулиращите елементи с количеството електрическа енергия, което е необходимо за нуждите на уличното осветление при различните сезонни условия. Очевидно е, че генераторните мощности на панелите трябва да бъдат съобразени с нуждите от енергия и с най-лошите сезони условия за нейния добив – зимно време при ниски температури и слаба слънчева радиация, което означава, че тяхната площ трябва да е такава, че за светлата част на денонощието те да произведат количеството енергия с което батерията да покрива нуждите на осветителя за минимум една нощ. За да имаме максимална ефективност на преобразуването на слънчевата енергия в най-лошите условия, фотоволтаичния панел следва да бъде монтиран така, че слънчевите лъчи през зимата да попадат максимално близо до перпендикулярно на неговата повърхност – тоест той да е ориентиран спрямо положението на слънцето през зимата или с възможност за сезонно позициониране.

Третия елемент във фотоволтаичните улични осветители е уличният осветител. В случая е очевидно, че за да можем да се възползваме от предимствата на автономността на фотоволтаичните улични осветителни системи е необходимо светлинния източник и осветителното тяло като цяло да се характеризират с висок светлинен добив, тъй като по-високият светлинен добив предполага по-ниски инсталирани мощности, съответно по-малък капацитет на акумулиращите елементи и по-малки фотоволтаични панели. Използваните към момента улични осветители със светлодиоди се характеризират със светлинен добив в границите на 135 lm/W – 160 lm/W.

Ако използваме осветител със светлинен добив160 lm/W, за да реализираме средна яркост L_{av} = 0,3 cd на улица с широчина от 7 m и при междустълбово разстояние 30 m, ще ни е нужно осветителят да е с мощност мощност $P_{осветител}$ = 12 W. Ако сме в зимния сезон и акумулиращият елемент е при температура на околната среда близка до нулата, неговият разполагаем капацитет (зависещ от температурата - фиг.3) ще е 70%. Съответно, за да осигурим осветление в рамките на 14 часа, ще имаме нужда от 14x12 = 168 Wh електрическа енергия, от където следва, че акумулиращият елемент – батерия би следвало да е с енергиен капацитет минимум 240 Wh. Ако напрежението на системата е 12 V, то батерията следва да е с капацитет 20 Ah. Ако се запасим за още две нощи по 14 h, капацитета на батерията трябва да бъде 60 Ah(при 100% разряд), като тази стойност поставя цена на батерията над 120лв./ бр. на дребно. Ако желаем разряд на батерията да е до 50%, тя следва да е с капацитет 120Ah.

3. ОЧАКВАНО РАЗВИТИЕ НА ПРИЛОЖЕНИЕТО НА ФОТОВОЛТАИЧНИТЕ УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛИ

До колко цената на фотоволтаичните улични осветителни уредби би била оправдана на фона на цената на електрическата енергия и най-вече в частта свързана с акумулиращите елементи и фотоволтаичните панели? Най-вероятно би

била оправдана и то в близко бъдеще. Причината в световен мащаб за това е декларирането от множество ръководители на икономически водещи държави, включително и на президента на САЩ в края на Август месец тази година, че тези държави (включително и САЩ) ще се ориентират към закриване на производството на електроенергия от изкопаеми горива (най-вече въглища) и ще преминават към производството на електроенергия от ВЕИ, което за сега означава основно производство на енергия от слънцето. В национален мащаб причината за вдигането на цената на електроенергията би била освен високата цена на енергията от ВЕИ и изключването на ТЕЦ-ове, така и постоянно повишаващите се разходи свързани с разпределение на електроенергията и с управлението и поддръжката на електроенергийната система.

Какви са технологичните възможности за повишаване ефективността на фотоволтаичните улични осветители?

Една от възможностите, които най-вероятно ще бъде реализирана в съвсем близко бъдеще е появата на улични осветители със светлинен добив 220 - 240 lm/W. Основание за това ни дават съобщенията за достигнатите параметри на светлодиодни източници от водещи производители, развитието на светлодиодните технологии и на използваните в производство на светлодиодни осветители материали и технологии. Появата на такива осветители би довело до почти 40% намаление както в капацитета на използваните акумулиращи елементи, така и на фотоволтаичните панели и значително би понижило разходите за тях.

Друга възможност са съобщения в публичното пространство, като например в [3], за постигнати показатели свързани с тънкослойните фотоволтаици. През 2011-2012 година компания в Япония е постигнала в лабораторни условия 43% КПД на базата на използване на структура от комбинацията на галий – индий - арсен [4]. През 2013 в [3] бе публикувано, че японски учени са разработили тримерна архитектурна структура на фотоволтаичния слой, използвайки „гъбеста“ структура на медта, с което КПД на фотоволтаичните панели може да достигне до 35-45 %. През Декември 2014 година се появиха публикации за създаване на органични покрития, свързващи се с неорганични полупроводници, в резултат на което, ефективността на фотоволтаичните панели в лабораторни условия е повишена на 46% [5]. През Юни 2015 година се появиха публикации, че в САЩ са създадени и предстои пускане на пазара на тънкослойни фотоволтаици с КПД = 25% и с цена, равна на 1/3 от цената на произвежданите към момента поликристални и тънкослойни фотоволтаици. През Август 2015 година в [3] бе публикувано съобщение за разработен материал от органични багрила, който нанесен върху фотоволтаичните панели в тънък филм преобразува синята част от спектър в по-дълговълново лъчение и повишава използваемостта на спектралното излъчване, съответно КПД на фотоволтаичните панели.

Ако споменатите по-горе показатели бъдат достигнати и в извънлабораторни условия, то ефективността на фотоволтаичните панели би довела до намаляване на техните размери и цена, и повишаване на възможността им те да генерират електрическа енергия в дни със слаба слънчева радиация и/или при зимни климатични условия.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Очевидно е, че е невъзможно да се обобщи, дали използването на фотоволтаичните улични осветителни уредби (включително хибридни с двигател-генератор или с частично ползване на традиционна електрическа мрежа) е икономически по-изгодно или по-неизгодно от използването на традиционните. Тази оценка следва да се извършва конкретно за всяка една осветителна уредба, оценена в перспективата на нарастването на цените на електроенергията, стойността на вложенията и амортизацията на елементите ѝ.

2. Направения по-горе анализ относно акумулиращите елементи на фотоволтаичните уредби показва, че при проектирането на такива осветителни уредби е необходимо да се въведе понятието „*Експлоатационен фактор на акумулиращите елементи(батерии)*“, отчитащ деградацията на техния енергиен капацитет с времето под влиянието на температурните условия и степента на разряда, и възможността им да осигуряват необходимото количество енергия при ниски температури.

3. Като цяло, развитието на технологиите повишава КПД на фотоволтаичните панели и светлинния добив на осветителите, и понижава разходите за единица произведена и инсталирана мощност, и за единица излъчен светлинен поток. Например, с въвеждането на споменатите тънкослойн фотоволтаици с КПД 25% и с 1/3 по-ниска цена, ще се понижи стойността на 1 Wp инсталирана мощност от 0,65 € на под 0,50 €, а с въвеждането на осветители с 240 lm/W светлинен добив на мястото на такива с 160lm/W, с около 40% ще се намали консумираната енергия за реализирането на дадено светлинно ниво, а от там с около 40% необходимия енергиен капацитет на акумулиращите елементи (съответно и на фотоволтаичните панели), като за разгледания в доклада пример това ще е от 60Ah на 36Ah.

ЛИТЕРАТУРА

[1] http://www.csb-battery.com

[2] http://www.enersys.com

[3] http://www.greentech.bg/archives/62635

[4] http://smart-solar.eu/?p=351

[5] http://techworld.bg/наука/алтернативна-енергия/органично-покритие-може-да-увеличи-кп/

[6] http://www.trojanbatteryre.com

Автори: Христо Василев, проф. д-р, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *hristo.vasilev@denima2001.com*; Станимир Стефанов, гл. ас. д-р, катедра „Електротехника“, ФЕА, ТУ-София, филиал Пловдив, E-mail address: *glasst@webmail.tu-plovdiv.bg*

Постъпила на 15.12.2015г. **Рецензент**: доц. д-р Захари Иванов

ОСВЕТЯВАНЕ НА АВТОБУСНИ СПИРКИ

Станимир Стефанов

Резюме: *Предмет на настоящия доклад е осветяването на района на автобусните спирки от обществения градски транспорт, движещ се по разписание. Разгледани са нуждите от осветление на всяка една от обособените по своето предназначение условни зони на автобусните спирки, съответните зрителни задачи, които могат и следва да се удовлетворяват в тях, както и нормативните изисквания за всяка една от тези зони.*
Ключови думи: *автобусна спирка, осветление, улично осветление, обществен транспорт*

LIGHTING AT BUS STOPS

Stanimir Stefanov

Abstract: *Subject this report is lighting the area of public bus stops of the urban public transport going according to schedule. In the report discussed are the lighting needs of each of the lots for its intended purpose contingent areas of bus stops, the relevant visual tasks can and should be satisfied, as well as regulatory requirements for each of these areas.*

Keywords: *bus stop, lighting, street light, urban transport*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Автобусната спирка е точно определено място, където автобусите спират за да могат пътниците да се качат на или слязат от автобуса. Спирките, като минимум, могат да имат заслони, места за сядане, електронни и/или други пътнически информационни системи. Автобусните спирки могат да бъдат групирани заедно в транспортните възли, които позволяват обмен между маршрутите от близките спирки и с други видове обществен транспорт.

Има три основни вида спирки: спирките по разписание, на които автобуса трябва да спре независимо от това дали на тях и за тях има или няма пътници; спирки, където превозното средство ще спре само при поискване; и спирки, когато превозно средство ще спре навсякъде по определен участък от пътя при поискване.

Предмет на настоящата разработка са автобусните спирки от обществения градски транспорт движещ се по разписание.

Създаването и реализирането на осветлението на районите, обхващащи автобусните спирки от градския обществен транспорт е нелека задача, тъй като в те-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

зи райони се съчетават изисквания свързани с уличното осветление, с осветлението на пешеходните зони за изчакване, слизане, качване и придвижване, с това на намиращите се в тези райони зони от вело-алеи, тротоари, открити площи, обществени пространства и т.н.т., които изисквания са различни в зависимост от предназначението и начина за нормиране на осветлението. По съществото си, района на една автобусна спирка (независимо от нейните геометрични параметри, вида на намиращите се в нейния район съоръжения и конструкции, класа на улицата, на която тя се намира и т.н.т.), може да се раздели на пет условни зони от гледна точка на зрителните задачи, нуждите от осветление и предназначението на тези зони:

1. Зона за пристигане, излизане от уличното движение, спиране, престой, тръгване и включване на автобусите към уличното движение, която зона следва да се разглежда като неделима част от уличното платно формираща „конфликтна зона“, като се има и в предвид, че при много автобусни спирки липсват така наречените „джобове“ и реално автобусите не излизат от уличното движение;

2. Открита зона за придвижване по спирката, за изчакване, слизане от и качване на транспортните средства на обществения градски транспорт;

3. Заслон или зона, условно наречена „Зона на заслона за защита от атмосферни въздействия на изчакващите градския обществен транспорт хора“;

4. Зони на различни търговски, рекламни, информационни и други подобни съоръжение, включително и заслон и паркинг за велосипеди;

5. Зони от прилежащите към района на спирката части от алеи за пешеходци и вело-алеи, локални улични платна, открити тревни и обществени площи.

За да се създадат добри зрителни условия в целия район на автобусните спирки от градският обществен транспорт, както по отношение на пешеходците, така и по отношение и водачите на пътните превозни средства (*ППС*), всяка една от тези зони би следвало да е осветена според съответните за нея нормативни изисквания, като е необходимо да се реализира и съгласуваност на осветяването, така че да не се нарушава зрителния комфорт както на водачите на ППС, така и на самите пешеходци и в прилежащите и близките до района на спирките зони.

2. ОСНОВНА ЧАСТ

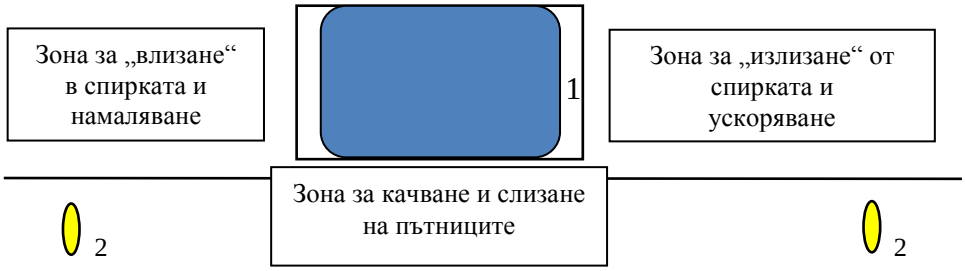
Размерите и геометричните характеристики на автобусните спирки от градския обществен транспорт в Р България са регламентирани в Приложение 33 на [3] и би следвало всички такива спирки да отговарят на тези изисквания.

Първата условна зона, независимо от класа улица [3] на който се намират спирките и дали те са на автобусна лента, на активна лента от уличното платно или в обособен джоб, се характеризира с три основни зони по отношение на уличното платно - фиг.1.:

1. Зона за намаляване на скоростта и „влизане“ в автобусната спирка;

2. Зона за спиране, престой за качване и слизане на пътниците;

3. Зона за излизане от автобусната спирка, за ускорение и включване към уличното движение.

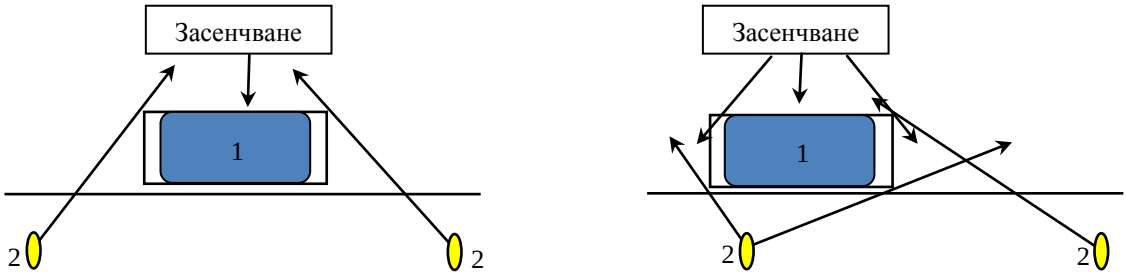


Фиг.1. Автобусна спирка. 1-автобус; 2 – осветители.

Размерите на първата условна зона, според различни литературни източници на европейски законодателства, варират от минимум 19 метра (като в тези размери влизат зоните за „влизане“ и „излизане“ от спирките) до над 65 метра (при двойни автобусни спирки в джобове) в дължина при широчина не повече от 3 метра и са сравнително категоризирани, докато у нас на практика трудно могат да се установят отговарящи на регламенти по подобни категоризаци геометрични размери.

Светлинните условия обаче, на които следва да отговаря зоната на автобусната спирка, са ясно регламентируеми в съответствие със светлината ситуация и светлинния клас на улицата както у нас, така и в Европа.

Тъй като автобусната спирка се явява „конфликтна зона“, то уличното плато в нейния район е препоръчително да бъде осветено с един светлинен клас по-високо от този на улицата, като нормирането може да се извърши както по яркост, така и по осветеност [5][6][7][8]. В случаите, когато съществуват спирки в ситуации в които липсва общо улично осветление, уличното платно на тези спирки също следва да бъде осветено в съответствие със светлината ситуация в техния район, като при тях нормирането би следвало да е по осветеност в *CE* класове. Разположението на основните и допълнителните осветители към автобусните спирки би следвало да е такова, че да не се нарушава оптичната линия на улицата и да се избягва засенчването на зоните непосредствено зад и пред спрелите автобуси, като последното се постига със симетрично разполагане на осветителите в района на автобусната спирка – фиг.2.



Фиг.2. Разположение на осветителите в зоната на автобусната спирка.
1- автобус; 2 – осветители.

В някой ръководства за проектиране на външно и улично осветление на водещи фирми се препоръчват участъка от улицата в района на автобусната спирка да се нормира на базата на светлинната ситуация „*D2*“[9].

Втората условна основна зона в районите на автобусните спирки от обществения градски транспорт е откритата зона за придвижване по спирката, за изчак-

ване, слизане от и качване на транспортните средства на градски транспорт. Нейните размери и местоположението на заслоните се определят посредством регламентите и наредбите за устройството на транспортно-комуникационите съоръжения от обществения транспорт. В тази зона, по отношение на светлинните условия, следва да действат изисквания за нивата на хоризонталната осветеност E_h, вертикалната осветеност E_v и полуцилиндрична осветеност E_{sc}, с основни цели превенция на травми от сблъсък с препятствия, различаване на съоръжения, разпознаване на лицата на хората и формите на предметите за превенция на криминалния риск. Осветлението на тази зона би могло да се реализира както само на основата на общото осветление на уличното платно, така и с помощта на допълнително локално осветление на спирката, както и посредством локалното осветление на прилежащите към нея пешеходни алеи, вело-алеи, пешеходни, търговски и други зони. Други изисквания по отношение на осветлението на тази зона следва да са гарантиране на ниски нива на заслепяване на водачите на *ППС* и на пешеходците, на добри зрителни условия за периферното зрение, съоръженията от осветителните уредби да са така разположени, че да не пречат на основните потоци на придвижване, да не се създава засенчване около заслоните, различните търговски, рекламни и информационни съоръжения и най-вече да се създават необходимите зрителни условия за различаване на надписи, съобщения, условия за ползване на съоръженията на спирката и условия за ориентиране в пространството. Поставянето на множество изисквания, свързани с наличието на множество обекти и участъци в района на спирката, имащи различни изисквания за нива на осветеност - обществени места, реклами, търговски и пешеходни зони, и т.н.т, затруднява определянето на адекватните светлинни нива на самата спирка, тъй като изискванията свързани с уличното осветление и тези с осветлението на обществените и търговските площи например, много често могат да се различават значително по стойност. От тук изниква въпроса – на каква база следва да се нормира осветлението на тази условна зона?

В случая, спирката основно се разглежда като част от уличното платно и от тротоарите, и би следвало разглежданата зона да бъде осветена в съответствие със светлините класове на уличното платно в района на спирката. Нормирането следва да е по осветеност и да отговаря на съответствието между светлинните класове *ME, CE, S,* и *ES* (табл.1), съгласно таблиците за съответствие на светлинните класове от *EN 13201*. Също така, минималните стойности за полуцилиндричната осветеност E_{sc} следва да бъдат спазени на височина 1,5 m от хоризонталното ниво и на тротоара, и на уличното платно за всяка една точка от изчислителната мрежа в района на спирката, тъй като по тях се придвижат или пребивават, макар и кратковременно, пешеходци.

Изискванията, свързани с ограничаването на заслепяването, регламентирани от нормативните документи относно използваните осветители в районите на автобусните спирки [7], са осветителите да бъдат с максимално екранирани относно защитния ъгъл и да покриват клас G6 – 350 cd/klm за ъгъл на излъчване 70°, 100 cd/klm при 80° и 0 cd/klm при 90°. Оценката по заслепяване следва да се из-

вършва на основата на *GR* – показателя, като се извършва и оценка на заслепяването на водачите на *ППС* и на пешеходците от указателни табели и пътни знаци[2][6].

Таблица 1

Светлинни класове на уличното осветление				**Светлинни класове за района на спирката в частта от джоба и тротоара**			
ME клас	***L, cd/m²***	***CE клас***	***E_h, lx***	***S клас***	***E_h, lx***	***ES клас***	***E_{sc}, lx***
		CE0	50			ES1	10
ME1	2	CE1	30			ES2	7,5
ME2	1,5	CE2	20			ES3	5
ME3	1	CE3	15	S1	15	ES4	3
ME4	0,75	CE4	10	S2	10	ES5	2
ME5	0,5	CE5	7,5	S3	7,5	ES6	1,5
ME6	0,3			S4	5	ES7	1

В някой ръководства за проектиране на външно и улично осветление на водещи фирми – например в [9], се препоръчва зоните за изчакване да се нормират на базата светлинната ситуация „*E1*“.

Третата условна зона е заслон или зоната, условно наречена „Зона на заслона за защита от атмосферни въздействия на изчакващите градския обществен транспорт хора“; която по конструкцията си най-общо представлява навес, но е с изключително разнообразни форми, а за изграждането и се използват материали с оптичните характеристики от тези на стъклото до тези на гипса, цимента и метала.

Фиг.3. Заслони на автобусни спирки

Поради това, ако е известно само местоположението на заслона, но не и неговата архитектура и отражателни характеристики, може да се появят проблеми с осветяването в района на спирката – силно засенчени зони, ярки отразяващи повърхности или пък светлинни източници, светещи през стените и действащи заслепяващо, особено в случаите, когато заслона се поставя без да е бил предварително предвиден като геометрия и местоположение, и без да се извършва препроектиране на осветлението.

Друга особеност на заслоните е, че те се използват от чакащи транспорта или от почиващи в тях хора, които могат да пребивават там продължително време както през деня така и в тъмните часове.

Фиг.4. Заслони използвани за рекламни цели и включени като части от градската архитектура

Характерно за заслоните е, че те масово не са осветени във вътрешната им част, дори тези, които са изградени от прозрачни материали, са с осветеност в рамките на 30 ÷ 50% от тази на откритата околна среда, което затруднява зрителните задачи и повишава криминалните рискове. В тази връзка, заслоните, посредством вътрешни за тях осветителни уредби, би следвало да са осветени минимум на нивото на което е осветено откритото около тях пространство. Максималния комфорт, който би могъл да се създаде в тях е осветеността във вътрешността им да е такава, че човек да може спокойно да чете нормален текст от карта, вестник или книга, а осветителите на основата на светлодиодни или газоразрядни източници да бъдат така разположени, че да не заслепяват. Ако се възприеме, че заслона на автобусните спирки по класификация съответства на „чакалня“, „спомагателно помещение“ или на „помещение и открита площ, която се използва рядко“ [1], то за него би могла да се нормира една хоризонтална осветеност в рамките на 30-50(75-100) lx в зависимост от околната среда и пътникопотока, на които нива да съответстват нива на полуцилиндрична осветеност E_{sc} = 7,5–10(15-20) lx. Самите спирки биха могли да бъдат оборудвани с фотоволтаични панели или покрития на покрива и с батерии с IP 67, монтирани в земята на дълбочина под незамръзващия слой, който за различните климатични зони у нас е между 0,2 – 1,5 m. Допълнително спирките биха могли да бъдат оборудвани със светлодиодни или холограмни системи за управление на рекламата и да се превърнат в печеливши съоръжения - напр. фиг.4 [10]. Освен това, те биха могли да бъдат оборудвани и с безжичен интернет, видеонаблюдение във и извън заслона, и със система за комуникация с диспечерското управление на транспорта или за спешни нужди към 112. При оборудване със сензори за присъствие и/или движение, самите заслони могат да се направят с автоматично управление на осветлението. Като допълнителен лукс, в седалките на заслоните биха могли да бъдат интегрирани отоплителни елементи, осигуряващи комфорт през зимата (в някой арабски държави се произвеждат изцяло затворени, климатизирани и осветени заслони). Допълнително спирките биха могли да се оборудват и със сензори за температура, влага, гласова информация и пр.

Четвъртата условна зона в районите на спирките са различните информационни, обществени и търговски съоръжение - фиг.5, които трябва да се взимат в предвид при проектирането на осветлението на автобусните спирки.

Фиг.5. Допълнителни съоръжения в районите на спирките

Много често обаче изискванията към тези съоръжения и изискванията към уличното осветление не са нормативно съгласувани. Един пример за това е осветяването на подходите за инвалиди, които съгласно [4] трябва да са осветени с минимална осветеност от 20 lx, като тази стойност не кореспондира с нивата на средна осветеност съгласно табл.1.

Петата условна зона са прилежащите към района на спирката части от алеи за пешеходци, вело-алеи, локални улични платна, открити тревни и обществени площи. Ако те имат собствено осветление, в зоната на спирката то трябва да бъде адекватно на това на зоната за изчакване и участъка от уличното платно на спирката в съгласие с Таблица 1, като е желателно да се реализира „светлинно открояване“ на участъците, участващи в спирката, с цел засилване вниманието към тези участъци. Ако те нямат налично собствено осветление, в района на спирката следва да им бъде поставено локално такова, нормирано в съответните светлинни ситуации и класове на общото осветление на спирката.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. У нас, осветяването на автобусните спирки от градския транспорт освен от липса на нормативна наредба, е усложнено и от факта, че те се изграждат или са изградени на вече съществуваща пътна мрежа, и че при отдаване на концесия, концесионерите на практика сами избират вида на заслоните, обектите и мястото на което те ще се разположат в района на спирките, като нерядко след 5-10 години цялото пространство може отново да бъде променено.

2. Проблем, с който скоро ще се сблъска осветяването на автобусните спирки у нас е предстоящото регламентирането на *БУС-ленти* върху вече съществуващи 2, 3 и 4 лентови улични платна, като движението на основния поток ще се измести към външните платна, с което е възможно да се промени светлинния им клас към по-висок, а от там и този на самите спирки.

3. С цел икономия на електроенергия, тъй като в различните часове на денонощието трафика е с различна интензивност, би могло да се използва регулиране на нивата на осветлението на автобусните спирки едновременно с или отделно от това на уличното осветление.

4. Видно е, че са необходими нормативни документи (по подобие на тези, действащи в някой градове и държави от ЕС), регламентиращи конструкцията, геометрията, разположението и осветяването на автобусните спирки.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Адрейчин Р и др. ,***Наръчник по осветителна техника***, Том 1, ДИ „Техника“, София, 1977, стр. 288

[2] БДС EN 12464 - 2

[3] ***НАРЕДБА № 2 от 29 юни 2004 г. за планиране и проектиране на комуникационно-транспортните системи на урбанизираните територии***

[4] ***НАРЕДБА № 4 от 1 юли 2009 г. за проектиране, изпълнение и поддържане на строежите в съответствие с изискванията за достъпна среда за населението, включително за хората с увреждания***

[5] BS 5489 -2003:1

[6] CIE 110 - 2000

[7] DIN 132011

[8] EN 13201

[9] Relux informatik AG, 2000

[10] http://dragobuild.com/p/

Автори: Станимир Стефанов, гл. ас. д-р, катедра „Електротехника“, ТУ-София, филиал Пловдив, E-mail address: *glasst@webmail.tu-plovdiv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл.ас. д-р Ива Петринска

РАЗРАБОТВАНЕ НА МЕТОДИКА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ВЪТРЕШНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ

Захари Иванов

Резюме: *В работата е предложена методика за измерване на вътрешни осветителни уредби, съгласно БДС EN 12464-1:2011.*
Ключови думи: *методика, измерване, вътрешни осветителни уредби.*

DEVELOPING A METHODOLOGY FOR MEASURING INTERIOR LIGHTING SYSTEMS

Zahari Ivanov

Abstract: *The work proposed methodology for measuring indoor lighting systems in accordance with BSS EN 12464-1:2011.*

Keywords: *methodology, measurement, indoor lighting systems.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Действащ нормативен документ е Наредба № 49 за изкуствено осветление на сградите, издадена от Министерството на народното здраве, обн. ДВ. бр.7 от 23 януари 1976 г., изм. ДВ. бр.64 от 10 август 1976 г. [2]. Той въвежда светлотехническите показатели, които следва да се покриват от осветителните уредби. Въпреки големия времеви интервал, Наредбата е действаща, макар и не в крак с актуалните нормативни документи.

Актуалният стандарт в момента е БДС EN 12464-1:2011 – Светлина и осветление. Осветление на работни места на закрито [1] . Той заменя остарелите БДС 1786-84 Осветление. Естествено и изкуствено и БДС EN 12464-1:2006 – "Светлина и осветление. Осветление на работни места на закрито.

Нормативните актове и стандарти, които имат пряко отношение към контрола на осветеността на работни места на закрито, са посочени в [1 до 5].

2. ИЗИСКВАНИЯ КЪМ ПОКАЗАТЕЛИТЕ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗМЕРВАНЕ НА ВЪТРЕШНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ

Съгласно БДС EN 12464-1:2011 [1] се нормират следните светлотехнически показатели: експлоатационна осветеност *(Ēm)* върху работната повърхност, равномерност на осветеността върху работната повърхност *(Uo)*, индекса на цветопредаване (Ra), обобщеният показател на заслепяване (UGR_L), цилиндричната осветеност в активното пространство (*Ēz*).

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Експлоатационната осветеност ($\bar{E}m$-maintained illuminance) е минималната стойност по време на експлоатацията на средната осветеност на работната повърхност [6]. Експлоатационната осветеност не трябва да бъде по-малка от нормената осветеност *Ен*. Следователно, във всеки момент на работната повърхност трябва да бъде осигурена осветеност, по-голяма или равна на нормената.

За да се постигне добро зрително възприемане и разпознаване на обекти в пространството, трябва обема на пространството, в което се движат или работят хора, да бъде осветено. Това изискване се постига чрез осигуряване на съответна средна цилиндрична осветеност $\bar{E}z$ в пространството. Експлоатационната средна цилиндрична осветеност (средна осветеност на вертикалната равнина) в активни и вътрешни зони, не трябва да е по-малка от 50 lx с равномерност $Uo \geq 0{,}10$ върху хоризонталната равнина при височина над пода 1,2 m за седящи хора и 1,6 m за правостоящи хора. В зоните, където е важно доброто зрително възприемане, особено в офиси, зони за срещи и обучение, $\bar{E}z$ не трябва да е по-малка от 150 lx с равномерност $Uo \geq 0{,}10$.

Осветителните уредби трябва да бъдат проектирани така, че да се избягват пулсациите и стробоскопичните ефекти.

В действащият стандарт за осветление на работни места, БДС EN 12464, вместо коефициент на запаса (*Кз*), се дефинира експлоатационен коефициент (Ке), който е реципрочната стойност на *Кз* (т.е. $Ke = 1 / Kз$).

Експлоатационният коефициент - (*Ке*) (или на англ. Maintenance Factor– *MF*) отчита колко ще се намали осветеността на работната повърхност след определен период от време, поради стареене и замърсяване [6].

Ке е произведението на 4 компоненти, които се определят от таблици в зависимост от замърсяването на осветителите (*Кзо*), от стареенето на лампите (*Ксл),* от оцеляването на лампите (*Кол*) (част от лампите изгарят) и от замърсяването на повърхностите на помещението (*Кзпп*) (виж формулите 6.2.2 и 6.2.3) [6].

Експлоатационният коефициент (*Ке*) се дефинира като отношение на експлоатационната осветеност (*Еексп)* към началната средна осветеност при пускане на уредбата в експлоатация (E_0):

$$Ke = Eексп / E_0 \quad (1)$$

$$Ke = Kзо * Kсл * Kол * Kзпп \quad (2)$$

$$MF = LMF * LLMF * LSF * SMF\,, \quad (3)$$

където *Ке* е експлоатационен коефициент (Maintenance Factor– MF). Той отчита колко ще се намали осветеността на работната повърхност след определен период от време, поради стареене и замърсяване;

Кзо – коефициент на замърсяване на осветителите.- показва колко ще се намали КПД на осветителите (ηосв) поради замърсяване за определен период;

Ксл – коефициент на стареене на лампите - отчита колко ще се намали потока на лампите, поради стареене на лампите в течение на определен период по отношение на номиналния светлинен поток.;

Кол – коефициент на оцеляване на лампите- отчита какъв процент от лампите ще останат да работят след определен период;

Кзпп – коефициент на замърсяване на повърхностите на помещението - отразява колко се намалява коефициента на отражение на повърхностите на помещението.

Ако поради спецификата на обекта при проектиране, *Ке* не може да бъде определен, тогава може да се използва публикацията на МКО 97: 1992. Могат да се използват също «базови» стойности на *Ке* [6].

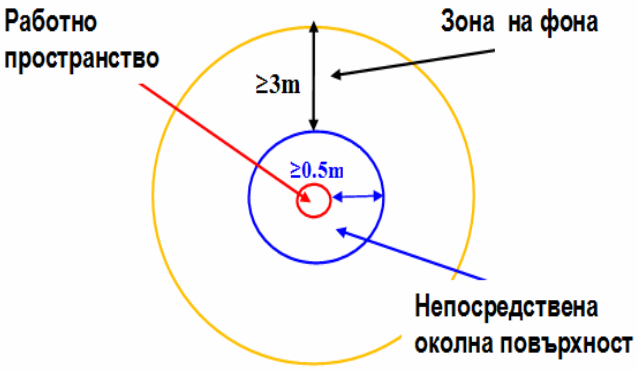
Съгласно БДС EN 12464 [1] се проектира с *Ке*, изчислен за избраната осветителните уредби (ОУ), вида на средата и избран график за поддръжка (експлоатация). Високи стойности на *Ке* с ефективна експлоатационна програма, спомагат за енергийно ефективно проектиране на ОУ и ограничават необходимата инсталирана мощност. Експлоатационната програма трябва да включва интервалите за почистване на лампи, осветители и повърхности от помещението, а също и честотата на подмяна на лапи и вида на почистващия метод. Почистването може да се провежда на равни или променливи интервали.

Стандартът БДС EN 12464-1:2011 отменя и заменя БДС EN 12464-1:2004 от 01.01.2012 г. Той определя изискванията към осветлението за хора с нормални зрителни възможности на работни места на закрито, които се нуждаят от зрителен комфорт. Дадени са изискванията към осветлението за голяма част от работните места на закрито и техните прилежащи зони, по отношение на количествените и качествените показатели на осветлението, включително и на компютърните работни места.

На практика, за добро осветление, от основно значение е не само изискваната осветеност, а и да се удовлетворят количествените и качествените показатели на осветлението.

Съгласно БДС EN 12464-1:2011, осветеността трябва да се разглежда в три зони. Тези зони са илюстрирани на фиг.1: **а**) Осветеност върху работната зона; **б**) Осветеност на непосредствената околна повърхност (лента с широчина най-малко 0,5 m около работното пространство в областта на зрителното поле); **в**) Осветеност на зоната на фона (съседната повърхност с широчина най-малко 3 m на непосредствената околна повърхност в границите на пространството).

Осветеността на непосредствената околна повърхност може да е по-ниска от осветеността на работното пространство. Съгласно т. 4.4 от стандарта, тази осветеност не трябва да бъде по-ниска от стойностите, посочени в табл.1, където е отразена и минималната осветеност на т.нар. зона на фона:



Фиг.1.

Табл.1.

Осветеност на работното пространство E_{task}, lx	Осветеност на непосредствените околни повърхности, lx	Осветеност на зона на фона (1/3 от осветеността в колона ***2***), lx
1	***2***	***3***
≥ 750	500	165
500	300	100
300	200	66
200	150	50
150	E_{task}	50
100	E_{task}	33
≤ 50	E_{task}	17

Табл. 2.

Нормени показатели за *Офиси* - БДС EN 12464-1:2011

№ по ред	Тип помещение, зрителна задача или дейност	$\bar{E}_m$ lx	UGR_L -	U_o -	R_a -	Специфични изисквания
1*	**2***	**3***	**4***	**5***	**6***	**7***
1	Преснимане, копиране и други	300	19	0,40	80	
2	Писане, машинопис, четене, обработка на данни	500	19	0,60	80	виж т.4.9. [1]
3	Техническо чертане	750	16	0,70	80	
4	CAD чертожни центрове с компютри	500	19	0,60	80	виж т.4.9[1].

Светлотехническите изисквания се определят чрез удовлетворяването на три основни човешки потребности: а) зрителен комфорт, при който работниците имат усещането за удобство и по косвен начин допринася за по-високо ниво на продуктивност и по-високо качество на работа; б) зрителна работоспособност, при която работниците са в състояние да изпълняват своите зрителни задачи, дори при тежки обстоятелства и за продължителен период от време; в) безопасност.

Основните параметри, определящи светлинната среда по отношение на изкуственото и естественото осветление са: а) разпределение на яркостта; б) осветеност; в) заслепяване; г) насоченост на светлината, осветление във вътрешното пространство; д) променливост на светлината (нива и цвят на светлината); е)пулсации на светлината; ж) цветопредаване и цвят на светлината.

Стойностите на осветеността и нейната равномерност, дискомфорта и индекса на цветопредаване за някои помещения са дадени в табл.2. и табл.3. Другите параметри са описани в т. 4 [1].

Освен това, към осветлението има други изисквания, които влияят на зрителното възприемане, като: а) размер, форма, положение, цвят и отражателни свойства на детайла и фона; б) очният капацитет, зрителната способност на човека (зрителна острота, дълбочина на възприемане, възприемане на цвят); в)

проектиране на осветителна уредба без заслепяване, добро цветопредаване, висок контраст на цветовете , които могат да подобрят видимостта.
Вземането под внимание на тези фактори може да повиши зрителното възприятие без да има нужда от по-висока осветеност.

Табл. 3.

Нормени показатели за *Обществени места* - БДС EN 12464-1:2011

№ по ред	Тип помещение, зрителна задача или дейност	Ēm lx	UGR_L -	Uo -	Ra -	Специфични изисквания
1	Входни зали	100	22	0,40	80	UGR се определя само ако е необходимо.
2	Гардеробни	200	25	0,40	80	
3	Чакални	200	22	0,40	80	
4	Каси / гишета за билети	300	22	0,60	80	

Колона 1* - поредния номер за всяко помещение (повърхност), зрителна задача или дейност.
Колона 2* - вид (тип) на тези помещения (повърхности), зрителни задачи или дейности, за които са дадени специфични изисквания. Ако дадено помещение (повърхност), зрителна задача или дейност не са посочени, трябва да се възприемат стойностите, посочени за подобна, сравнима ситуация.
Колона 3* - експлоатационна осветеност Ēm върху работната повърхност (виж точка 4.3) за помещението (повърхността), зрителната задача или дейността, посочени в колона 2. [1].
Колона 4* - максималната гранична стойност на обобщената степен на заслепяване UGRL), които се прилагат за ситуациите, посочени в колона 2. [1].
Колона 5* - минималната равномерност на осветеността Uo върху работната повърхност за експлоатационната осветеност, дадена в колона 3. [1].
Колона 6* - минималните стойности на индекса на цветопредаване (Ra) (виж точка 4.7.3) за ситуациите, посочени в колона 2 [1].
Колона 7* - специфични изисквания за ситуациите, посочени в колона 2.

Осветености на повърхностите

Във всички затворени места експлоатационните осветености върху главните повърхности трябва да имат следните стойности: Ēm > 50 lx с Uo ≥ 0,10 върху стените и Ēm > 30 lx с Uo ≥ 0,10 върху тавана.
В някои места като рафтове в магазини, стоманени конструкции, железопътни гари и т.н., поради размера, сложността и ограниченията при работа, желаните нива на осветление върху тези повърхности практически не могат да се постигнат. В тези места са одобрени по-ниски нива в сравнение с общоприетите стойности.
В някои затворени места като офиси, зали за обучение, зали за здравеопазване и главни зони на входове, коридори, стълби и т.н., стените и тавана трябва да са по-светли. В тези места се препоръчва експлоатационните осветености върху

главните повърхности да имат следните стойности: Ēm > 75 lx с Uo ≥ 0,10 върху стените и Ēm > 50 lx с Uo ≥ 0,10 върху тавана.

Всички стойности на осветеността, дадени в този стандарт, са стойности на експлоатационната осветеност и осигуряват зрителен комфорт и зрителна работоспособност. Стойности на експлоатационна осветеност и равномерност зависят от определената мрежа (виж 4.4) [1].

Всички стойности на поддържаната осветеност и равномерност зависят от определената мрежа на осветеността. Системите на мрежи от точки трябва да се създават, за да се отбележат точките, при които са изчислени и проверени стойностите на осветеността за работно(и), пространство(а), непосредствена(и) околна(и) повърхност(и) и зона на фона. В т. 4.4 на стандарта [1] се препоръчват мрежи с почти квадратни клетки, като отношението на дължината към широчината им трябва да е между 0,5 и 2. Максималният размер на мрежата се определя по следната формула (4):

$$p = 0{,}2 \cdot 5^{\log_{10}(d)} \quad (4)$$

където: p ≤ 10 m, а d е по-дългия размер на изчисляваната площ (m), ако отношението на по-дългата към по-късата страна е 2 или повече, в обратния случай d е по-късия размер.

Броят на точките в съответния размер е даден чрез най-близкото цяло число на d/p.

Полученото разстояние между точките на мрежата се използва за изчисляване на най-близкото цяло число на точките на мрежата в другата дименсия. Това ще бъде отношение на дължината към широчината на клетката на мрежата, близо до 1.

Лента с широчина 0,5 m от стените се изключва от изчисляваната площ, освен ако работното пространство е във или се простира вътре в тази гранична зона.

За стените и тавана трябва да се прилага мрежа с подходящи размери и също така може да се прилага лента с широчина 0,5 m.

Разстоянието между точките на мрежата не трябва да е еднакво с разстоянието между осветителите. Типичните стойности за разстояние между точките на мрежата са дадени в табл.4:

Табл. 4.

Препоръчителен брой на точките в мрежата

Дължина на зоната, m	Максимално разстояние между точките в мрежата, m	Минимален брой на точките в мрежата
0,40	0,15	3
0,60	0,20	3
1,00	0,20	5
2,00	0,30	6
5,00	0,60	8
10,00	1,00	10
25,00	2,00	12
50,00	3,00	17
100,00	5,00	20

Препоръчителните стъпки на осветеност са в съответствие с EN 12665: (20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 5000) lx.

Осветености върху работната зона

Стойността, дадена в точка 5, е експлоатационната осветеност върху работната повърхност, която може да бъде хоризонтална, вертикална или наклонена. Средната осветеност, за всяка работна задача, не трябва да е под стойността, дадена в точка 5, независимо от продължителността на използване и състоянието на осветителната уредба. Стойностите са в сила за нормални зрителни условия, като са взети под внимание следните фактори: а) психофизиологични аспекти, като зрителен комфорт и чувство за удобство; б) изискванията за зрителните задачи; в) ергономия на зрението; г) икономичност; д) принос на работната безопасност;.е) практически опит.

Стойността на осветеността може да се промени поне с една стъпка от скалата на осветеностите (виж точка 4.3.2 [1]), ако зрителните условия се различават от нормално предположените условия.

Изискваната експлоатационна осветеност трябва да се повиши, когато: а) зрителната задача е критична; б) прекалено скъпо е да се поправят грешките; в) точността, високата продуктивност или повишената концентрация е от голямо значение; г) детайлите на задачата са с необикновено малки размери или с нисък контраст; д) работата се извършва за прекалено дълъг период от време. е) зрителната способност на работника е под нормалната.

Изискваната експлоатационна осветеност може да се понижи, когато: а) детайлите на задачата са с необикновено големи размери или имат висок контраст и б) работата се извършва за прекалено кратък период от време.

Размерът и местоположението на работното пространство трябва да бъдат определени и документирани.

За работни площадки, където размера и/ или местоположението на работното(ите) пространство(а) е(са) непознато(и) трябва:

- или цялото пространство да се разглежда като работно пространство;
- или цялото пространство да е равномерно осветено ($U_o \geq 0{,}40$) до ниво на осветеност, определено от проектанта. Когато работното пространство е известно, осветителната уредба трябва да се изчисли и начертае отново, за да се осигурят необходимите осветености.

Когато видът на зрителната задача е непознат, проектантът трябва да направи предположения относно възможните зрителни задачи и да определи изискванията към зрителната задача.

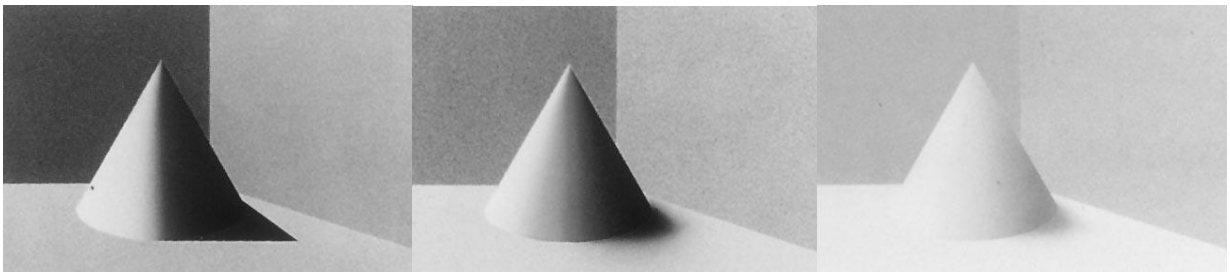
Равномерност на осветеността

В работното пространство, равномерността на осветеността (Uo) не трябва да е по-малка от стойностите на минималната равномерност, дадени в точка 5 [1].

За изкуствено осветление или горно естествено осветление, равномерността на осветеността е: а) Uo ≥ 0,40 - в непосредствената околна повърхност; б) Uo ≥ 0,10 - върху зоната на фона .

Средна цилиндрична осветеност в активното пространство

Експлоатационната средна цилиндрична осветеност в активни и вътрешни зони не трябва да е по-малка от 50 lx с Uo ≥ 0,10 върху хоризонтална равнина при 1,2 m за седящи хора и 1,6 m за правостоящи хора. В офиси, зони за срещи и обучение, Ēz не трябва да е по-малка от 150 lx с равномерност Uo ≥ 0,10.



Фиг.2.

Моделирането описва балансът между дифузната и насочената светлина фиг.3. Показател за моделиране е отношението на цилиндричната осветеност към хоризонталната осветеност в дадена точка. Съгласно стандарта стойност между 0, 30 и 0,60 е индикатор за добро моделиране

3. ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗМЕРВАНИЯТА

Методът за контрол се осъществява в съответствие с изискванията на БДС EN 12464-1:2011 и „Методически указания за измерване и оценка на изкуствено осветление в сгради 40-85, изд. „Стандартизация”, 1985.

Условията за провеждане на измерванията и подготовка им са:

- Измерването на осветеността на изкуственото осветление на работното място трябва да се извършва в тъмната част на денонощието, когато отношението на осветеността от естественото осветление и осветеността от изкуственото осветление е не повече от 0,1 lx;
- Измерването на осветеността и яркостта се извършва при околна температура от 10 до 35 °C и относителна влажност на въздуха, не по-голяма от 80 % ;
- В помещения, в които температурата е извън посочените по-горе граници, измерванията се извършват с уреди, в чиято техническа документация е посочена съответната температурна корекция;
- По време на измерването, фотоелектрическият приемник трябва да се предпазва от действието на външно разсеяно лъчение по случайни причини, включително и от светлите дрехи на оператора, извършващ измерването;
- При извършване на измерване за оценка на една осветителна уредба, трябва да се използва един и същ уред, като номерът му се записва в протокола за оценка;

- Фотоелектрическият приемник трябва да се предпазва от удари и вибрации, влияещи върху измерването, и осветяване над 120 % от максималната стойност на измерваната осветеност за съответния обхват. Той трябва да се съхранява на тъмно и да се открива само при извършване на измерването. При съхранение, изводите на фотоелектрическият приемник не трябва да са свързани към отчитащия уред;
- Близо до измерителния уред не трябва да има действие на електрически и магнитни полета, радиоактивни йонизиращи лъчения, както и силни лъчения в инфрачервената част на спектъра, влияещи върху измерването.
- Преди започване и след завършване на измерване на осветеността и яркостта трябва да се измери напрежението на входа и изхода на разпределителното табло и стойностите да се нанесат в протокола;
- Захранващото напрежение на осветителните уредби трябва да се измерва с волтметри, с клас на точност, не по-малък от 2,5;
- Калибрирането на уреда се извършва всяка година, или съгласно одобрена програма за калибриране, съобразена с препоръките на производителя или използваемостта на техническото средство.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуалният стандарт в момента е БДС EN 12464-1:2011 [1]. Действащ нормативен документ е Наредба № 49 за изкуствено осветление на сградите [2]. Той въвежда светлотехническите показатели, които следва да се покриват от осветителните уредби. Въпреки големия времеви интервал, Наредбата е действаща, въпреки сериозните различия с БДС EN 12464-1:2011. Измерването на вътрешните осветителни трябва да се извършва съгласно нова Наредба, съобразена с най-новите нормативни документи в Европа.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 12464 - 1:2011 - ***Светлина и осветление. Осветление на работни места. Част 1 - Работни места на закрито.***

[2] ***Наредба № 49 за изкуствено осветление на сградите,*** издадена от Министерството на народното здраве обн. ДВ. бр.7 от 23 януари 1976г., изм. ДВ. бр.64 от 10 август 1976г

[3] ***Методически указания за измерване и оценка на изкуствено осветление в сгради 40-85***, изд. „Стандартизация”, 1985г. ;

[4] ***Наредба № 2 за здравните изисквания към компютърните и интернет зали за обществено ползване***, Д.В. бр.15/2007

[5] ***Наредба № 26 за устройството и дейността на детските ясли и детските кухни и здравните изисквания към тях***, Д.В.бр.103/2008.

[6] Иванов З. А. ***Осветителна и инсталационна техника***, Авангард Прима, София, 2010 г.

Автор: Захари Иванов, доц. д-р, катедра ЕСЕО, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент:** гл.ас. д-р Ива Петринска

ЕРГОНОМИЧНА УРЕДБА ЗА ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ВЪТРЕШНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ С РАЗЛИЧНИ ЛАМПИ

Захари Иванов

Резюме: *Описана е уредба, позволяваща в широк диапазон да се променят светлотехническите параметри, моделират различни системи на осветление и да се провеждат експериментални изследвания по изучаването на показателите на осветителната уредба.*
Ключови *разрядни лампи, ергономични изследвания, вътрешни осветителни уредби, осветители*

ERGONOMIC SYSTEM FOR RESEARCH OF INTERIOR LIGHTING SYSTEMS WITH VARIOUS LAMPS

Zahari Ivanov

Abstract: *Described is a system that allows a wide range to change photometric parameters model different systems of lighting and to conduct experimental research on the study of the performance of the lighting system.*
Keywords: *discharge lamps, ergonomic research, interior lighting systems, luminaires*

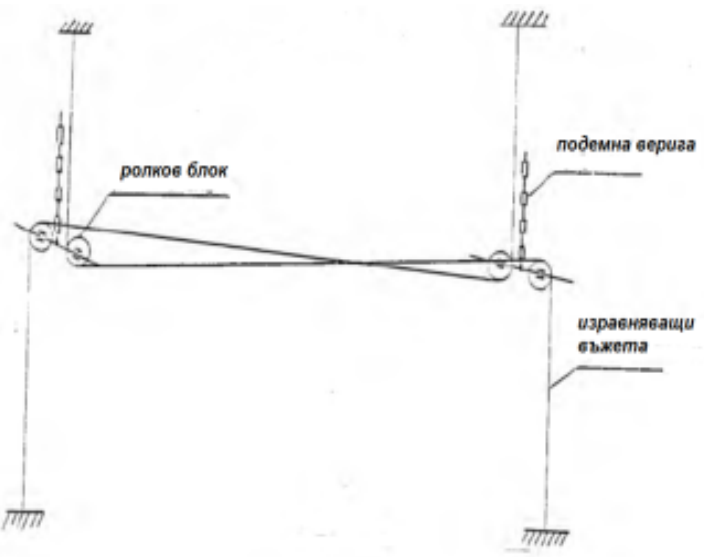
1. ЕРГОНОМИЧНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ОСВЕТИТЕЛНА УРЕДБА

Съоръжението “Подвижен таван” е предназначено за провеждане на ергономични изследвания с различни светлинни източници и системи на осветление. Той дава възможност да се трансформира конкретното помещение на Научно-изследователската и изпитвателна лаборатория ‘‘Осветителна техника” в помещение с променлива височина на тавана, като при това позволява лесно закрепване на светлинни източници и осветителни тела с различна форма и вид по неговата площ. Изменението на разстоянията между осветителите и пода се извършва механизирано с помощта на електрозадвижване и бутонно управление.
Размерите на помещението са: A=6,6 (5,9) m; B=5,35 (3,75) m; H=3,55 (3,2) m. В скобите са дадени размерите на подвижния таван.
Като цяло "Подвижният таван" се състои от две части. Неподвижната част се състои от четири носещи колони, закрепени към пода и страничните строителни конструкции на помещението и имащи за цел да осигурят опора и водене на подвижната част. Към колоните са захванати подемните механизми за механизирано изменение на височината на подвижната част спрямо пода на помещението. Подвижната част представлява подходящо изградена носеща конструк-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ция с правоъгълна форма и размери, определени от тези на помещението, в което ще се монтират. Върху подвижната част се закрепват изследваните осветителни тела (ОТ).
Подвижната част на съоръжението има възможност за вертикално движение, както и за фиксиране във всяка точка от предварително зададения ход.
Движението се осигурява от два верижни електротелфера с товароподемност 500 kg всеки, закрепени върху две диагонално разположени от общо 4 водещи неподвижни колони.
Изравняването на скоростите за всички точки от подвижната част на съоръжението при движение се осъществява от затворена въжена система, изградена по начин, показан на фиг.1.



Фиг.1. Изравняване на скоростите за всички точки от подвижната част на съоръжението при движение със затворена въжена система.

Крайните положения на подвижната част са осигурени посредством неподвижно закрепени за колоните гумени упори.
Монтирани са 8 броя крайни изключватели (по два за всяка колона) за горно и долно крайно положение, които действат независимо от крайните изключватели на телферите и установяват подвижната част малко преди достигането на съответния упор.
По отношение на техника на безопасност на подемното съоръжение, след установяване на подвижната част в някоя точка от хода, твърдо се фиксира към колоните посредством опорни пръти, захванати от едната страна към подвижната част и движещи се заедно с нея вътре в колоните. Фиксирането на подвижната част става чрез притискане на пръти от 4 винтови стяги, поставени на всяка колона.
Управлението на подемните телфери, които работят само на микроподем V = 2,4 m/min, става с помощта на несамозадържащи бутони за двете посоки, изведени извън габаритите на съоръжението.

С оглед реализиране на изследваните светлотехнически показатели е изпълнена ел. инсталация, която позволява включване и изключване на част от луминесцентните лампи (ЛЛ), превключване към отделните фази и осъществяване на еднофазно, двуфазно и трифазно свързване. Освен ЛЛ, уредбата дава възможност за включване на НЛВН, МХЛ, ЖЛВН и светлодиодни осветители [2, 4]. Общото осветление е изпълнено чрез окачване на 108 броя ЛЛ (36,40)W, разположени в три реда по 36 ЛЛ, свързани върху отделни пана (фиг.2). Разстоянието между две съседни ЛЛ е 153 mm, което е продиктувано от дължината на металната конструкция (5750 mm).

Фиг.2. Разположение на осветители с различни светлинни източници върху подвижния таван на ергономичната уредба на Научноизследователската изпитвателна и калибровъчна лаборатория ’’Осветителна техника”, на ТУ София.

Чрез използването на пластмасови екраниращи ленти, широки 120 mm, се получава защитен ъгъл 42° (фиг.2). Освен ЛЛ, на подвижния таван са монтирани

осветители с натриеви лампи високо налягане (НЛВН), с мощност 250 W - 9 броя и 70 W - 27 бр. Дроселите и комутационната апаратура за ЛЛ са монтирани в едно табло, а за НЛВН, ЖЛВН или МХЛ в друго табло [2]. Двете табла са изнесени извън работното помещение, основно за да не пречи шума от дроселите (фиг.3).

С така разработената осветителна уредба могат да се променят следните параметри:

а) средна осветеност от общото осветление от 100 до 50001x;

б) при еднофазно свързване и включени част от лампите, ще се реализират следните части от средната осветеност Ecp при включени всички лампи: Ecp = (1; 1/2; 1/2.25; 1/2.57; 1/3; 1/3.6; 1/4; 1/4.5; 1/6; 1/8; 1/9; 1/18) Ecp;

в) при двуфазно свързване и включени част от лампите, ще се получи: Ecp = (1; 1/2; 1/3; 1/6) Ecp ;

г) при трифазно свързване съответно : Ecp = (1; 1/2; 1/3; 1/6) Ecp ;

д) коефициента на пулсации ;

е) конфигурация на светещите елементи ;

ж) цвета на светлината чрез промяна на светлинните източници с различни Тцв и Ra;

з) височина на окачване на осветителите (от 2 до 3.25 m);

и) съотношение на осветеността от общото и местното осветление, Eo/Ем в диапазона от 0,2 до 0,75;

й) възможно е реализирането на следните системи на осветление: 1) общо (равномерно и локално); 2) местно; 3) комбинирано; 4) с отразена светлина;

Изменението на тези параметри, позволява да се изследва влиянието на следните светлотехнически показатели върху зрителните и психофизиологични функции на човека:

1) съотношение между осветеностите, реализиране от общото и местното осветление;

2) дискомфорта;

3) пулсациите;

4) съгласуваност на цвета на светлината на местното и общото осветление;

Фиг.3. Таблата с дроселите и комутационната апаратура за ЛЛ и РЛВН.

5) отразения блясък, съотношение на яркостите на повърхностите в помещението;

Собственото тегло на рамките, както и на ОТ, разположени под тях се поемат от две носещи прътови конструкции с ферми, разположени диагонално по площта на тавана.

Изменението на тези параметри, позволява да се изследва влиянието върху зрителните и психофизиологични функции на човека на следните светлотехнически показатели:

а) съотношение между осветеностите, реализиране от общото и местното осветление; б) дискомфорта; в) пулсациите; г) съгласуваност на цвета на светлината на местното и общото осветление; д) отразения блясък, съотношение на яркостите на повърхностите в помещението;

В тези уредби са проведени психофизиологични изследвания при осветление с НЛВН или ЛЛ [3]. Изследвани са някои от следните показатели :

***А*)** Физиологични показатели : а) кръвно налягане; б) пулсова честота; в) постурографски изследвания.

Б) Зрителни показатели: а) състояние на зрителния апарат; б) устойчивост на ясно виждане; в) отстояние от най-близката точка па ясно виждане; г) положитслна и отрицателна част на относителната акомодация; д) контрастна чувствителност; е) субективни симптоми на зрителна умора.

***В*)** Перформанс: а) коректурни тестове; б) решаване на когнитивни задачи е време на реакции.

***Г*)** Психофизиологични показатели: а) внимание; б) самооценка на състоянието.

Благодаря на проф. д-р инж. Николай Василев за осигурените средства и методични указания за изграждане и изследвания в ергономичната експериментална осветителна уредба.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-важни изводи от проведените изследвания в ергономичната уредба са следните :

- За зрителни задачи, при които зрителната способност се определя от остротата на зрението, НЛВН имат определено преимущество.
- Зрителната работоспособност при НЛВН се влияе значително от нивото на осветеност. Достигането на зрителен комфорт е възможно при осветеност по-голяма от 300 lx;
- Психо-физиологичното въздействие на осветлението с НЛВН е по-неблагоприятно от осветлението с луминесцентни лампи;
- Физиологичните функции: кръвно налягане и пулс, не се влияят съществено от вида на светлинния източник;

В тази ергономична уредба могат да бъдат проведени изследвания за влиянието на светлината на различните източници върху човека:

- Светлодиодите (фотобиологичен риск, цветови дискомфорт- кривата на Крютхов, подходящо смесване на светлината от светлодиодни лампи с други светлинни източници);
- Компактните луминесцентни лампи;
- Триивичните и петивични луминесцентни лампи;

- Луминесцентните лампи тип Т5;
- Метал халогенните лампи (кварцови и керамични) и други електрически източници на светлина;
- Влияние на естествената светлина върху психо-физиологичните функции на човека.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Иванов З. А., ***Универсална светлотехническа уредба за изследване показателите на осветлението***, X национална конференция с международно участие , " ОСВЕТЛЕНИЕ '96 ", 9-11 октомври 1996 г., МДУ"Ф.Ж.Кюри"- Варна, стр. 48

[2] Иванов З.***, Осветителна и инсталационна техника*** , Авангард Прима, София, 2010

[3] N. Wassilev, Z.Iwanow, G.Dikanarow - BG, D.Gall ,R.Schnor, D, ***Investigation of the psycho-physiological influence of interior lighting with high pressure sodium lamps***, Sixth European Lighting Congress, Budapest, 3 - 5 X 1989., Papers 1, p.68-75.

[4] Иванов З. А., ***Светлинни източници***, 145 стр., второ преработено и допълнено издание, Авангард Прима, София 2008.

Автор: Захари Иванов, доц. д-р, катедра ЕСЕО, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Христо Василев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПУСКОВИЯ ПРОЦЕС НА ЕДНОФАЗЕН СИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ ЧРЕЗ ОБОБЩЕНАТА ТЕОРИЯ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МАШИНИ

Ганчо Божилов, Емил Рац, Михо Михов

Резюме: *В настоящата работа е изследван пусковият процес на еднофазен синхронен двигател с постоянен магнит в ротора с използване на обобщената теория на електрическите машини. Получени са графиките на ъгловата скорост на ротора, електромагнитния момент и тока на двигателя във функция от времето при пускане до и след достигане на синхронната скорост. За целта е съставен математически и симулационен модел на процеса в средата на Matlab Simulink.*

Ключови думи: *Еднофазен синхронен двигател,FEMM, пусков процес, обобщена теория на електрическите машини*

STUDY OF THE STARTING PROCESS OF SINGLE PHASE SYNCHRONOUS MOTOR BY MEANS OF GENERALIZED THEORY OF ELECTRICAL MACHINES

Gantcho Bojilov, Emil Ratz, Miho Mihov

Abstract: *In this paper a study of the starting process of the single phase synchronous motor whit permanent magnet in the rotor is made. The graphs of the starting process of the angular velocity of the rotor, electromagnet torque and the current of the motor in function of the time is calculated as well of the time for and until synchronous velocity. For this purpose a mathematical and simulated model of the process in the Matlab Simulink.is made.*

Keywords: *Single phase synchronous motor, starting process, FEMM, generalized theory of electrical machines*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Разглежданият двигател принадлежи към класа на електродвигателите за домакински уреди – помпи за перални, миксери, сокоизстисквачки и др. [1,2]. Електродвигателят е еднофазен синхронен, с явнополюсна концентрирана статорна намотка и възбуждане с неявнополюсен постоянен магнит в ротора.

Предимство на тези двигатели е несложната и надеждна конструкция и опростената технология на изработването. Известни са и други предимства на синхронните двигатели и в частност на тези с постоянни магнити – твърда механическа характеристика, по-малка консумация и по-добър фактор на мощността в

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

сравнение с другите използвани досега електродвигатели със същото предназначение - например асинхронни двигатели с екранирани полюси.

Известен е обаче и един експлоатационен проблем на синхронните машини изобщо – пускането и влизането им в синхронизъм, дължащ се на отсъствието на пусков момент при тези машини в чистия им вид. Този проблем в случая е отстранен с въвеждане на неравномерна въздушна междина – с „два диаметъра", както е показано в [1,2], така че в състояние на покой (изключен от мрежата двигател) магнитната ос на роторната полюсна система да бъде отместена на известен ъгъл от тази на възбудителната статорна система.

В настоящата работа е предложен един подход за изследване на пусковия процес и определяне на условията за развъртане на ротора на този тип машини с използване на обобщената теория на електрическите машини (ОТЕМ).

2. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследването е електродвигател SMP-25/PM, описан и изследван в [1,2,3,7] - фиг.1, предназначен за задвижване на помпа за отработилата вода на автоматична перална машина.

а) **б)** **в)**

Фиг.1. Еднофазен синхронен двигател с постоянен магнит в ротора
а/ външен вид; б/ възел ротор с преден лагерен щит и работно колело,
в/ възел статор с магнитопровод и намотка

Основни технически данни на двигателя: $P_н$ = 10W, $U_н$ = 220V, $I_н$ = 0,25A, $n_н$ = 3000min^{-1} , 2p = 2. Характеристиките на постоянния магнит в ротора са: B_r = 0,354T, H_c = 240kA/m ,материал - бариев ферит [8].

Конструктивни особености на двигателя:

- Работното колело е с радиални лопатки, което създава еднакъв товар и еднакви функционални възможности на двигателя, независимо от посоката на въртене на ротора. Тази особеност е наложена от това, че посоката на завъртане на двигателя зависи от ориентацията на роторния постоянен магнит спрямо статорната полюсна система и от произволния поляритет на тока в статорната намотка в момента на включване.

- Закрепването на работното колело към вала му осигурява свободен ход в границите на ъгъл 180^0 - в случая половин оборот на ротора на двигателя (т.н. съединител със свободен ход). Това конструктивно решение позволява при изключване роторът да спре и да се ориентира практически без механическо съпротивление по отношение на статорните, като се подготви за следващото пускане, а при включване на двигателя роторът да се развърти ненатоварен, след което влиза в синхронизъм и поема товара.

- С тази специфична конструкция двигателят е подобен на т.н. „двигател на Лакур" – еднофазен импулсен саморазвъртащ се синхронен двигател с реактивен ротор с тази разлика, че в случая роторът е неявнополюсен цилиндричен постоянен магнит, а статорът е явнополюсен.

3. ЗАДАЧА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

С помощта на математически и симулационен модел на процеса в средата на Matlab Simulink и система от диференциални уравнения на движението (на Даламбер) и уравненията на електрическото равновесие (на Кирхов), да се изследват условията за успешно пускане на двигателя.

Пускането се смята за успешно, ако при завъртането на ротора той достигне синхронната ъглова скорост и се стабилизира около нея.

Условия и допускания, при които е направено изследването:

- Пренебрегват се загубите в стоманата на статора и ротора;

- Приема се, че поради наличието на съединител със свободен ход развъртането става на празен ход.

4. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ПУСКОВИЯ ПРОЦЕС НА ДВИГАТЕЛЯ

Съгласно Обобщената теория на електрическите машини (ОТЕМ) [4,5,6] системите диференциални уравнения могат да се запишат както в роторна *dq* координатна система, така и в статорна αβ координатна система, която е по-удобна в този случай .

$$\boldsymbol{U_s} = r_s \boldsymbol{I_s} + \frac{d\boldsymbol{\Psi_s}}{dt} \quad ; \quad \boldsymbol{\Psi_s} = L_s \boldsymbol{I_s} + \boldsymbol{\Psi_f} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{I_s} = \frac{\boldsymbol{\Psi_s} - \boldsymbol{\Psi_f}}{L_s} \quad ; \quad M = J\frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r + M_T \tag{2}$$

където $\boldsymbol{U_s}$ и $\boldsymbol{I_s}$ са пространствените изобразяващи вектори на напреженията и токовете, $\boldsymbol{\Psi_s}$ и $\boldsymbol{\Psi_f}$ – векторите на потокосцепленията на статорната намотка и постоянния магнит, r_s и L_s - активното съпротивление и пълната индуктивност на намотката, ω_r – ъгловата скорост на ротора, M – въртящият момент на двигателя, J – инерционният момент на ротора и всички присъединени към него части, D – коефициент на демпфериране, отчитащ механичните и вентилационните загуби, M_T – съпротивителният момент на товара, t – времето.

Съгласно правата трансформация на Парк съставките на напреженията, токовете и потокосцепленията по двете оси ще бъдат:

$$u_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} \quad ; \quad u_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} \tag{3}$$

$$u_{s\alpha} = U_m \sin(\omega t + \varphi) cos\gamma_0 \quad u_{s\beta} = -U_m \sin(\omega t + \varphi) sin\gamma_0 \tag{4}$$

$$i_{s\alpha} = i_s cos\gamma_0 \quad i_{s\beta} = -i_s sin\gamma_0 \tag{5}$$

;

където γ_0 е началният ъгъл на отместване на оста на ротора спрямо оста на статорните полюси при изключен двигател, ω – кръговата честота на променливия ток, φ – началната фаза на напрежението.

Съставките на потокосцеплението, изразени чрез индуктивностите на намотката по двете, са

$$\Psi_{s\alpha} = L_{s\alpha} i_{s\alpha} + \Psi_{f\alpha} = L_{s\alpha} i_{s\alpha} + \Psi_{fm} cos(\gamma + \gamma_0)$$
$$\Psi_{s\beta} = L_{s\beta} i_{s\beta} + \Psi_{f\beta} = L_{s\beta} i_{s\beta} + \Psi_{fm} sin(\gamma + \gamma_0) \tag{6}$$

където $\gamma = \int \omega_r dt - \gamma_0$ е ъгълът на завъртане на ротора, Ψ_{fm} – амплитудата на потокосцеплението на магнита със статорната намотка.

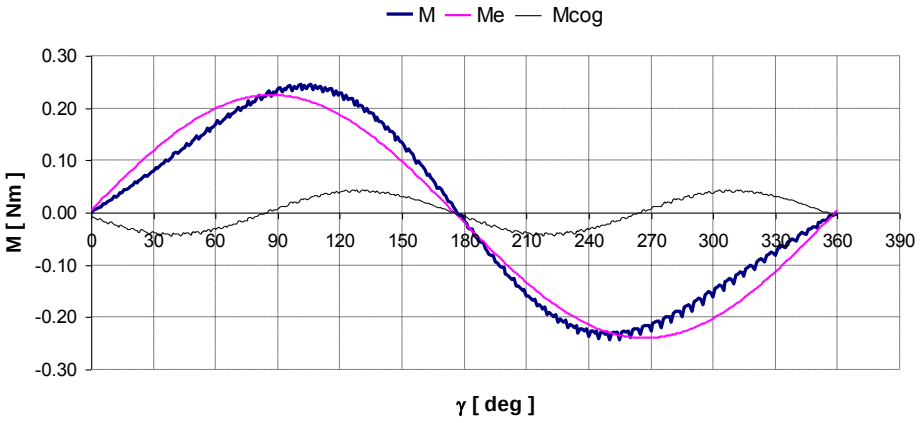
Пълният въртящ момент и статорният ток са

$$M = M_e + M_{cog} = \left(\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}\right) - M_{cgm} sin2(\gamma + \gamma_0) \tag{7}$$

$$i_s = i_{s\alpha} cos\gamma_0 - i_{s\beta} sin\gamma_0 \tag{8}$$

където M_e е електромагнитният момент на двигателя създаван от статорния ток , а M_{cog} е реактивен момент, наричан „когинг” (зъбен) момент, фиксиращ постоянния магнит на ротора в началното му положение при отсъствие на ток в статорната намотка – фиг.2. Този момент е подобен на реактивния момент при класическите синхронни машини, но тук роторът е гладък, а статорът – явнополюсен. Този момент може също така да се интерпретира като втори хармоник на общия момент, докато моментът, създаван от статорния ток, е първи хармоник.

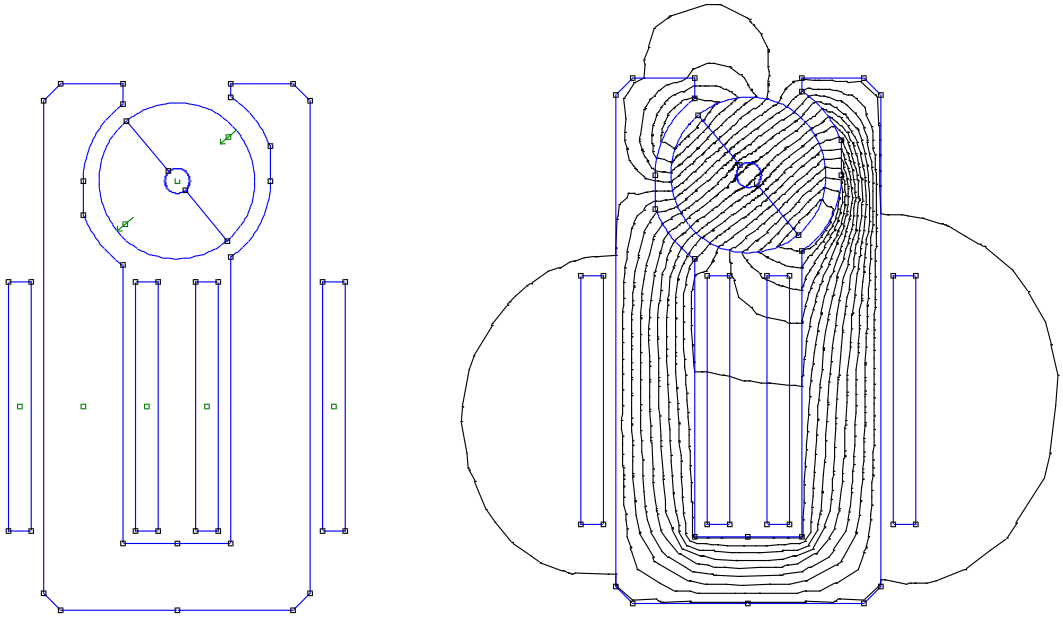
Решението на (3) при зададено напрежение и параметри на двигателя е ъгловата скорост на ротора, електромагнитният момент на двигателя и статорният ток. Последният се определя от обратната трансформация на Парк.



Фиг.2.

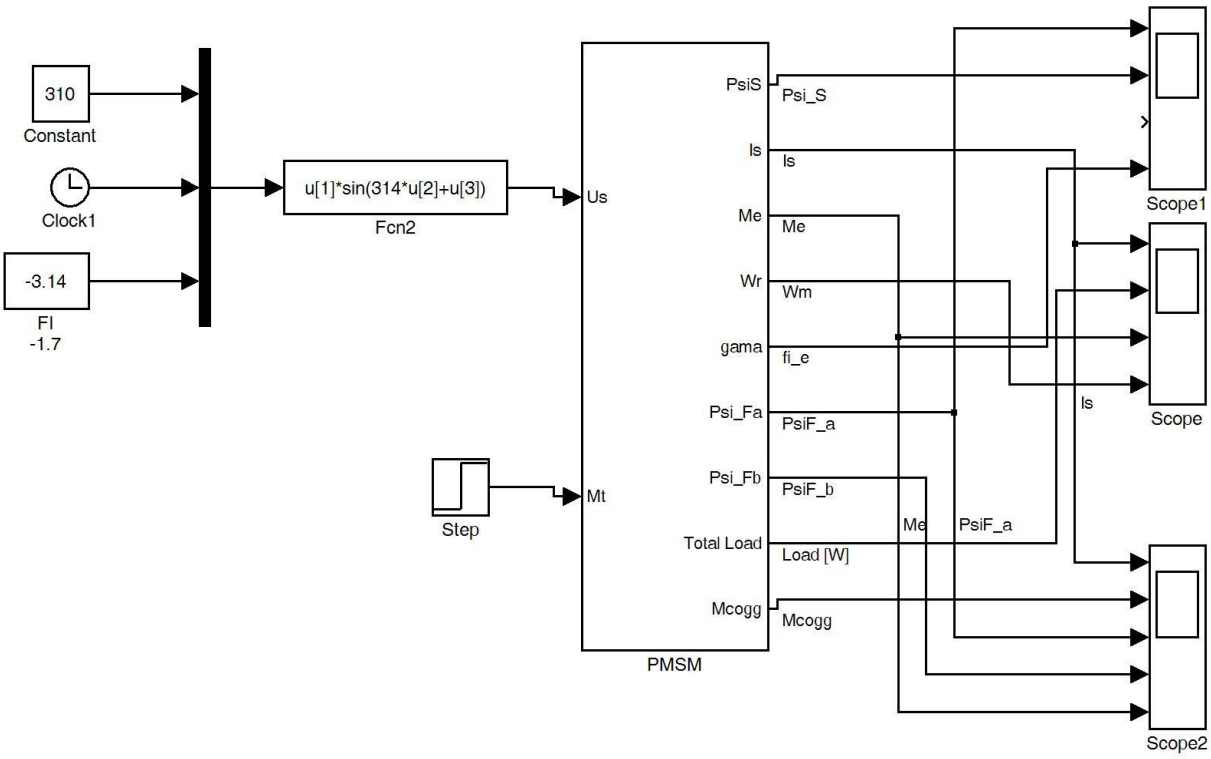
За решението на системата е съставен симулационен модел (фиг.4) в статорна координатна система в средата на Matlab Simulink [9], а на фиг.5- фиг.8 са дадени „осцилограмите”/изображенията в Matlab Simulink на интересуващите ни величини във функция от времето (от 0 до 1s).

Стойностите на величините, заложени в уравненията, получени чрез непосредствено измерване и изчисление са: r_s = 160Ω, J = 2,2.10^{-6} kgm^2



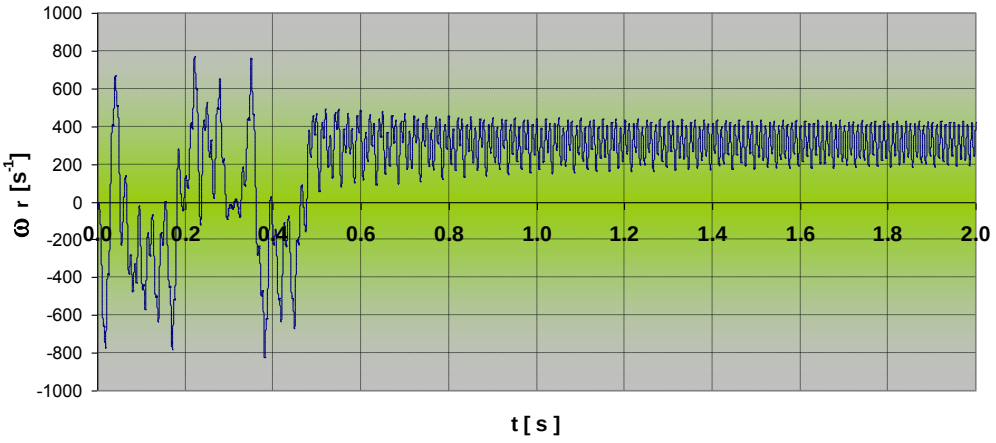
Фиг.3.

Чрез моделиране и изчисление на магнитното поле (фиг.3) на двигателя по метода на крайните елементи с продукта FEMM [3,7,8] при различни режими и положения на ротора са определени потокосцеплениятa $\Psi_{fm} = 0{,}43\text{Wb}$, индуктивностите L_s = 1,44H, $L_{s\alpha}$ = 0,543H, $L_{s\beta}$ = 0,22H и началното положение на ротора /при незахранен двигател/ - γ_0 = 4.6^o.

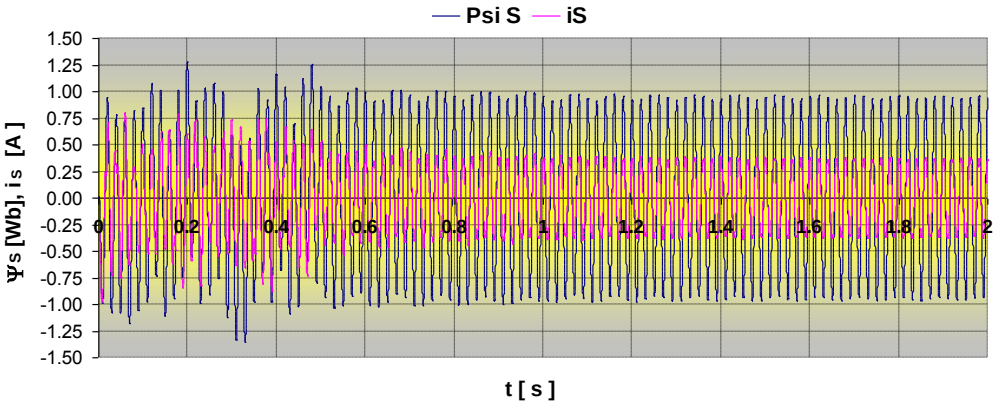


Фиг.4.

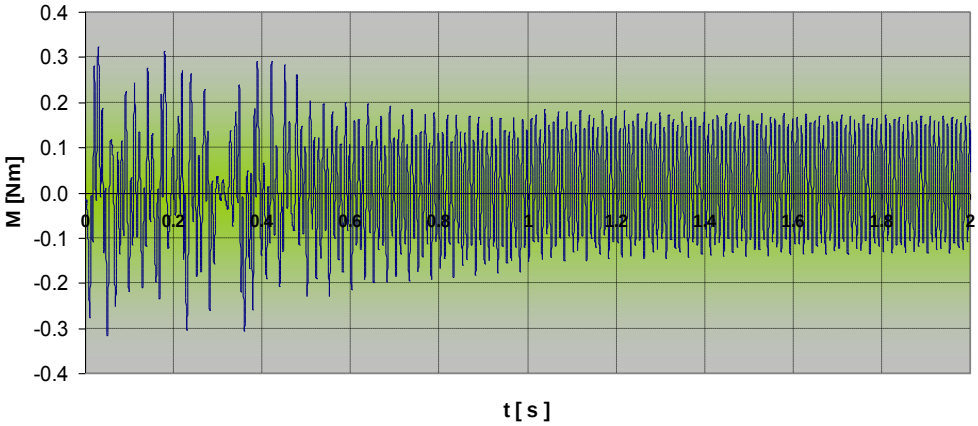
5. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО



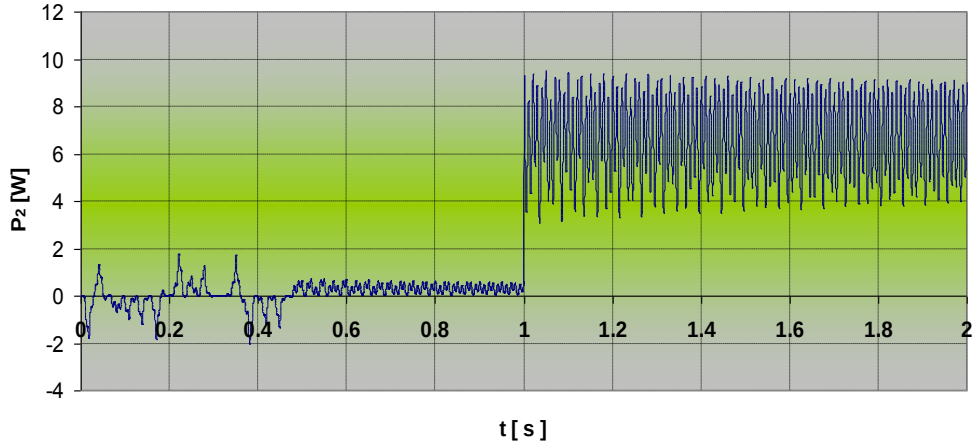
Фиг.5.



Фиг.6.



Фиг.7.



Фиг.8.

6. ИЗВОДИ

Предложеният модел е адекватен и работоспособен и позволява да се „разиграят” различни комбинации със стойностите на инерционния момент на ротора, началната фаза на захранващото напрежение и товара на двигателя, от които могат да се направят следните изводи.

- Главното условие за успешен пуск на този тип двигатели е малкият инерционен момент на ротора. Изчисленията с различни негови стойности показват, че има една гранична стойност, конкретна за всеки тип двигател, над която пускането е невъзможно.

- Успешното пускане на двигателя зависи и от началната фаза на напрежението и тока в момента на включване. При някои стойности на фазовия ъгъл развъртането и синхронизирането на двигателя е възможно още в рамките на първите няколко периода на променливия ток, а при други стойности на ъгъла това може да се случи при следващите периоди на тока.

- Посоката на завъртането на ротора зависи от полярността на тока и напрежението в момента на включване, но устройствата, задвижвани от този тип двигатели, могат успешно да функционират в две посоки на въртене. Резултатите показват, че поради несиметрията на статорните полюси, роторът има известно „предпочитание“ да тръгне в посока на по-голямата въздушна междина.

- Пусковият процес има импулсен характер, при който както моментът, така и скоростта на двигателя, имат колебателен характер, който се запазва и след синхронизирането на ротора и стабилизирането на скоростта около синхронната.

Проведените частични експерименти потвърждават направените изводи.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Патент No 4714851/ 22 Dec. 1987. “Single-phase synchronous motor with permanent magnets in the rotor”

[2] Petkovska, L., G. Cvetkovski. Study on Electromagnetic Field of a Single-Phase PM Synchronous Motor, The International Conference on Electrical Engineering, July 6-10, 2008, Okinawa, Japan, 2008

[3] Михов, М., Г. Божилов, А. Иванов. Електромагнитен момент на еднофазен синхронен двигател с постоянни магнити в ротора, Годишник на ТУ-София, т. 63, 2013

[4] Божилов, Г. Преходни процеси и обобщена теория на електрическите машини, ТУ-София, 2007

[5] Vas, P. Vector control of AC machines, Oxford Clarendon Press, 1990

[6] Рац, Е. Векторно управление на електрическите машини, С., Авангард Прима, 2010

[7] Божилов, Г., М. Михов. Пусков процес на еднофазен синхронен двигател с постоянни магнити в ротора, Годишник на ТУ-София, т. 65, 2015.

[8] Meeker, D. Finite Element Method Magnetics. Ver. 3.3, User's Manual, 2003.

[9] Matlab – High performance computation and visualization software - reference guide. The mats works, 1992

Автори: Ганчо Й. Божилов, проф. д.т.н., Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *gjboj@tu-sofia.bg*; Емил Р. Рац, проф. д.т.н., Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *erra@tu-sofia.bg*; Михо П. Михов, доц. д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mpmi@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Пламен Ризов

ВЛИЯНИЕ НА ДЕМПФЕРНАТА НАМОТКА ВЪРХУ ХАРМОНИЦИТЕ В НАПРЕЖЕНИЕТО НА ЯВНОПОЛЮСЕН СИНХРОНЕН ГЕНЕРАТОР

Емил Соколов

Резюме. *Представен е аналитичен метод за определяне на токовете в демпферната намотка, породени от зъбните хармоници на статора. Описано е изчислението на хармоничните напрежения в статорната намотка, индуктирани от потока на демпферните токове. Методът се основава на анализ на магнитното поле във въздушната междина при празен ход на генератора.*
Ключови думи: *хармоници на индукцията и напрежението, демпферни токове.*

DAMPER WINDING INFLUENCE ON THE VOLTAGE HARMONICS OF SALIENT-POLE SYNCHRONOUS GENERATOR

Emil Sokolov

Abstract: *An analytical method for determination of the damper winding currents caused by the stator slot harmonics is presented. The computation of voltage harmonics in the stator winding induced from the damper currents flux is described. The method is based on the air gap magnetic field analysis by open circuit condition of the generator.*
Keywords: *flux density harmonics, voltage harmonics, damper currents.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Отклонението от синусоида на формата на линейното напрежение на трифазните синхронни генератори се контролира (IEC 60034-1) чрез общото хармонично изкривяване *THD* (Total Harmonic Distortion). Измерената стойност на *THD* при празен ход на генератора не трябва да надвишава 5%. Изчислението на същата величина е необходимо при проектирането на генераторите и при изготвянето на оферти.

Формата на напрежението на явнополюсните генератори може да се изследва с аналитични и числени методи. Числените методи прилагат преходнен електромагнитен анализ с метода на крайните елементи. Използва се алгоритъм със свързани уравнения на полето и веригите, в съчетание със стъпка по времето и завъртане на ротора при итерациите във всяка стъпка [1, 2, 4, 5, 6].

Предложеният тук аналитичен метод е основан на хармоничен анализ на магнитното поле във въздушната междина при празен ход на генератора, определяне на токовете в пръчките на демпферната намотка, създадени от зъбните хармоници на статора и изчисление на напреженията, индуктирани в статорната намотка от полето на демпферните токове.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ХАРМОНИЦИ НА МАГНИТНАТА ИНДУКЦИЯ ВЪВ ВЪЗДУШНАТА МЕЖДИНА

Хармониците от зъбен порядък при празен ход на синхронния генератор са определени чрез магнитната индукция при гладка въздушна междина, модулирана от магнитната проводимост на зъбите и каналите на статора.

Магнитната индукция при гладка въздушна междина се изразява в статорна координатна система чрез следния ред на Фурие:

$$b_\delta(\alpha_s,t)=\sum_{\nu=1,3,5...}B_{\nu m}\sin(\nu\omega_1 t-\nu\alpha_s);\quad \omega_1=2\pi f_1 \tag{1}$$

Специфичната магнитната проводимост на въздушната междина поради назъбването на статора (при $\delta=\delta_{\min}=const$) се описва във вида:

$$\lambda_\delta(\alpha_s,t)=\sum_{i=1,2,3...}\lambda_i\cos\ 6qi\alpha_s \tag{2}$$

където броят на каналите за полюс и фаза на статорната намотка q е цяло число.

От произведението на двете функции са определени пространствените хармоници на магнитната индукция във въздушната междина от зъбен порядък:

$$b_{\nu_z}(\alpha_s,t)=\sum_{\nu}\sum_{i}\frac{B_{\nu m}\lambda_i}{2}\{\sin[\nu\omega_1 t+(6qi-\nu)\alpha_s]+\sin[\nu\omega_1 t-(6qi+\nu)\alpha_s]\} \tag{3}$$

Първият член в скобите на (3) представя обратно въртящите се хармоници, а вторият член – право въртящите се хармоници.

Между пространствените кооординати на статорната и роторната координатна система съществува зависимостта:

$$\alpha_s=\alpha_r+\omega_1 t \tag{4}$$

След като се замести (4) в (3), получава се изразът на индукцията на зъбните хармоници в координатна система, неподвижна спрямо ротора:

$$b_{\nu_z}(\alpha_r,t)=\sum_{\nu}\sum_{i}\frac{B_{\nu m}\lambda_i}{2}\{\sin[6qi\omega_1 t+(6qi-\nu)\alpha_r]-\sin[6qi\omega_1 t+(6qi+\nu)\alpha_r]\} \tag{5}$$

От (5) следва, че за дадено i статорните зъбни хармоници имат еднаква честота в ротора. Техните поредни номера са:

$$\nu_z=6qi\mp\nu \tag{6}$$

Амплитудата на хармоник с номер ν_z може да бъде определена така:

$$B_{\nu z}=k_{\delta\nu z}\frac{B_{\nu m}\lambda_i'}{2} \tag{7}$$

В (7) коригираният коефициент на специфичната магнитна проводимост поради променливата въздушна междина на полюса [3] е:

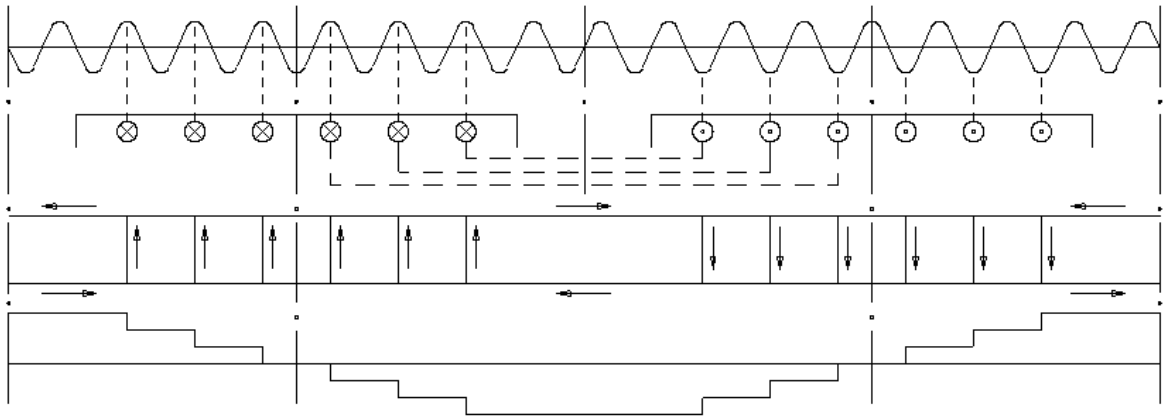
$$\lambda_i'=\frac{\lambda_i}{\cosh\dfrac{2i\pi\delta}{t_s}} \tag{8}$$

Коефициентът $k_{\delta\nu z}$ отчита затихването във въздушната междина на нормалната компонента на магнитната индукция на хармоника с номер ν_z:

$$k_{\delta\nu z} = \frac{\nu_z \frac{\pi\delta}{\tau}}{\sinh \nu_z \frac{\pi\delta}{\tau}} \tag{9}$$

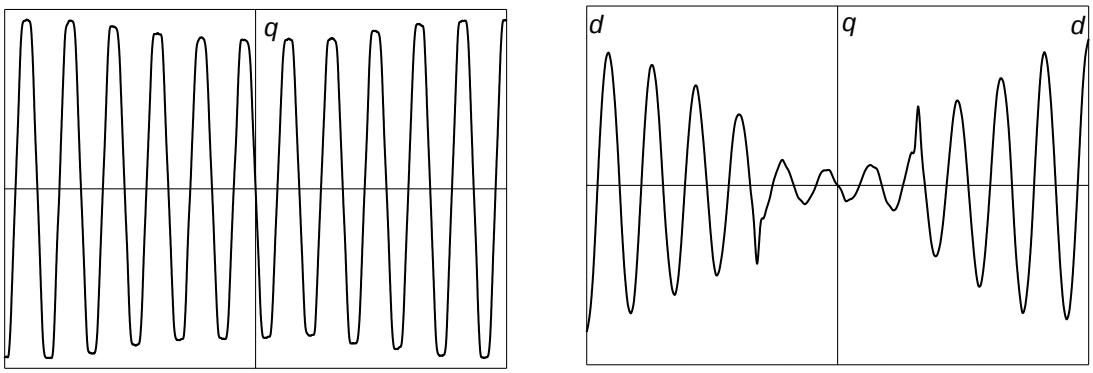
Горният коефициент е приблизително равен на единица за основния хармоник. Неговата стойност намалява с нарастването на поредния номер на хармониците, особено при по-голяма въздушна междина.

На фиг.1 (горе) са показани два полюса на явнополюсен синхронен генератор и един статорен зъбен хармоник с пореден номер $\nu_z = 17$. Дадена е симетрична демпферна намотка, чиято стъпка е равна на удвоеното полюсно деление на този хармоник. При посочените условия токовете, индуктирани в пръчките на демпферната намотка в съседните полюси, са противопосочни и образуват общ ток във връзките между сегментите.



Фиг.1. Ток на хармоник $\nu_z = 17$ в симетрични демпферни пръчки.

Високочестотният ток, предизвикан от хармоник $\nu_z = 17$, създава мдн с брой на полюсите $2p$, чиято пространствена функция е показана на фиг.1 (долу). В съвременните явнополюсни генератори отношението между каналните стъпки на демпферната намотка t_d и на статорната намотка t_s е между 0,9 и 1,1. Следователно при $q =$ ц.ч. стъпката на демпферната намотка е много близка до двойното полюсно деление на зъбните хармоници от първи ред $(\nu = i = 1)$.



а. **б.**

Фиг.2. Магнитна индукция във въздушната междина на хармоник $\nu_z = 23$.

Амплитудите на хармониците на индукцията, предизвикани от различната маг-

нитна проводимост на зъбите и каналите на статора, се променят значително във въздушната междина. На фиг.2.а е показана функцията на индукцията на хармоник $\nu_z = 23$ във въздушната междина близко до статора, а на фиг.2.б - на същия хармоник, близко до повърхността на полюсите.

Променливата въздушната междина на явните полюси причинява силно изкривяване на полето на зъбните пространствени хармоници. Амплитудата намалява вследствие различната проводимост на въздушна междина (отчетено чрез λ_i') и отслабването на нормалната компонента на индукцията за сметка на увеличената тангенциална компонента (отчетено чрез $k_{\delta\nu z}$). Въвеждането на постоянна амплитуда $B_{\nu z}$ чрез (7) цели да бъдат отразени тези ефекти.

Вълната на хармоничната индукция е симетрична спрямо напречната ос. Следователно, при симетрична демпферна намотка стойностите на индукцията в пръчките на съседните полюси са еднакви с противоположен знак.

3. ХАРМОНИЦИ НА ЕДН И ТОКА В ДЕМПФЕРНАТА НАМОТКА

На фиг.1 с прекъсната линия са означени контурите, които са приложени тук за изчисление на едн, токове и мдн в демпферната намотка при празен ход на генератора. Оста на контурите съвпада с напречната ос.

Хармониците с пореден номер ν_z индуктират в демпферните контури едн, чиято моментна стойност може да се определи от

$$e_{k\nu_z} = -\frac{d\Phi_{k\nu_z}}{dt} = -l\frac{d}{dt}\int\limits_{-\frac{\alpha_k}{2}}^{\frac{\alpha_k}{2}} b_{\nu_z}(\alpha_r, t)d\alpha_r = \sqrt{2}E_{k\nu z}\sin(6qi\omega_1 t + \frac{\pi}{2}) \qquad (10)$$

От (10) следва, че за $i = const$ хармониците индуктират в демпферните пръчки едн с една и съща честота:

$$f_{\nu_z} = 6qif_1 \qquad (11)$$

Ефективната стойност на едн в k -тия контур е:

$$E_{k\nu z} = \sqrt{2}B_{\nu m}\lambda_i' f_{\nu_z} l\frac{\tau_p}{\nu_z}k_{\delta\nu z}k_{yk\nu z} \qquad (12)$$

където

$$k_{yk\nu z} = \sin\nu_z\frac{y_k}{\tau_p}\frac{\pi}{2} \qquad (13)$$

е коефициент на скъсяване на k -тия контур за хармоник с номер ν_z. В (13) y_k и τ_p са стъпката на контура и полюсното деление, определени по дъгата на полюсния накрайник (За всички контури на фиг.1 $k_{yk\nu z} = 1$).

В табл.1 са дадени стойностите на ν, ν_z (за $i = 1$) и $k_{yk\nu_z}$ на трифазен явнополюсен синхронен генератор с брой на каналите за полюс и фаза $q = 4$ и $n_b = 7$ симетрично разположени демпферни пръчки на полюс. Отношението на каналните стъпки е $t_d / t_s = 0{,}926$.

Всички хармоници $\nu_z(i=1)$ индуктират в четирите контура на демпферната намотка един с еднаква честота 1200 Hz. Според (10) хармониците на един в контурите са във фаза или в противофаза.

Табл.1

контур $k \Rightarrow$		1	2	3	4
ν	$\nu_z(i=1)$	$k_{yk\nu z}$			
1	23	-1	-0,8388	-0,40719	-0,1557
	25	1	0,99685	0,98741	0,97176
3	21	1	0,47836	-0,54235	-0,99723
	27	-1	-0,91435	-0,67207	-0,31467
5	19	-1	-0,00248	0,99999	0.00744
	29	1	0,61122	-0,25282	-0,92028
7	17	1	-0,47399	-0,55066	0,99601
	31	-1	-0,1606	0,94842	0,46523

Токовете в пръчките са равни на токовете в съответните контури. Ефективната стойност на тока с дадена честота във всеки контур може да се изчисли, както следва:

$$I_{ki} = \frac{\sum_{i=const} E_{k\nu z}}{|Z_{ki}|} \tag{14}$$

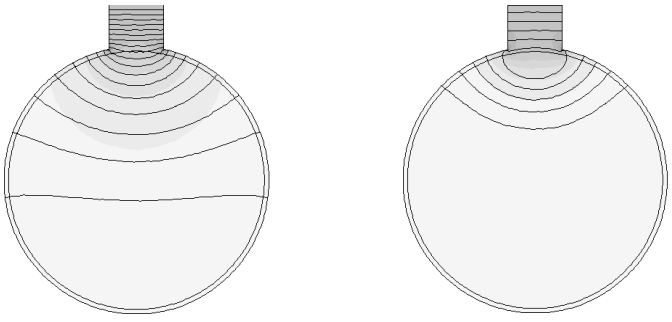
Импедансът на *k*-тия контур за съответната честота се определя като

$$Z_{ki} = 2Z_{npi} + 2Z_{k\kappa} \tag{15}$$

В (15) импедансът на пръчката е

$$Z_{npi} = k_R R_{np} + jk_X X_{np} \tag{16}$$

При изчислението на този импеданс е необходимо да се отчете ефектът на токово изместване в пръчките за честотата на хармоничния ток. На фиг.3 са сравнени линиите на полето на разсейване при честота нула ($k_R = k_X = 1$) и честота 1200 Hz ($k_R = 6{,}5;\ k_X = 0{,}2$) в демпферна пръчка с диаметър d_b =14 mm.

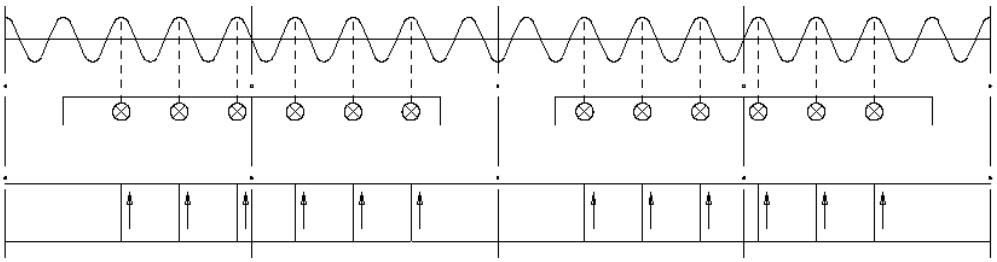


а. **б.**

Фиг.3. Еквипотенциални линии в пръчката при честота 0 (а.) и 1200 Hz (б.)

Използваните тук контури позволяват да се обобщи решението на задачата за случая на демпферни пръчки, разположени несиметрично спрямо оста на полюса. Такава конструкция се прилага, за да се анулират демпферните токове

между съседните полюси при $t_d = t_s$. На фиг.4 е показано действието на хармониик с пореден номер $\nu_z = 17$ при демпферна намотка, изместена спрямо оста на полюса на четвърт полюсно деление на хармоника. В този случай индуктираните едн в пръчките на съседните полюси са съпосочни.



Фиг.4. Ток на хармоник $\nu_z = 17$ в изместени демпферни пръчки

От фиг.4 следва, че при посочените условия не се образуват хармонични токове в демпферната намотка между съседните полюси. Чрез аналитичното решение при $\nu_z = 17$ за всички контури се получава $k_{yk\nu z} = 0$.

4. ХАРМОНИЦИ НА НАПРЕЖЕНИЕТО В СТАТОРНАТА НАМОТКА

Токовете в демпферните контури за дадена стойност на *i* имат еднаква честота. Те създават пулсираща вълна на мдн с брой на полюсите $2p$. Максимумът на основния хармоник съвпада с напречната ос. Амплитудата на първия хармоник на мдн за един полюс се определя от израза:

$$F_{mi} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi}\left(\frac{I_{1i}}{a}k_{y1} + I_{2i}k_{y2} + I_{3i}k_{y3} + \ldots + I_{ni}k_{yn}\right) \tag{17}$$

където *n* е броят на контурите, $a = 2$ при нечетен брой на пръчките за полюс, $a = 1$ – при четен брой, $k_{y1}, k_{y2}, \ldots, k_{yn}$ са коефициенти на скъсяване на контурите за първия хармоник.

Като се отчита магнитната проводимост на явнополюсния ротор, магнитната индукция на пулсиращото поле, възбудено от демпферните токове, може да се представи в роторна координатна система във вида:

$$b_{\mu i}(\alpha_r, t) = \sum_{\mu=1,3..}\sum_{i=1,2..} B_{\mu i} \sin 6qi\omega_1 t.\cos\mu\alpha_r \tag{18}$$

Последното уравнение се преобразува с помощта на (4) в статорна координатна система:

$$b_{\mu i}(\alpha_s, t) = \sum_{\mu}\sum_{i}\frac{B_{\mu i}}{2}\left\{\sin\left[(6qi + \mu)\omega_1 t - \mu\alpha_s\right] + \sin\left[(6qi - \mu)\omega_1 t + \mu\alpha_s\right]\right\} \tag{19}$$

От (19) следва, че хармониците на магнитната индукция във въздушната междина, причинени от токовете в демпферната намотка, имат брой на полюсите $2p\mu$ и честоти спрямо статора

$$f_{\mu i} = (6qi \pm \mu) f_1 \tag{20}$$

Същите честоти имат индуктирните в статорната намотка хармоници на напрежението. Ефективната стойност на фазното едн в статорната намотка при празен

ход на синхронния генератор и $\mu = 1$ е:

$$E_{\mu i} = \sqrt{2} f_{\mu i} B_{\mu i} w_1 k_{w1} l \tau \tag{21}$$

където амплитудата на магнитната индукция на основния хармоник на пулсиращото поле, създадено от демпферните токове, е:

$$B_{\mu i} = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\delta za} \delta} k_q F_{mi} \tag{22}$$

В (21) и (22) w_1 означава брой на навивките за фаза, k_{w1} - намотъчен коефициент на статорната намотка, l - изчислителна дължина, τ - полюсно деление, k_δ - коефициент на Картър, $k_{\delta za}$ - коефициент на насищане за зъбите и ярема, k_q - коефициент, отчитащ формата на полето по напречната ос.

5. ДОПЪЛНИТЕЛНИ ЕФЕКТИ

Допълнителните ефекти се причиняват от магнитна несиметрия и ексцентрицитет. При ексцентрицитет на ротора във въздушната междина възникват полета с основна честота и поредни номера $(p \pm 1)$. Те са възбудени от основния хармоник $\nu = 1$. При взаимодействието с магнитната проводимост на междината $(i = 1)$ за индукцията в статорна координатна система се получава:

$$b_e(\alpha_s, t) = \sum_{\nu_e} B_{\nu e} \sin[\omega_1 t - (p \pm 1)\alpha_s] \cos 6q\alpha_s \tag{23}$$

Поредните номера и честотите в демпферната намотка на хармониците от ексцентрицитет се определят след преобразуване на (23) с помощта на (4):

$$\nu_e = 6q \mp (p \pm 1) \tag{24}$$

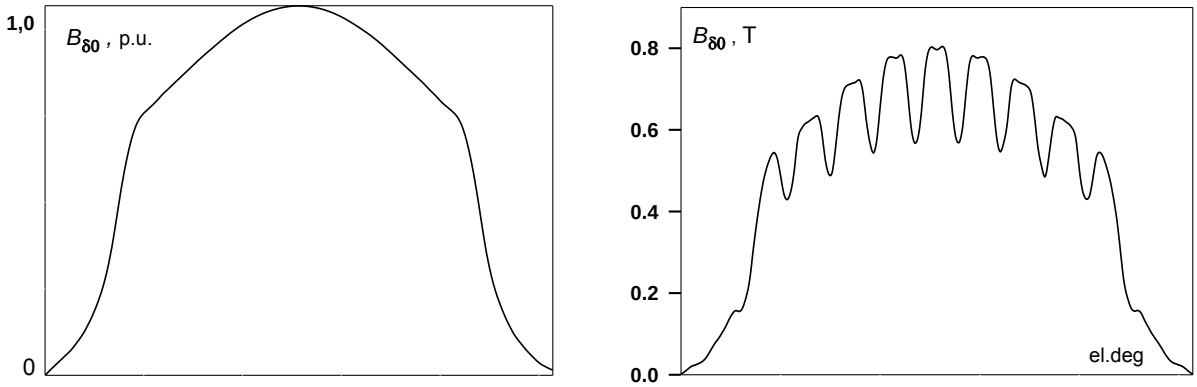
$$f_{\nu e} = (\nu_e \pm 1) f_1 \tag{25}$$

Тези хармоници също индуктират токове в роторните пръчки, които от своя страна създават пулсиращи магнитни полета с основен брой полюси. Честотите на напреженията, индуктирани в статорната намотка, се определят чрез преобразуване, подобно на това с хармониците ν_z. Оказва се, че някои честоти съвпадат с честотите на хармониците μ_i, изчислени по (20). Така например, при $2p = 8$ и $q = 4$ за $(p - 1) = 3$, ν_e = 21 и 27, а честотите на токовете в демпферната намотка са 1100 и 1300 Hz. Магнитните полета, създадени от демпферните токове, индуктират в статорната намотка напрежения с честоти $f_{\nu e} \mp f_1$: 1050, 1150, 1250 и 1350 Hz. Две от тях (1150 и 1250 Hz) съвпадат с честотите по (20), създадени от хармониците поради назъбването на статора .

6. ИЗЧИСЛИТЕЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Резултатите са получени за трифазен явнополюсен синхронен генератор със следните данни: 5550 kVA, 6,3 kV, $2p$ = 8, q = 4, y = 10, n_b = 7, d_b = 14 mm, $t_d = 40\,\text{mm}$, $t_s = 43{,}2\,\text{mm}$, $\tau_p = 506{,}4\,\text{mm}$, $\delta_m / \delta = 1{,}5$. В [7] е разработен метод за изчисление на амплитудите $B_{\nu m}$ на хармониците на магнитната индукция при гладка въздушна междина и празен ход. На фиг.5 са показани функциите на ин-

дукцията при гладка въздушна междина (фиг.5.а) и при оригиналната геометрия на генератора (фиг.5.б). Те са определени с метода на крайните елементи за възбудителен ток, който съответства на номиналното напрежение при празен ход.



а. **б.**

Фиг.5. Магнитна индукция във въздушната междина при празен ход

За изследвания генератор е изчислена амплитуда на първия хармоник на индукцията във въздушната междина $B_{1m} = 0{,}816$ T. Най-значимо е влиянието на хармониците от първи зъбен порядък $\nu_z = 6q \mp 1$ $(\nu = i = 1)$, които са създадени от основния хармоник. В случая техните номера са 23 и 25. При изчисленията са взети предвид само тези два хармоника.

Коефициентите на специфичната магнитна проводимост са определени в зависимост от размерите на зъбната зона и минималната въздушната междина $\lambda_1 = 0{,}14;\ \lambda_1' = 0{,}0543$. Те са безразмерни величини. Ефективните стойности на контурните едн са изчислени по (12), като са използвани данните от табл.1. Пресметнатата по (11) честота на демпферните токове е 1200 Hz.

Табл.2

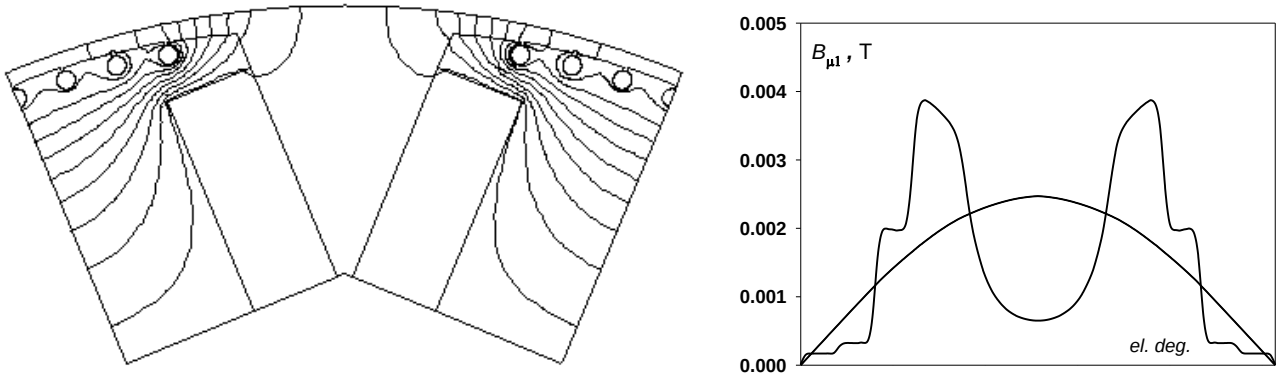
контур $k \Rightarrow$	1	2	3	4
δ, mm	11	11,2	12,4	14
$k_{\delta\nu z}$ $(\nu_z = 23)$	0,69416	0,68553	0,63377	0,56588
$k_{\delta\nu z}$ $(\nu_z = 25)$	0,65287	0,64351	0,58778	0,51602
$E_{k(\nu_z=23)}$, V	-0,94238	-0,78064	-0,35034	-0,1196
$E_{k(\nu_z=25)}$, V	0,81542	0,8012	0,72488	0,62629
$\sum E_{k\nu z}$, V	0,12696	0,0216	0,37454	0,5067
Z_{ki}, mΩ	23,658	22,661	21,6836	20,7963
I_{ki}, A	5,4	1,0	17,3	24,4

В табл.2 са дадени коефициентите $k_{\delta\nu z}$, едн на хармониците с номера 23 и 25, тяхната сума за всеки контур, стойностите на импедансите на контурите и контурните токове, определени по (14).

С помощта на (17) е изчислена амплитудата на мдн $F_{m1} = 67$ A. Амплитудата на основния хармоник на индукцията на пулсиращото поле, създадено от демпферните токове $B_{\mu 1} = 0{,}00247$ T, е определена по (22) със следните стойности на

коефициентите: $k_\delta = 1{,}2$, $k_{\delta za} = 1{,}06$, $k_q = 0{,}41$.

Съгласно (20) при $\mu = i = 1$ полето на демпферните токове индуктира в статорната намотка хармонични напрежения с честоти 1150 и 1250 Hz. Фазните напрежиния за тези честоти са определени с помощта на (21). За двете честоти са изчислени ефективни стойности на линейните напрежения съответно 192 и 238 V. За същите честоти при празен ход на генератора са измерени най-големите хармоници на линейното напрежение – съответно 166 и 260 V. Тези две хармонични напрежения са определящи за стойността на *THD*.



а. **б.**

Фиг.6. Магнитно поле на демпферните токове

На фиг.6.а е показана картината на магнитното поле, възбудено от токовете в демпферната намотка. При моделирането с метода на крайните елементи са зададени стойности на токовете в пръчките от табл.2. На фиг.6.б е дадена функцията на магнитната индукция във въздушната междитна и основният хармоник на пулсиращото поле. Получената амплитуда $B_{\mu 1}$ се съгласува добре с изчислената по (22) стойност.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Променливата магнитна проводимост на въздушната междина, следствие на зъбите и каналите на статора, предизвиква токове с висока честота в демпферната намотка. Тези токове създават магнитни полета, които индуктират в статорната намотка хармонични напрежения и изкривяват формата на напрежението на генератора. Най-силно ефектът се проявява при цяло число на каналите за полюс и фаза и при машини с относително по-малка въздушна междина (при по-малки мощности). Негативните последствия от демпферните токове са ограничени при дробна статорна намотка. Тогава нараства значително поредният номер на най-опасните зъбни хармоници от първи ред. По-рядко се прилага изместване на пръчките от оста на полюса на една четвърт от демпферната стъпка или непълна демпферна намотка.

Предложеният аналитичен метод за определяне на хармониците на напрежението при празен ход е подходящ за предварителна оценка на конструктивните варианти. Сложната структура на магнитното поле и многократното електромагнитно взаимодействие затрудняват изследването. Индуктираните в демпферната намотка едн се изчисляват за голям брой хармоници чрез разлика от близки по

стойност малки величини. Налице са допълнителни ефекти, които зависят от технологични фактори. Всичко това води до повишена изчислителна грешка.
В честотния спектър на напрежението присъстват и хармониците от насищането на магнитната верига и от формата на полюсния накрайник [7].
Предимство на аналитичния метод пред числените методи е детайлното разглеждане на физическите процеси и възможността да се проследи тяхното влияние върху хармониците на напрежението.

БЛАГОДАРНОСТ

Авторът изразява признателност на колегите от „*Елген-инженеринг*” *ООД - София* за подкрепата при изпълнението на тази работа.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Rocha E., J. Johnny, M. Uemori, A. Penteado, The damper winding influence upon salient pole synchronous generator electromotive force, Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Milwaukee, 1997.
[2] Knight A., H. Karmaker, K. Weeber, Use of a permeance model to predict force harmonic components and damper winding effects in salient pole synchronous machines, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, 2002.
[3] Traxler-Samek G., A. Schwery, E. Schmidt, Analytic calculation of the voltage shape of salient pole synchronous generators including damper winding and saturation effects, COMPEL Vol. 22, No. 4, 2003.
[4] Keller S., M. Tu Xuan, J. Simond, Computation of the no-load voltage waveform of laminated salient-pole synchronous generators, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 43, No. 3, 2006.
[5] Traxler-Samek G., T. Lugand, A. Schwery, Additional losses in the damper winding of large hydrogenerators at open-circuit and load conditions, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 1, 2010.
[6] Hargreaves P., B. Mecrow, R. Hall, Open circuit voltage distortion in salient pole synchronous generators with damper windings, 5th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2010.
[7] Sokolov E., I. Yatchev, Voltage waveform of salient pole synchronous generator, Proceedings of International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, Vol. I, Plovdiv, 2007.

Автор: Емил Соколов, проф. дтн, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ersokolov@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Пламен Ризов

НАЧИНИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ВЪРТЯЩИЯ МОМЕНТ НА МОНОФАЗНИ АСИНХРОННИ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Гаврил Гаврилов

Резюме: *Монофазните асинхронни електродвигатели най-често са с две фази, състоящи се от две взаимно пространствено разместени намотки с дефазирани магнитни потоци. За да се постигне съответния импеданс, най-често се свързва допълнителен кондензатор към една от намотките. Гъвкавата схема на включване на дефазиращите елементи позволява оптимизацията на пусковия и номиналния режим на работа на електродвигателя.*
Ключови думи: *асинхронен електродвигател, въртящ момент, дефазиращ кондензатор*

METHODS OF IMPROVING TORQUE OF SINGLE PHASE ASYNCHRONOUS MOTORS

Gavril Gavrilov

Abstract: *The single phase asynchronous motors are most often two phase ones comprising two spatially biased coils with dephased magnetic fluxes. In order to achieve the latter an additional impedance, most often a capacitor, is connected to one of the coils. The flexible formation of the dephased element allows to optimize both the start-up and the operating modes of the motor.*
Keywords: *asynchronous motor, torque, dephasing capacitor*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Монофазните асинхронни електродвигатели (АЕД) са най-масово разпространените електродвигатели в бита, ремонтния и обслужващия сектори, както и в леката промишленост. Широкото им приложение се дължи на ниската им цена и високата им надеждност при експлоатация.

Принципно монофазните АЕД се конструират така, че да работят с достатъчен въртящ момент за определени задвижвания, съответно съпротивителни моменти. Често в практиката се налага да се използват АЕД, за които има данни само за номиналния им работен режим – напрежение $U_н$, мощност $P_н$, фактор на мощността cos $\varphi_н$. Това е достатъчно за съпротивителни моменти, пропорционални в някаква степен на ъгловата скорост, най-често втора (вентилатори, помпи, корабни витла) [1]. Обаче, в редица случаи съпротивителният момент на товара е константа (металорежещи машини, подемни механизми) или е обратно пропорционален на скоростта (главни задвижвания на металорежещи машини,

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

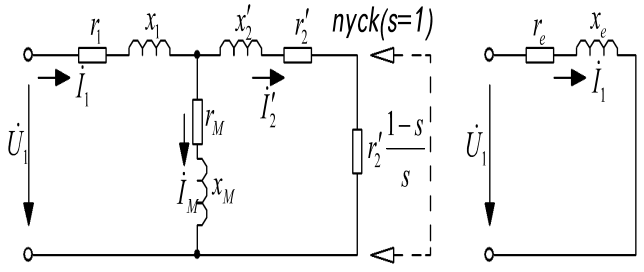
при които съпротивителният момент се обуславя предимно от силите на рязане). В такъв случай може да се окаже, че непознат АЕД, избран по номинална мощност, е с недостатъчен пусков момент за случая. Тук потребителят обикновено прибягва до използването на АЕД с по-голяма мощност, което автоматично означава дълготрайна работа с по-нисък $\cos\varphi$, което е по-скъпо за потребителя и по-лошо за електроенергийната система. Затова най-разумно е да се съобразява пусковия момент на АЕД със съпротивителния момент на задвижването, което може да се направи на всяко конкретно място и изисква влагането на неголеми средства.

В някои случаи се налага също така да се използва трифазен АЕД, който да работи към монофазна мрежа с максимално отдаване на мощност. Следователно за отделни практически случаи, е важно да се изследват възможностите за подобър въртящ момент на монофазните АЕД в характерни точки от механичните им характеристики.

2. ИЗСЛЕДВАНЕ НА УСЛОВИЯТА ЗА ПО-ДОБЪР ВЪРТЯЩ МОМЕНТ НА МОНОФАЗНИ АСИНХРОННИ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Монофазните АЕД най-често са двуфазни, като в двете пространствено дефазирани намотки се възбуждат дефазирани помежду си магнитни потоци [2]. Въртящият момент на двигателя е пропорционален на векторното произведение от потоците, съответно на пространствения и времевия ъгли между тях. За времево дефазиране на потоците от двете намотки, към една от тях трайно или моментно участва допълнително реактивно, индуктивно или капацитивно съпротивление, най-често капацитивно. В резултат на това се получава въртящо се кръгово, елиптично или елиптично-пулсиращо магнитно поле, оптимизирано за определена точка от механичната характеристика на двигателя, респективно за определено хлъзгане. На практика оптималното дефазиране на потоците от двете намотки е достатъчно само за две точки от механичната характеристика – пусков режим и режим на номинален товар.

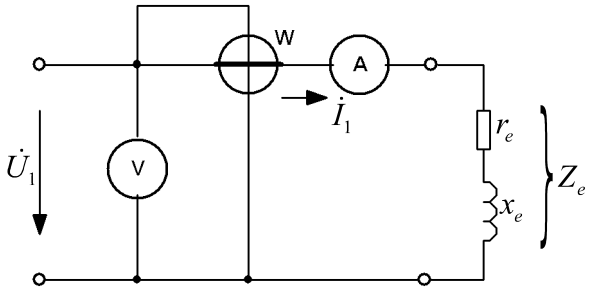
За анализа се изхожда от заместващата схема на АЕД, подобна на тази за трансформатора – фиг.1-а.



а **б**

Фиг.1. Заместваща схема на работна фаза на АЕД:
а - принципна схема;
б – еквивалентен спрямо входа двуполюсник

Съпротивленията r_1 и r_2' (приведено към напрежение U_1) отразяват активните съпротивления на статорната и роторната намотки, а x_1 и x_2' (също приведено към U_1) – индуктивностите на разсейване на двете намотки. Съпротивленията r_M и x_M отразяват съответно загубите в стоманата и взаимната индуктивност между намотките, а $r_2' \dfrac{1-s}{s}$ - отдаваната на вала на електродвигателя механична мощност. В момент на пуск хлъзгането $s = \dfrac{n_1 - n}{n_1} = 1$ (n_1, n - честоти на въртене, съответно на въртящото се магнитно поле и на ротора) и съпротивлението $r_2' \dfrac{1-s}{s}$ е нула. Спрямо входа, всяка фаза на АЕД може да се замести с еквивалентен двуполюсник – фиг.1-б, където r_e и x_e са съответно еквивалентните активно и индуктивно съпротивления на двуполюсника.
Стойностите на елементите от фиг.1-б могат да бъдат измерени или изчислени – фиг.2. За даден АЕД стойностите при номинален товар могат да се изчислят от табличните данни, а при пуск да се измерят при застопорен ротор.



Фиг.2. Схема за измерване на еквивалентния импеданс на работна фаза на АЕД

Въртящият момент при монофазен АЕД, изпълнен по принцип като двуфазен, е:

$M = c.\phi_I.\phi_{II}.\sin\Theta.\sin\psi$, където C е коефициент на пропорционалност;

ϕ_I и ϕ_{II} - магнитни потоци от токовете в намотки I и II;

Θ - пространствен ъгъл между магнитните оси на намотките I и II;

ψ - времеви ъгъл между потоците ϕ_I и ϕ_{II}.

От своя страна магнитните потоци са правопропорционални на магнитодвижещите напрежения:

$\phi_I = G_M.F_I = G_M.I_{1I}.w_I.k_{wI}$,

$\phi_{II} = G_M.F_{II} = G_M.I_{1II}.w_{II}.k_{wII}$,

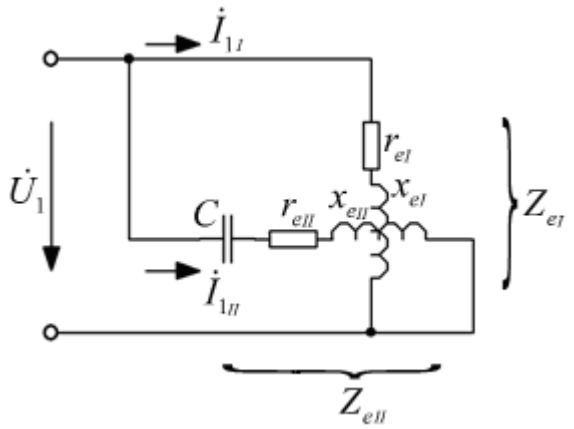
където G_M е магнитната проводимост на контура;

I_{1I}, I_{1II} - токовете в статорните намотки I и II;

w_I, w_{II}, k_{wI}, k_{wII} - броят на навивките и коефициентите на намотките I и II.

За всяка от намотките коефициентът на намотките е: $k_w = k_y.k_q$, където k_y и k_q са коефициентите на скъсяване и на разпределение на намотката.

Най-равномерното въртящо се поле е кръговото. Условията за това са: $\phi_I = \phi_{II}$, $\Theta + \psi = \pi$ (най-добре $\Theta = \psi = \frac{\pi}{2}$) [2]. Затова обикновено намотки I и II се дефазират конструктивно на ъгъл $\frac{\pi}{2}$, като дефазирането на токовете се постига най-често с кондензатор *C* (кондензаторни АЕД), включен последователно към една от намотките – фиг. 3.



Фиг.3. Схема на свързване на намотки I и II на двуфазен кондензаторен АЕД

За прототип на реален монофазен АЕД е изследван трифазен АЕД, тип А071В/2. Номиналните му данни са: $P_н$=*0.55 kW*; за всяка от намотките напрежение $U_н$=*220 V*; фактор на мощността cos $\varphi_н$ = 0.83. Свързването му е в "звезда" с изведена неутрала, което позволява пресвързване на намотките за целите на изследването и подготовка за включване към монофазна мрежа. Намотките му са симетрични, т.е. $w_I = w_{II} = w_{III}$, $k_{wI} = k_{wII} = k_{wIII}$, и направените по-долу разсъждения са за монофазен АЕД с еднакви намотки *I* и *II*.

За АЕД с еднакви намотки $w_I.k_{wI} = w_{II}.k_{wII} = k$ и магнитните потоци в тях са еднакво пропорционални на токовете: $\phi_I = G_M.k.I_{1I}$, $\phi_{II} = G_M.k.I_{1II}$. При неизменни коефициент c, поток ϕ_I и ъгъл Θ, за най-голям въртящ момент трябва да се намери максимумът на функцията:

$$f = I_{1II}.\sin\psi = \frac{U_1}{Z_{eII}} \sin\left(arctg\,\frac{x_{e_I}}{r_{e_I}} + arctg\,\frac{x_c - x_{e_{II}}}{r_{e_{II}}} \right),$$

респективно стойността на капацитета на кондензатора *C* при $f' = 0$.

При това ограничителните условия са:

а) $I_{1II} \le I_{допустим}$, т.е. при еднакви характеристики $I_{1II} \le I_{1I}$;

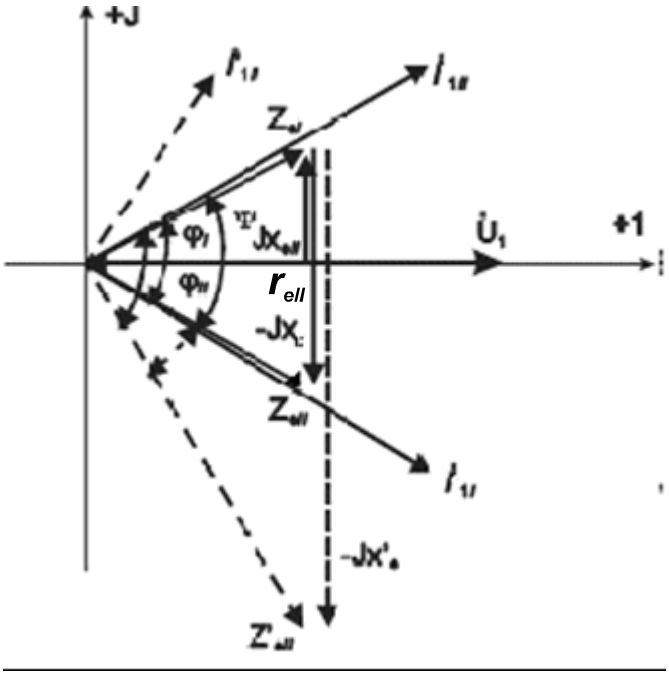
б) $\psi \in \left[(\varphi_I + \varphi_{II}), \frac{\pi}{2} \right]$ - фиг. 4.

Отделното изследване на функциите $I_{1II} = f_1(\psi)$ и $\sin\psi = f_2(\psi)$ показва подчертано различен ръст на функциите в диапазона на изменение на ψ, показан на

фиг.4 за еднакви намотки I и II, респективно максимален момент M при $I_{1II} = I_{1I}$ и $\varphi_{II} = \varphi_I$.

Например при $\varphi_I = \varphi_{II} = \frac{\pi}{6}$ и $\psi = \varphi_I + \varphi_{II} = \frac{\pi}{3}$, за граничната стойност $\psi' = \frac{\pi}{2}$ токът $I'_{1II} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{1II}$, докато $\sin\psi' = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\psi$, моментът $M' = \frac{2}{3} M$, т.е. подчертано $M' < M$ (при $I_{1II} = I_{1I}$, $\psi = \varphi_I + \varphi_{II} = 2\varphi_I$).

За масовите монофазни АЕД при номинален товар факторът на мощността е cos $\varphi_н$ = 0.83÷0.85, респективно $\varphi_н$ = (33.9÷31.8)°.



Фиг.4. Векторна диаграма на импедансите и токовете в еднакви намотки I и II на двуфазен кондензаторен АЕД

3. РЕЗУЛТАТИ

Приблизително в този диапазон са и ъглите при пуск на АЕД, потвърдено от експеримента с реалния АЕД. При застопорен ротор и включване по схемата на фиг.2 бяха измерени: $U_1 = 220V$; $I_1 = 6.4A$; $P_w = 1240W$. След изчисления са определени пусковите cos $\varphi_п$ = 0.88, съответно $\varphi_п$ = 28.4°.

На практика това съвпада с илюстрацията и тълкуванията на фиг. 4 – за еднакви намотки I и II максимален въртящ момент при допустимия $I_{1II} = I_{1I}$ и $\varphi_{II} = \varphi_I$.

В частен случай при резултативния $\psi \approx \frac{\pi}{3}$ и необходимост от включване на трифазен АЕД към монофазна мрежа, могат успешно да се използват две от намотките (както при монофазен АЕД), дефазирани на ъгъл $\frac{2\pi}{3}$.

Въртящото се магнитно поле ще е максимално близко до кръговото, тъй като

$\phi_I = \phi_{II}$; $\Theta + \psi \approx \pi$.

Трябва да се отбележи, че ако е предвидено конструктивно, намотките *I* и *II* на кондензаторен АЕД (пространствено на ъгъл $\frac{\pi}{2}$) , могат да бъдат дотолкова различни (по брой навивки и коефициенти на намотките и по сечения на проводниците заради допустимия траен ток), че при дефазиране между магнитните потоци на ъгъл $\frac{\pi}{2}$ магнитодвижещите напрежения да са равни и освен кръгово въртящо се поле да се постигне и максимален въртящ момент. В случай, че това е направено за режим на номинален товар, трябва да се направят съответните измервания и да се определи оптималният дефазиращ капацитет за момента на пуск.

За указания по-горе трифазен електродвигател при работа като монофазен с две от намотките си от условието:

$$I_{1II} \le I_{1I}$$, съответно $x_c \ge 2x_e$ (виж фиг. 4) или $\frac{1}{\omega C} \ge 2x_e$,

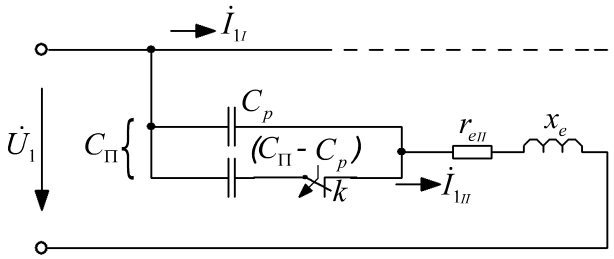
за работа при номинален товар получаваме работен капацитет $C_p \le 13.03\,\mu F$; за режим на пуск - пусков капацитет $C_{\text{п}} \le 97.7\,\mu F$.

Съобразно изчислените капацитети се избират стандартни кондензатори. Допуска се превишаване на изчислените токове до 5%, затова в случая се избират стандартни $C_p = 13\,\mu F$, $C_{\text{п}} = 100\,\mu F$.

Принципно, участието на дефазиращите капацитети, оптимизиращи две точки от механичната характеристика на АЕД, трябва да става на два етапа:

1) пусков режим – участва капацитетът $C_{\text{п}}$, реализиран практически с два паралелни капацитета - C_p и $(C_{\text{п}} - C_p)$ – фиг. 5;

2) развъртане до $60 \div 70\%$ от номиналните обороти и изключване на капацитета $(C_{\text{п}} - C_p)$, като постоянно включен остава капацитетът C_p .

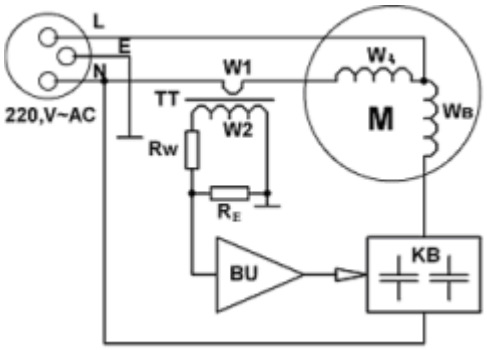


Фиг.5. Схема на двустепенно управление на дефазиращите капацитети при пуск и номинален товар на АЕД; k - ключ, комутиращ след развъртане на АЕД

Изключването на капацитета ($C_{\text{п}} - C_p$) след развъртане на АЕД се осъществява по електромеханичен или електрически (контактен или безконтактен) начини.

При електромеханичния начин трябва конструктивно да е предвиден центробежен изключвател, който след развъртане на АЕД, под действие на центробежните сили прекъсва веригата на капацитета ($C_{\text{п}} - C_p$).

При електрическия контактен начин в статорната верига на АЕД участва токово реле, което след намаляването на пусковия ток (вследствие развъртането на двигателя) изключва капацитета ($C_{\text{п}} - C_p$). При електрическия безконтактен начин изключването на капацитета ($C_{\text{п}} - C_p$) става с електронен ключ, който се задейства от компаратор, следящ намаляването на пусковия ток при развъртане.
Използването на електронни средства позволява също и гъвкаво да се следи изменението на тока в статорната намотка на АЕД, респективно на импеданса, и да се поддържат оптимални въртящи моменти в редица точки от механичната характеристика на двигателя чрез многостепенно превключване на дефазиращи капацитети.
Блокова схема на такова изпълнение е показана на фиг.6.



Фиг.6. Блокова схема на АЕД с електронно управление

При нея големината на работния ток се контролира непрекъснато от токов трансформатор TT, който разделя галванично работната и измервателната вериги. Същият е изследван подробно в преходен и стационарен режим [3].
Елементите на схемата са:

M - монофазен АЕД с намотки:
основна - W_A и спомагателна - W_B;
TT - токов трансформатор;
BU - блок за управление;
KB - кондензаторен блок;
R_W - съпротивление на вторичната намотка на TT;
R_E - еталонен (измервателен) резистор.

Управляващият блок сравнява сигналите от TT с набор от предварително зададени стойности, като се изработва сигнал за управлението на $MOS\ FET$ електронни ключове. Последните комутират съответните кондензатори от кондензаторния блок (KB).

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигането на максимален въртящ момент на монофазен АЕД чрез подходящ дефазиращ капацитет за моментите на пуск и номинален товар, е напълно възможно с достъпни технически средства. Използването на електронни елементи освен това позволява и гъвкаво да се оптимизира въртящият момент в редица точки от механичната характеристика на електродвигателя.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ключев В. И. ***Теория электропривода***. Москва, Энергоатомиздат, 2001.

[2] Божилов Г., Е. Соколов, И. Ваклев. ***Електромеханични устройства.*** София, Техника, 1991.

[3] Вольдек А. И., В. В. Попов. ***Электрические машины. Машины переменного тока.*** Санкт Петербург, Питер, 2010.

Автор: Гаврил Гаврилов, ас. маг. инж. от Колеж по Енергетика и Електроника към Технически университет - София, база Ботевград, E-mail address: *garygavrilov@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Адроан Иванов

СРАВНЕНИЕ НА ПРЕХОДНИ РЕЖИМИ ПРИ ПУСКАНЕ НА ПОСТОЯННОТОКОВИ ДВИГАТЕЛИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ И ВЪЗБУЖДАНЕ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ПОСРЕДСТВОМ ЧИСЛЕНИ МОДЕЛИ

Михо Михов, Емил Рачев, Адриан Иванов

Резюме: *Определен е и е съпоставен разходът на електрическа енергия в пусков режим на представените в предходната разработка [1] ПТД с последователно възбуждане и ПТД с възбуждане с постоянни магнити. Изследването е направено с модели в средата на Matlab/Simulink като данните за магнитните полета са получени от модели в средата на FEMM.*
Ключови думи: *постояннотоков двигател с възбуждане с постоянни магнити, моделиране, икономия на електрическа енергия, пусков режим.*

NUMERICAL MODELS COMPARISON OF TRANSITIONAL REGIMENS FOR DC MOTOR WITH COHERENT EXCITATION AND EXCITATION OF PERMANENT MAGNETS

Miho Mihov, Emil Rachev, Adrian Ivanov

Abstract: *The paper presents determination of energy consumption expenditure in starting mode and comparison to the results, published in the previous development [1] Brushed DC Motor (BDCM) sequential excitation and BDCM with permanent magnet excitation. The test is realized through comparison to reference models, developed in Matlab/Simulink whereas the data magnetic fields are derived from the models in the middle of FEMM*
Keywords: *DC motor with permanent magnet excitation, modeling, power savings, starting mode.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Както беше посочено вече в [1] и далеч не само там, съществува тенденция за замяна на постояннотоковите двигатели (ПТД) с възбудителна намотка с такива, при които възбуждането се осъществява с постоянни магнити. Едно от съображенията за това е икономията на електроенергия за захранването им, най-вече, когато те се намират на подвижни обекти, при които източниците са електрически акумулатори.

В [1] беше представена замяна на възбудителната намотка на двигател с последователно възбуждане с възбудителна система от постоянни магнити. Изпълненото условие бе работните точки на двете машини да съвпадат. Известно е обаче [1,2], че механическите характеристики при различния вид възбудителни

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

системи са различни, което води до различен вид поведение при преходните им режими – пускане, реверсиране, динамично спиране.

Това поставя нова задача на изследването с предварителен характер във връзка със замяната, върху времеви модели, които да опишат количествено параметрите при протичането на съответните режими.

2. ЗАДАЧА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Задачата на изследването е да се определи (числено) разхода на електрическа енергия и други количествени показатели при машините с различна възбудителна система и една и съща котва като се отчитат и преходните процеси, в частност при пускане.

В случая, като се отчете обстоятелството, че захранващия източник е акумулатор (акумулаторна батерия), чиято енергийна характеристика за запасеност се измерва в амперчасове (Ah) е целесъобразно да се сравнява количеството електричество $Q = \int_0^t i(t)\,dt$ потребявано от двигателите с различни възбудителни системи.

3. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обектът на изследване, двигател за постоянен ток с последователно възбуждане /ПТД-ПВ/, е посочения в [1] изходен двигател ЕС 1.7/1.2/44-01 от производствената номенклатура на завод „Kostov-Motors [3] със следните данни (по каталог и изпитателен протокол):

P_n = 1.79 kW; U_n = 10.5 V /постоянно напрежение/ I_n = 250 A

n_n = 4400 min^{-1} ; M_n = 3.69 Nm; 2p = 4; Z_2 =29

Данни в изпитвателните протоколи:

n_n = 4200 min^{-1} ; M_n = 4.07 Nm;

$R_{a\,t}$ = 0.001145 Ω; $R_{c\,t}$= 0.002538 Ω; $2\Delta U_Ч = 2.78$ V;

Посока на въртене – реверсивен.

Възбуждане – последователно.

Котвената и възбудителната намотки са изработени от шини.

Другият обект на изследване е горният двигател, с възбудителна система осъществена със сегментни магнити тип NFB38 [1,4]. По-нататък това е постояннотоков двигател с възбуждане с постоянни магнити - ПТД-ПМ. Пресечната точка /точката на замяната/ при стационарните механически характеристики на моделите на двигателите с последователно възбуждане и възбуждане с постоянни магнити е с координати $M = 3.683\,\text{Nm}; n = 4410\,\text{min}^{-1} / \Omega = 461.81\,\text{rad/s}/$ [1]. По отношение на енергийната ефективност на ПТД-ПМ, неговият "електромагнитен к.п.д." има стойност $P_\delta / P_1 = 0.708$ срещу 0.648 при ПТД-ПВ.

4. ОСНОВНИ УРАВНЕНИЯ НА ПРЕХОДНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ДВИГАТЕЛИТЕ

4.1. ОСНОВНИ УРАВНЕНИЯ НА ПРЕХОДНИТЕ ПРОЦЕСИ НА ПТД-ПВ

Системата диференциални уравнения, която се решава в модела за изследване на преходните режими на ПТД-ПВ е [5,6]:

$$\frac{d\Psi(i)}{dt} + Ri + 2\Delta U_{ч} + e = U_{mot}$$
$$J\frac{d\Omega}{dt} + M_C = M_\delta \qquad (1)$$

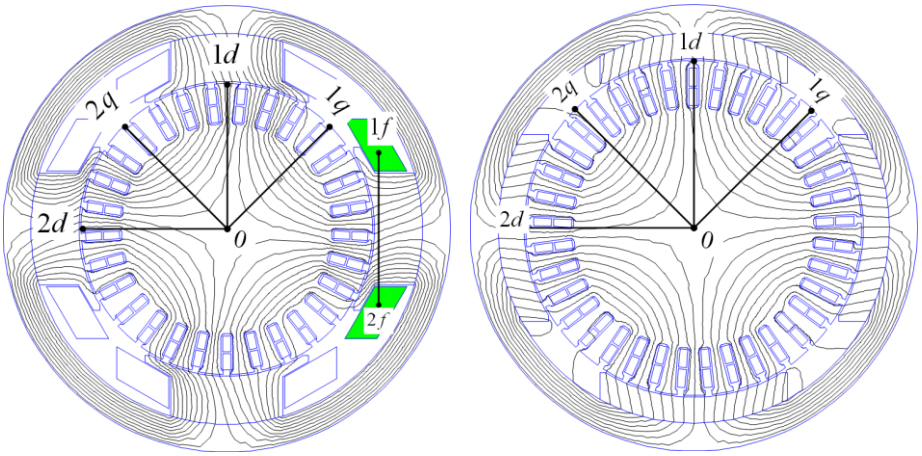
В горната система първото уравнение е уравнението за напрежението на котвената намотка, в което $\Psi(i) = \Psi_f(i) + \Psi_a(i)$ е общото потокосцепление по контура на котвения ток i. При двигателите с последователно възбуждане в него са включени потокосцеплението на възбудителната намотка $\Psi_f(i) = \Phi_f(i) w_f$ и това по оста на котвената намотка $\Psi_a(i)$. В конкретния случай, поради реверсивността на машината, „оста на четките" , съответно - на котвената намотка съвпада с оста q на машината (фиг.1) и $\Psi_a(i) = \Psi_q(i) = \Phi_q(i) w_a'$, В посочените зависимости за потокосцепленията w_f са последователно свързаните навивки на всички полюси, а w_a' - ефективният брой навивки на котвената намотка [5,6]. Потокът Φ_q се определя като нормална съставка на потока по оста 1d,0,2d (фиг.1).

В зависимост (1) електродвижещото напрежение:

$$e = \Psi_d(i)\Omega \qquad (2)$$

и електромагнитният момент:

$$M_\delta = \Psi_d(i) i \qquad (3)$$



Фиг.1. Разпределение на магнитното поле в постояннотоков двигател с последователно възбуждане (ПТД-ПВ) в ляво и такъв с възбуждане с постоянни магнити (ПТД-ПМ) - в дясно.

Потокосцеплението Ψ_d по надлъжната магнитна ос може да се определи по израза $\Psi_d(i) = \Phi_d(i) w_a'$, като магнитният поток $\Phi_d(i)$ по надлъжната ос d на машината е нормалната съставка на потока по контура $1q, 0, 2q$ на фиг.1.

Съпротивлението $R = R_a + R_f$ представлява сумата от активните съпротивления на контура, по който тече котвеният ток, а именно съпротивлението на котвената намотка R_a и съпротивлението на последователно свързаната възбудителна намотка R_f. Падението на напрежението в четките е $2\Delta U_{ч}$. Двигателят се зах-

ранва с постоянно напрежение U_{mot}. Товарният момент в случая на задвижване на водно витло има вентилаторна характеристика от типа на посочената в [5]

$$M_C = k_C \Omega^m \tag{4}$$

Така, след преобразувания, системата (1) ще добие вида:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{d\Psi_f(i)}{di} + \frac{d\Psi_q(i)}{di}\right)\frac{di}{dt} + \left(R_a + R_f\right)i + 2\Delta U_ч + \Psi_d(i)\Omega = U_{mot} \\ &J\frac{d\Omega}{dt} + k_C\Omega^m = \Psi_d(i)i \end{aligned} \tag{5}$$

4.2. ОСНОВНИ УРАВНЕНИЯ НА ПРЕХОДНИТЕ ПРОЦЕСИ ПРИ ПТД-ПМ

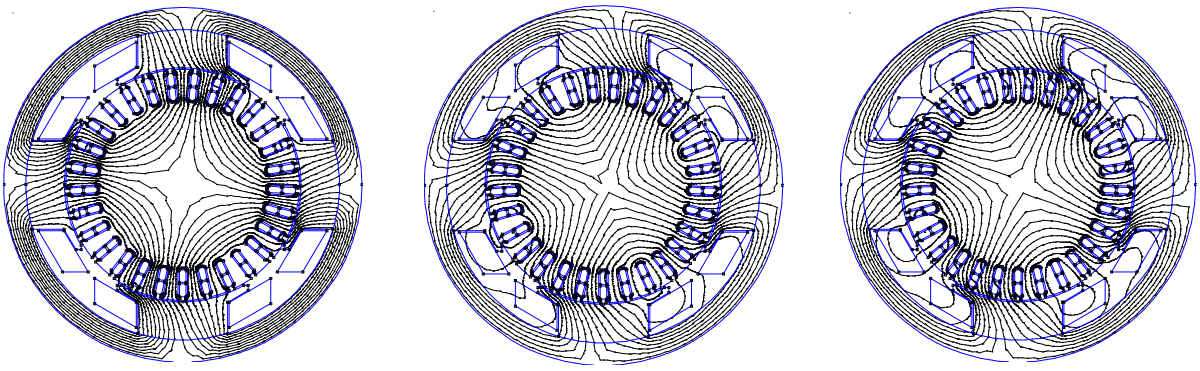
Системата диференциални уравнения, която се решава в модела за изследване на преходните режими на ПТД-ПМ е структурно идентична с тази на ПТД-ПВ - (5), при условия $\Psi_f(i) = 0;\ R_f = 0$, които отразяват отсъствието на последователната възбудителна намотка фиг.2:

$$\begin{aligned} &\frac{d\Psi_q(i)}{di}\frac{di}{dt} + R_a i + 2\Delta U_ч + \Psi_d(i)\Omega = U_{mot} \\ &J\frac{d\Omega}{dt} + k_C\Omega^m = \Psi_d(i)i \end{aligned} \tag{6}$$

5. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ФУНКЦИОНАЛНИТЕ ЗАВИСИМОСТИ НА ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯТА

Необходимите за решението на системите диференциални уравнения (5) или (6) данни за потокосцеплениятa $\Psi_d(i)$ и $\Psi_q(i)$ се получават, както вече бе посочено от модели в средата на FEMM. За да се получи необходимата функционална зависимост $\Psi_k = f(i)$ се използват решенията на модела на изследваната машина в тази среда, като се задават поредица от стойности на тока.

5.1. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ФУНКЦИОНАЛНИТЕ ЗАВИСИМОСТИ НА ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯТА ПРИ ПТД-ПВ



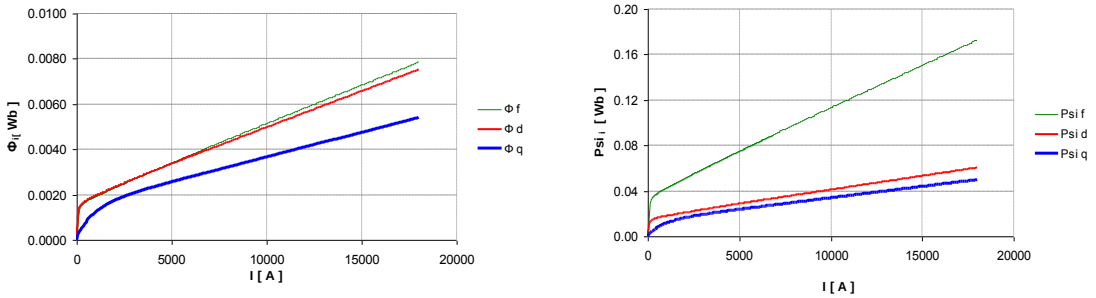
$I_a = I_f = 250\ A$ $I_a = I_f = 7000\ A$ $I_a = I_f = 18000\ A$

Фиг.2. Разпределение на магнитното поле в ПТД – ПВ при различни стойности на тока.

В този случай (фиг.2) се задават поредица от стойности на тока, който в случая е един и същ във възбудителната и котвената намотки. Определянето на потокосцеплениятa става по описания по-горе начин в постпроцесора на FEMM. Тук

и по-долу, при ПТД-ПМ, поредицата от токове е от 50А до 18000 А със стъпка 50А, т.е. числовите функции за потокосцепленията съдържат по 360 точки. Горната граница на интервала съответства с резерв, ориентировъчно, на „стационарната" стойност на тока при реверсиране.

На фиг.3 е показано едно очаквано, известно от специализираната литература, изменение на магнитните потоци в машината при изменение на тока. По тази причина посочените функции са сходни - нарастващи и нелинейни.



а) **б)**

Фиг.3. Стойности на магнитните потоци (а) и потокосцепленията (б) при различни стойности на тока на ПТД-ПВ **(** Psi q ≡ Ψ_q , Psi d ≡ Ψ_d)

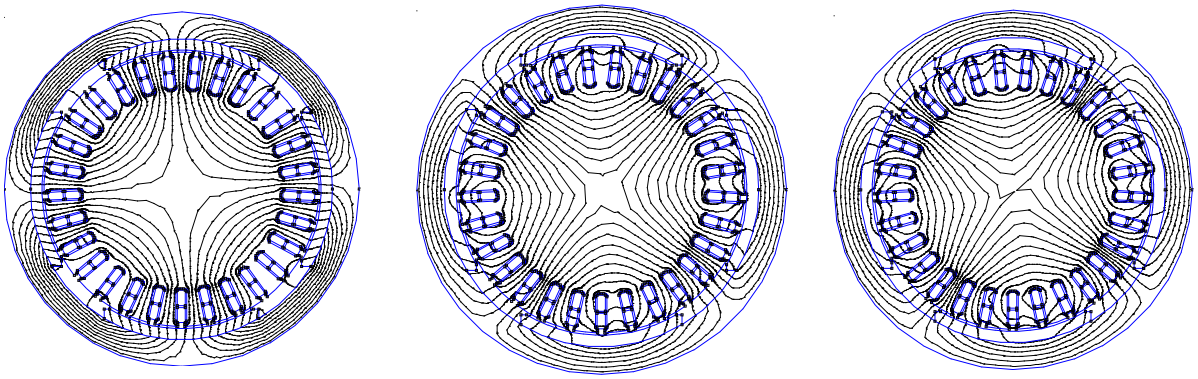
Изменението на потокосцепленията необходими за системата диференциални уравнения (5) е показано на фиг.3.б. Естествено, характерът на изменението им съответства на този на магнитните потоци - фиг.3.а.

Аналитичните зависимости получават чрез аналитична интерполация на съответните криви - фиг.3.б. Идентичният характер на кривите определя и структурно еднаква интерполационна зависимост, която е от типа:

$$\Psi_k = \frac{a_k\, i}{b_k + i} + c_k\, i \qquad (7)$$

5.2 ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ФУНКЦИОНАЛНИТЕ ЗАВИСИМОСТИ НА ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯТА ПРИ ПТД-ПМ

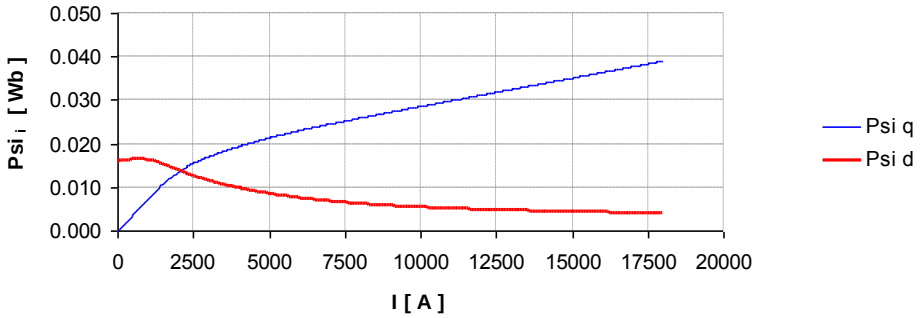
Направени са изследвания върху модел с височина на магнита h_m ***=3mm.*** Магнитите са от типа NFB38 [4]. Височината на статорния ярем е неизменна. При тези условия, както е посочено в [1], има напълно удовлетворително съвпадение на работните точки при двата вида възбудителни системи.



I_a = 250 A I_a = 7000 A I_a = 18000 A

Фиг.4. Разпределение на магнитното поле в ПТД – ПМ при различни стойности на тока при дебелина на магнита h_m **= 3 mm.**

За нуждите на настоящето изследване бяха направени изчисления в посочения по-горе интервал за токовете (решенията за три стойности на тока са показани на фиг.4) и са получени числени резултати за потокосцепленията (фиг.5).



Фиг.5. Изменение на потокосцепленията при различни стойности на тока на ПТД-ПМ при h_m =3 mm (Psi q $\equiv \Psi_q$, Psi d $\equiv \Psi_d$)

Еднаквият характер на изменение на потокосцеплението Ψ_q при ПТД-ПВ и ПТД-ПМ определя и общия характер на интерполационната зависимост (7). Предложението за интерполационната зависимост за потокосцеплението Ψ_d е:

$$\Psi_d = \frac{a_d + b_d\, i}{1 + c_d\, i} \tag{8}$$

6. ЧИСЛЕНО-ПАРАМЕТРИЧНИ МОДЕЛИ НА ПТД-ПВ И ПТД-ПМ

6.1. ВЪНШНА ХАРАКТЕРИСТИКА *U=F(I)* НА ЗАХРАНВАЩИЯ АКУМУЛАТОР

Допускания при описанието на външната характеристика: характеристиката е падаща, линейна; характеристиката минава през точките $I = 0A, U_0 = 12V$ и $I = I_n = 250\,A, U = 10,5V$. С други думи, вътрешното съпротивление на акумулатора е $R_{acum} = 0.006\,\Omega$, което води до вътрешен пад на напрежение в акумулатора $\Delta U = 1.5V$ при номинален ток на двигателя и напрежение подадено на двигателя от акумулаторната батерия $U_{mot} = U_0 - I_n\, R_{acum} = 12 - 250 \times 0.006 = 10.5V$. Тази стойност съответства на напрежението на двигателя в т.3.

Зависимостта $U_{mot} = U_0 - i\ R_{acum}$ представлява уравнението на външната характеристика на акумулатора, което ще бъде включена по подходящ начин в уравнения (5) и (6).

6.2. ЧИСЛЕНО-ПАРАМЕТРИЧЕН МОДЕЛ НА ПТД-ПВ

В крайна сметка системата уравнения (5) се представя във вида подходящ за числено решаване на задачата:

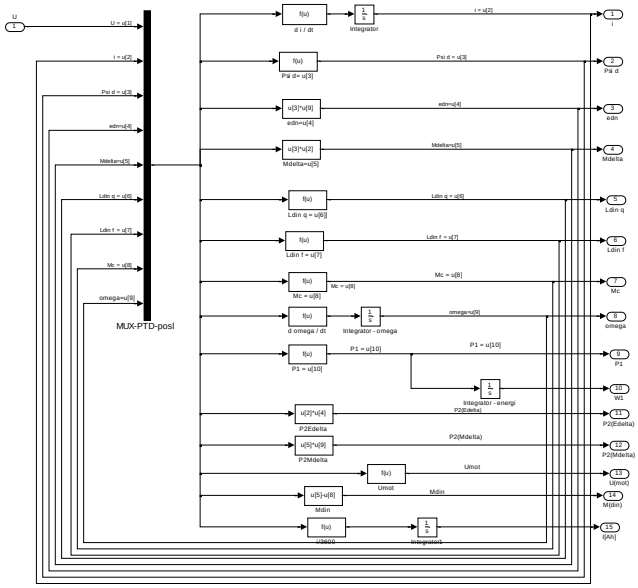
$$\begin{aligned} \frac{d\,i}{d\,t} &= F_1(i, \Omega) \\ \frac{d\,\Omega}{d\,t} &= F_2(i, \Omega) \end{aligned} \tag{9}$$

6.3. ЧИСЛЕНО-ПАРАМЕТРИЧЕН МОДЕЛ НА ПТД-ПМ

Процедурата по създаването му е частен случай на изложеното в т.6.2.

След като се отразят посочените конкретни особености на физическия обект системата уравнения (6) ще добие вид, подобен на този на (9). На фиг.6 е показан общия модел в средата на Matlab/Simulink, с помощта на който се решават

системите диференциални уравнения (9). За тази цел всички съпротивления и коефициенти на итерационните зависимости за потокосцепленията са организирани като входни данни в „маската” на модела на постояннотоковия двигател, които могат да приемат и нулеви стойности, без това да вреди на решението при ПТД-ПМ.



Фиг.6.

7. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА С ЧИСЛЕНО-ПАРАМЕТРИЧНИТЕ МОДЕЛИ В ПУСКОВ РЕЖИМ НА ДВИГАТЕЛИТЕ

Направени са изследвания за пусковия режим на двата вида двигатели - с последователно възбуждане (**ПТД-ПВ**) и този с възбуждане с постоянни магнити (**ПТД-ПМ**) при **дебелина на магнита 3 mm.** За сравнение са направени изследвания при захранване с източник на постоянен ток със зададена падаща външна характеристика – споменавата по-горе акумулаторна батерия и при захранване с източник с неизменно напрежение.

От направените числени изследвания, пример за които е показан на фиг.7 е направено извлечение по необходимите за сравнението показатели показано в табл.1.

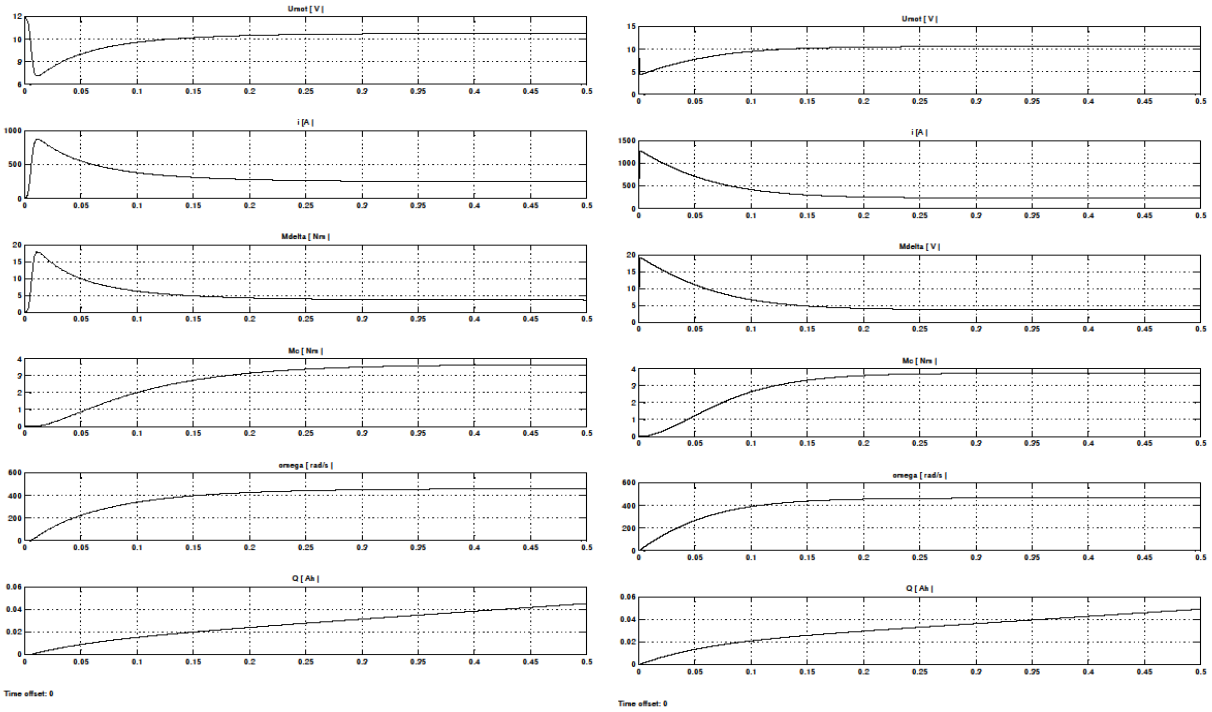
В съответствие с протичането на процесите при включване на двигателя за потребяваното количество електричество може да се запише:

$$Q = \int_0^t i(t)\,dt = \int_0^{t\,p} i(t)\,dt + \int_{t\,p}^t I_{УСТ}\,dt = Q(t_p) + I_{УСТ}\left(t - t_p\right) \qquad (10)$$

където: t_p - времето за протичане на преходния процес; t - обща продължителност на включването.

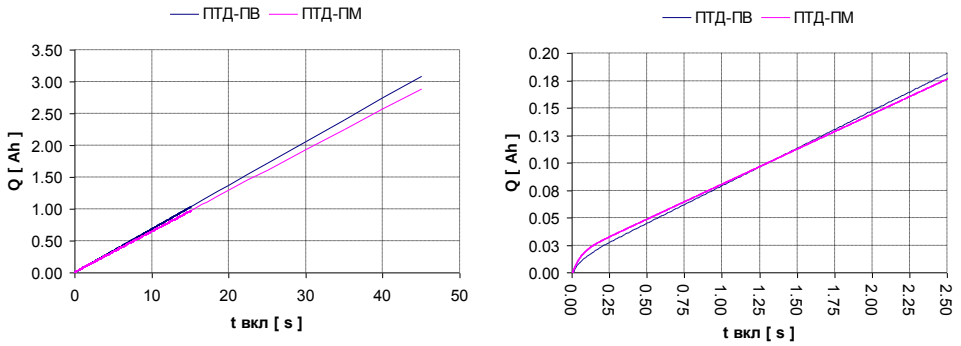
По-големият пусков ударен ток (ред 9 на табл.1) при ПТД-ПМ е причина количеството електричество $Q_{ПМ}$ да е по-голямо от $Q_{ПВ}$ в началният интервал от време - фиг.8. По-бързо протичащия пусков процес (ред 12 на табл.1), както и помалката стойност на тока в установен режим (ред 3 на табл.1), обаче, водят до бърза промяна (след 1.36 s - фиг.8) в съотношението в полза на ПТД-ПМ. Стой-

ностите на времето t_p са получени чрез моделите и са представени на ред 12 на табл.1.



Фиг.7. Осцилограми от числено изследване на ПТД-ПВ (в ляво) и ПТД-ПМ (в дясно)

Поради по-голямата индуктивност във веригата на котвения ток на ПТД-ПВ тези стойности са по-големи от стойностите при ПТД-ПМ. От друга страна при захранване от източник с падаща характеристика (акумулатор) поради падането на напрежението на изводите на двигателя до (ред 11 на табл.1) преходните процеси протичат по-бавно от тези при захранване с неизменно напрежение.



Фиг.8. Изменение на количеството потребявано електричество в зависимост от продължителността на включване. В дясно - увеличен фрагмент в областта на пресечната точка на кривите.

Положителния ефект на замяна на електромагнитната възбудителна система с такава с постоянни магнити се изразява с намаляване на стойността на отношението $Q_{ПМ} / Q_{ПВ}$.

С увеличаване на продължителността на включването, поради намаляване на влиянието на първото събираемо в (10), отношението клони асимптотично към отношението на стойностите на токовете в установен режим участващи във второто събираемо.

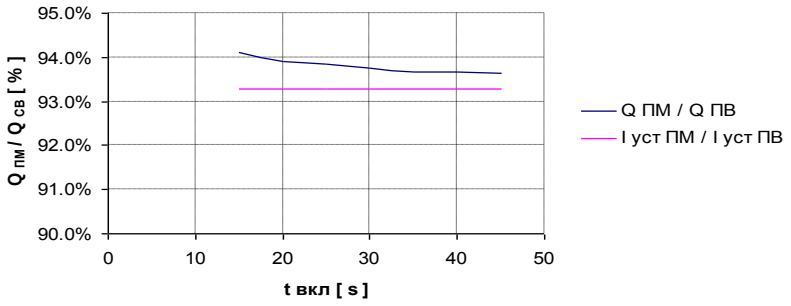
Таблица 1

No по ред	Величина	Изм. ед.	Режим на захранване	ПТД - ПВ	ПТД - ПМ
1	U_0	V	U_{mot} = const.	10.50	10.50
			U_{mot} = var.	12.00	12.00
2	U_{mot} уст.	V	U_{mot} = const.	10.50	10.50
			U_{mot} = var.	10.52	10.62
3	I уст.	A	U_{mot} = const.	245.3	222.7
			U_{mot} = var.	246.4	229.9
4	Ψ_d уст.	Wb	U_{mot} = const.	0.014878	0.016323
			U_{mot} = var.	0.014895	0.016313
5	E уст.	V	U_{mot} = const.	6.82	7.47
			U_{mot} = var.	6.84	7.58
6	Ω уст.	rad/s	U_{mot} = const.	458.2	457.4
			U_{mot} = var.	459.2	464.5
7	M_δ уст.	N m	U_{mot} = const.	3.649	3.636
			U_{mot} = var.	3.670	3.750
8	P_δ уст.	W	U_{mot} = const.	1672.2	1662.9
			U_{mot} = var.	1685.5	1742.2
9	$I_{пуск}$ ударен	A	U_{mot} = const.	1580.2	6560.4
			U_{mot} = var.	876.5	1275.8
10	***$I_{пуск}$ стац.**	***A***	***U_{mot} = const. =10.5 V***	*2096.3*	*6743.1*
11	U_{mot} min	V	U_{mot} = const.	10.50	10.50
			U_{mot} = var.	6.74	4.34
12	t_p	s	U_{mot} = const.	0.816	0.312
			U_{mot} = var.	2.190	0.759

Стойността на това отношение е 93.29% - фиг.9 - и максималната "икономия на ток", която теоритически може да бъде постигната в резултат от замяната на възбудителната система е 100.00% - 93.29% = 6.71%.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените изчислителни резултати дават отговор на поставената задача относно енергийната ефективностт при замяна на възбудителната система на двигател с последователно възбуждане с такава с постоянни магнити. Получената стойност на "икономията" (6.71% - т.7.) само по себе не е голяма, но във всички случаи е съпосочна с изискванията за енергийна ефективност.



Фиг.9.

Тъй-като отпада явнополюсна система с възбудителни намотки от замяната произтичат и други полезни следствия:

- Намалява се обема на машината поради намаляване на радиалните размери на полюсната система. Външния диаметър на тялото е $D = 112\ mm$ при електромагнитно възбуждане и $D = 94\ mm$ при възбуждане с постоянни магнити.
- Намалява се теглото на машината поради отпадане на магнитопровода на полюсите и възбудителните намотки ($\gamma_{Fe} \approx 7.8\ kg/dm^3$; $\gamma_{Cu} \approx 8.7\ kg/dm^3$).

- Първото и второто следствие съчетани с намалената консумация на електроенерхи правят постояннотоковия двигател с възбуждане с постоянни магнити по-подходящ за монтаж върху подвижен състав.
- Облекчава се технологичния процес и се намалява количеството труд и раход на активни материали при изработката на машината с възбуждане с постоянни магнити.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Михов М., П. Накев, М. Сариев, Замяна на възбудителна намотка на постояннотоков двигател с последователно възбуждане с възбуждане с постоянни магнити, Годишник на ТУ София, том 63, кн. 6, 2013г., стр.125-132

[2] Ангелов, А., Д. Димитров, Електрически машини част II", С., Техника, 1988

[3] "Kostov-motors", http://kostov-motors.com

[4] "Pramiz", http://www.pramiz.com/frambgp.html

[5] Божилов Г., М.Михов, А.Иванов, Нелинеен математичен модел на електромеханичните преходни процеси в еднофазен колекторен двигател, базиран на метода на крайните елементи, I част – постоянен ток, Годишник на Техническия Университет-София, т. 52, 2003 г.

[6] Божилов Г.," Преходни процеси и обобщена теория на електрическите машини", С., 2007 г.

Автори: Михо П. Михов, доц. д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mpmi@tu-sofia.bg* ; Емил Х. Рачев, гл. ас. д-р, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *emil_lim@abv.bg* ; Адриан П. Иванов, доц. д-р, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *adrian@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Георги Тодоров

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПСИХОФИЗИЧЕСКИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ЛОКОМОТИВНИТЕ МАШИНИСТИ И ТЯХНОТО ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИТЕ ПРЕВОЗИ С ЕЛЕКТРИЧЕСКА ТЯГА

Иван Лалов, Иван Петров

Резюме: *Голяма част от електрическите локомотиви на държавните и частни превозвачи са предимно с индиректно неавтоматично управление на теглителната сила и скоростта на движение. Това дава възможност да се търсят мерки за подобряване техниката на воденето на влак от локомотивните машинисти при минимален разход на електрическа енергия. От съществено значение при управлението на тяговия подвижен състав е и психологическото състояние на локомотивния машинист. За тази цел е създаден цифров модел на психофизическите показатели на локомотивните машинисти. Резултатите от извършения анализ на 33 локомотивни машинисти от локомотивни депа в градовете София, Горна Оряховица и Пловдив, които са с различна степен на квалификация са представени в настоящия доклад.*
Ключови думи: *железопътен транспорт, електрически локомотиви, енергийна ефективност на превозите*

STUDY OF PSYCHO PHYSICAL INDICATORS OF TRAIN DRIVERS AND THEIR IMPACT ON THE ENERGY EFFICIENCY OF RAIL TRANSPORTATION WITH ELECTRIC TRACTION

Ivan Lalov, Ivan Petrov

Abstract: *Much of the electric locomotives of state and private carriers are primarily indirect non-automatic control of traction force and speed. Essential in the motion control of locomotives is the psychological condition of the train driver. For this purpose it created a digital model of psychophysical indicators of train drivers. The results from the analysis of 33 locomotive drivers from depots in the cities of Sofia, Plovdiv and Gorna Oryahovitsa, which have varying degrees of training, are presented in this report.*
Keywords: *rail transport, electric locomotives, energy efficiency of shipments*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

С нарастването на цените на енергийните ресурсите се налага въвеждане на мероприятия, които да доведат до оптимално потребление на електрическа енер-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

гия в железопътните превози. Голяма част от електрическите локомотиви от държавните и частни превозвачи са предимно с косвено, неавтоматично управление на теглителната сила и скоростта на движение. Това дава възможност да се търсят мерки за подобряване техниката на водене на влака от локомотивните машинисти при минимален разход на електрическа. енергия.

От съществено значение при управлението на тяговият подвижен състав е и психологическото състояние на локомотивния машинист. За тази цел е актуален въпросът за изследването на психофизическите показатели на локомотивните машинисти.

Психологическа оценка на професионалната пригодност и психологически изисквания към машинистите се прави на база изследвания и анализ на психичните качества като сила и равновесие на възбудно-задържащите процеси. Тяхната балансирана сила и амплитуда обуславят издръжливост в тежки и стресови ситуации ,такива хора запазват хладнокръвие,не губят волевия си автоконтрол. Да преобладава задържането над възбуждането означава инертен, муден машинист. Такъв в критична ситуация (при произшествия е винаги критична) може да „блокира" напълно, вместо да предприеме веднага енергетични, бързи и точни действия за избягване на катастрофата. Добрият машинист е силно реактивен, подвижен типологически; той е с добра сензорно-моторна координация съсредоточен и нервно въздържан, издръжлив. Неподходящ е избухливия, импулсивния тип. Интересно е влиянието на трудовия стаж; в началото няма автоматизация на действията и движенията; с натрупването на опит до определена степен ефектът от автоматизма е положителен-повишава се самоконтрола, бдителността. На известно ниво автоматизмът причинява практически загуба на бдителност-например несъзнателно, рефлекторно натискане на педала. Машинистът трябва са е емоционално стабилен, дисциплиниран, да има развити чувство за отговорност и самодисциплина.

Психологическата годност на персонала, който осъществява железопътните превози на пътници и товари и съпътстващите ги дейности, се регламентира от Наредба 54 от 2003 г. [1, 6].

Сегашните условия на многократно завишен психо-емоционален стрес предизвикват социално-психологически промени в начина на живот и изискват прецизиране на психологическата експертиза за прогнозиране на пригодността на локомотивните машинисти с оглед повишените европейски изисквания към безопасността на движението (превоза на пътници и товари) в железопътния транспорт.

Определеният досега срок за психологическа годност не дава възможност за ранно откриване на настъпили промени - в познавателната, емоционалната и поведенческата сфери, както и симптоми като неадекватно и рисково поведение, лоша преценка, насилие, самонараняване, нетрудоспособност. По-кратките срокове на психологическите изследвания могат да улеснят проследяването на вредни навици, свързани с прекомерна употреба на алкохол и други психоактивни вещества, които са сред най-достъпните начини за справяне с дистреса и

хроничния стрес, но и са един от най-рисковите фактори, определящи професионалното поведение на персонала.

2. ПСИХОФИЗИЧЕСКИ ПОКАЗАТЕЛИ

Понятието психомоторика е комплексно и покрива една много широка област, тъй като може да се каже, че „всяко движение е психомоторно от момента, в който надминава рефлекторното действие, защото всяко движение е израз на желание, чувство, емоция, воля“ [3,4]. При психомоториката основни се явяват:

- **Способност за логическо и образно пространствено мислене**.
- **Анализ по сфери на психологическата структура на личността** – По отношение на когнитивната (познавателната) сфера и отражението й върху психосензориката (точност и бързина на възприятията), устойчивост на вниманието, оперативна памет и оперативно мислене.
- **Личностните особености**.
  - нормална, средна склонност към поемане на допустими рискови решения в сложни ситуации.
  - екстравертно ориентирани – т.е. добри лидери, способни да поемат отговорност и да се грижат за собствената и на колега безопасност.
  - амбивертно ориентирани т.е. гореспоменатите особености са в посредни нива

3. ЧИСЛЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ПСИХОФИЗИЧЕСКИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Целта на изследването на психофизическите фактори е определяне на влиянието на психофизическите показатели върху техника на водене на влак от локомотивните машинисти. Това ще даде възможност чрез многовариантни решения за търсене на възможности за подобряване на енергийната ефективност при управление на неавтоматично косвено управление от локомотивния машинист.

Психофизическите показатели се състоят от количествени и качествени показатели. Тук ще разгледаме една от групите статистически методи, чрез които се изследват връзки и зависимости между отделните въпроси (променливи). Какъв статистически метод ще се използва за изследване на дадена зависимост най-много зависи от типа на променливите, представящи зависимостта – дали са качествени или количествени и върху коя скала са представени – номинална, ординална или интервална (относителна). Обикновено едната променлива се разглежда като фактор по отношение на другата променлива, която пък се нарича резултат. Факторните променливи могат да бъдат и повече от една. Те се наричат още независими променливи, а резултативната променлива – зависима.

Регресионният анализ е статистически метод за изследване на зависимости, при който и факторните променливи, и резултативната променлива са количествени и са измерени на следните скали – интервална и относителна. За да се разбере каква е връзката между две променливи се използват корелационни коефициенти. Най-често за целта се изчислява обикновен корелационен коефициент, известен още като коефициент на Пирсън-Браве. Той има вида [2]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \bar{Y}\right).\left(X_i - \bar{X}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \bar{Y}\right)^2 \sum_{i=1}^{n} \left(X_i - \bar{X}\right)^2}} \qquad (1)$$

където:

R е коефициента на корелация;

$\boldsymbol{X_i}$, $\boldsymbol{Y_i}$ – измерени стойности на променливите;

$\bar{X}$, $\bar{Y}$ – средни стойности на променливите, определени на база ***n*** измервания.

Корелационният коефициент ***R*** може да приема стойности в интервала от -1 до +1. Когато е отрицателен, зависимостта между двете променливи е обратна (разнопосочна) - с увеличаване стойностите на едната променлива намалява другата. Когато е положителен, зависимостта между променливите е права (еднопосочна) - с увеличаване на едната се увеличава и другата или обратно - когато едната намалява, намалява и другата. Колкото стойността на коефициента е по - близка до -1 или +1, толкова е по-силна връзката между променливите. Колкото е по-близко до нулата, толкова връзката е по-слаба. Условно се приема, че когато коефициентът е в граници от 0 до 0.3, връзката е слаба, от 0.3 до 0.7 - средна, и над 0.7 - силна. Това важи и в двете посоки за положителни и отрицателни стойности.

Таблица 2

ПРОМЕНЛИВА ВЕЛИЧИНА	ФИЗИЧЕСКИ И ПСИХОФИЗИЧЕСКИ ФАКТОРИ
X1	Производствен стаж като машинист
X2	Степен на образование
X3	Интелект
X4	Когнитивни качества
X5	Психомоторика
X6	Склоност към риск
X7	Тип на характера
X8	Неуравновесеност

Чрез метода на единичната линейна корелация е измерена връзката между физико-психологичните фактори и енергийната ефективност при управлението на локомотива. Всеки един фактор е формализиран чрез няколко конкретни показатели. Установени са измерителят на корелационната връзка - коефициент на корелация - **R** и коефициент на детерминация (определение) - **R^2.** В табл.1 и табл.2. са отразени и в текста се анализират само проверени статистически значими коефициенти.

Тези изчисления дават възможност да се установи най-важните физическо – психологични показатели, влияещи върху консумацията на електроенергия. С оглед възможността за съставяне на матрицата от данни и според изложените статистически данни са изследвани следните фактори: Производствен стаж като машинист; Степен на образование; Интелект; Когнитивни качества; Психомоторика; Склоност към риск; Тип на характера; Неуравновесеност.
В табл.1 са показани изследваните променливи величини спрямо зависимата променлива - енергийна ефективност при управление на локомотива.

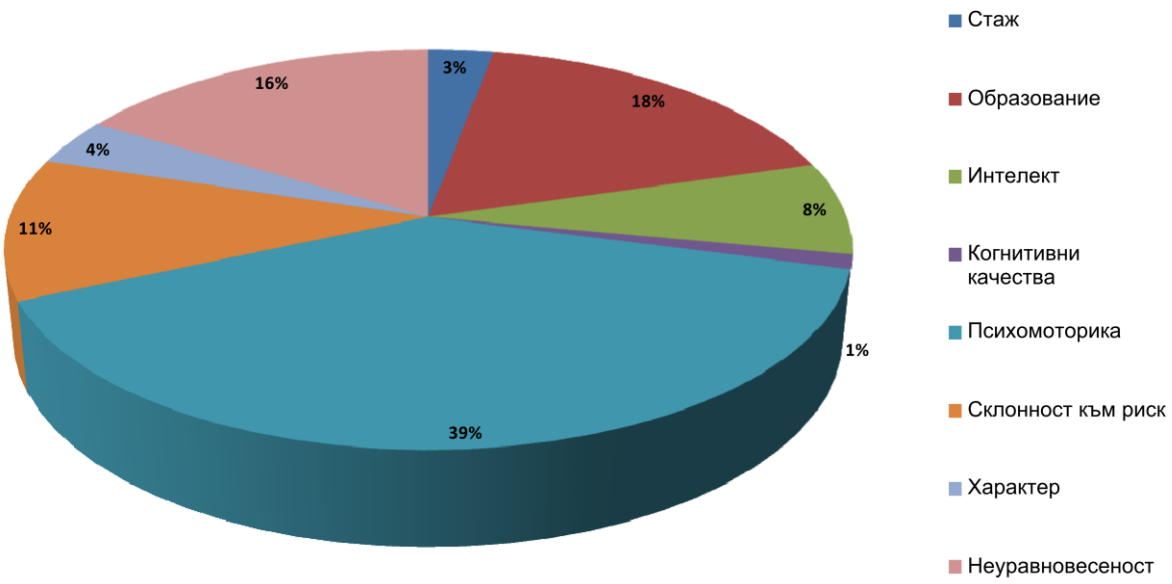
4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

В табл.2 са показани резултатите от регресионен анализ на психо-физически фактори. В него са изследвани 33 локомотивни машинисти [5] от локомотивни депа София, Горна Оряховица и Пловдив, които са с различна степен на квалификация и различен трудов стаж. Определени са в психо-физическа лаборатория техните психични показатели и е измерена електрическата енергия на експлоатираните от тях локомотиви. От табл.2 се вижда, че най същественото влияние върху разхода на електрическа енергия е психомоториката. Най-нисък показател е когнитивните качества на машиниста. Степента на образование също влияе сериозно върху намаляване на разхода на енергия.

Таблица 2

Резултати от регресионен анализ на психо-физически фактори

ПРОМЕНЛИВА ВЕЛИЧНИНА	ФИЗИЧЕСКИ – ПСИХОЛОГИЧЕСКИ ФАКТОРИ	R / КОЕФИЦИЕНТ НА КОРЕЛАЦИЯ	R SQUARE / КОЕФИЦИЕНТ НА ДЕТЕРМИНАЦИЯ	ADJUSTED R SQUARE	ПРОЦЕНТ НА ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ОТНОСИТЕЛНИЯ РАЗХОД НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ
x5	ПСИХОМОТОРИКА	0,492	0,242	0,208	-39,0%
x2	СТЕПЕН НА ОБРАЗОВАНИЕ	0,221	0,049	0,013	-18,0%
x8	НЕУРАВНОВЕСЕНОСТ	0,206	0,042	0,007	-16,0%
x6	СКЛОННОСТ КЪМ РИСК	0,144	0,021	-0,016	-11,0 %
x4	ИНТЕЛЕКТ	0,094	0,009	-0,028	-6,0%
x7	ТИП НА ХАРАКТЕРА	0,047	0,002	-0,035	+4,0%
x1	ПРОИЗВОДСТВЕН СТАЖ КАТО МАШИНИСТ	0,037	0,001	-0,036	-3,0%
x3	КОГНИТИВНИ КАЧЕСТВА	0,014	0,000	-0,037	-1,0%



Фиг.1. Диаграма с процентното съотношение на влиянието на различните фактори.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направеното изследване върху влиянието на психофизичните качества на локомотивните машинисти могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

- Минимален относителен разход на електрическа енергия се получава при трудов стаж като локомотивни машинисти около 25 години.
- Първоначалният разход на енергия е висок, тъй като е свързан с първоначално натрупване на знания по отношение профила на пътя, наклона, параметри на подвижния състав и др.
- С увеличаване на трудовия стаж (над 25 год.) намаляват реакциите на машиниста, което води неминуемо до повишаване на разхода на енергия.
- Повишаването на образователно-квалификационната степен влияе положително върху намаляването на относителния разход на електрическа енергия.
- Необходимост от изготвяне на методика за обучение на локомотивните машинисти с локомотивен симулатор.
- При използване на локомотиви с индиректно неавтоматично управление има съществен запас за намаляване на разхода на енергия и подобряване на енергийната ефективност.
- Повишаването на квалификацията на локомотивните машинисти може да доведе до намаляване на разхода на електрическа енергия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ***НАРЕДБА № 54 от 02.06.2003 г. за медицинските и психологическите изисквания към персонала, който осъществява железопътни превози на пътници и товари и съпътстващите ги дейности, и за провеждане на предпътните (предсменни) медицински прегледи***, Издадена от министъра на транспорта и съобщенията, обн., ДВ, бр. 55 от 17.06.2003 г., доп. ДВ, бр. 102 от 22.12.2009 г.

[2] Съкова Иб., ***Статистически анализ на връзки и зависимости***, София, Наука и изкуство, 1981 г.

[3] *Айзенк Х.*, ***Модел за личност***, София, Наука и изкуство, 1987.

[4] Кокошкарова А., ***Психологично изследване на личността в клиничната практика***, София, 1984 г.

[5] Петров И., ***Влияние на психологичното състояние на локомотивните машинисти за подобряване енергийната ефективност на електрическия подвижен състав***, Годишник на технически университет - София, том 64, кн.3, 2014 г.

[6] Михалкова Ст., ***Психологическо освидетелстване на локомотивни машинисти с оглед специфичните изисквания при съвременните условия на труд*** - доклад за МТ, 1985 г.

Автори: Иван Георгиев Лалов, инженер, докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков", E-mail address: *ilalov@abv.bg;* Иван Петров Петров, доцент д-р, инженер, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков", E-mail address: *ivanpetrov60@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл. ас. д-р Тодор Йонов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПУЛСАЦИИТЕ НА МОМЕНТА НА СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ВЪЗБУЖДАНЕ ОТ ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Георги Тодоров, Божидар Стоев

Резюме: *В работата е представен анализ на пулсациите на електромагнитния момент при работата на двигатели с възбуждане от постоянни магнити. Анализът е направен за две от най-разпространените конструкции на роторите, при различна мощност и брой полюси. В работата е представена методика за определянето на пулсациите, базирана на анализ по МКЕ и трансформации на координатни системи по метода на Парк. Илюстрирано е влиянието на разпределението на магнитната индукция във въздушната междина върху пулсациите на разгледаните двигатели.*
Ключови думи: *МКЕ, синхронни двигатели с постоянни магнити, трансформации на Парк, пулсации на електромагнитния момент*

ANALYSIS OF TORQUE RIPPLES OF PERMANENT MAGNET EXITED SYNCHRONOUS MOTORS

George Todorov, Bozhidar Stoev

Abstract: *The work presents an analysis of the torque ripples of permanent magnet synchronous motors. The analysis is carried out for two of the most commonly used rotor configurations with different output power and number of pole pairs. An approach for determining the torque ripples, based on Finite Element Analysis and Park transformations, is presented in the work. The effect of the air gap flux density distribution on the torque ripples is illustrated.*
Keywords: *FEA, permanent magnet synchronous motors, Park transformations, torque ripple*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Синхронните двигатели с постоянни магнити се характеризират с висока ефективност, голяма мощност за единица обем и възможност за прецизно управление в широк диапазон. С повишаването на изискванията за енергийна ефективност този тип двигатели биват предпочитани при изграждането на високоефективни и прецизни електрозадвижвания. Това от своя страна завишава изискванията по отношение на стабилната, плавна и безшумна работа на задвижващата машина.

Една от причините за възникване на пулсации на момента е формата на кривата на индукцията във въздушната междина и на електродвижещото напрежение

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

(е.д.н.). Наличието на отвори на каналите на статора и насищането на зъбите от потока на постоянните магнити деформират кривата и влошават хармоничния ѝ състав [1, 2, 3]. Наличието на хармоници в кривата на индукцията обуславя допълнителни електромагнитни моменти, освен този създаден от основния хармоник на индукцията. Именно тези допълнителни моменти се наслагват към основния и причиняват пулсации в кривата на момента. Тези пулсации са причина за вибрации, които влошават работата на електродвигателя, както и работата на системата, в която той е вграден.

В [4] е представена методика за определяне на пулсациите на момента за ротори с повърхностно разположение на магнитите, но е пренебрегнато насищането на магнитната верига и разликата в магнитната проводимост по осите d и q, поради неявнополюсния характер на разгледаната конструкция. При роторите с магнити разположени във вътрешността на ротора се наблюдава ясно изразена явнополюсност, което променя вида на магнитната верига.

В настоящата работа е представен анализ на разпределението на кривите на магнитната индукция и влиянието им върху амплитудата на пулсациите на електромагнитния момент на електродвигатели с постоянни магнити разположени вътре в ротора. Използването на метода на крайните елементи (МКЕ) позволява да се анализират конструкциите с достатъчна точност като се отчетат характеристиките на използваните материали, разликата в проводимостите по осите d и q, както и коректно отчитане на насищането на магнитната верига.

2. КОНСТРУКЦИИ НА АНАЛИЗИРАНИТЕ ДВИГАТЕЛИ

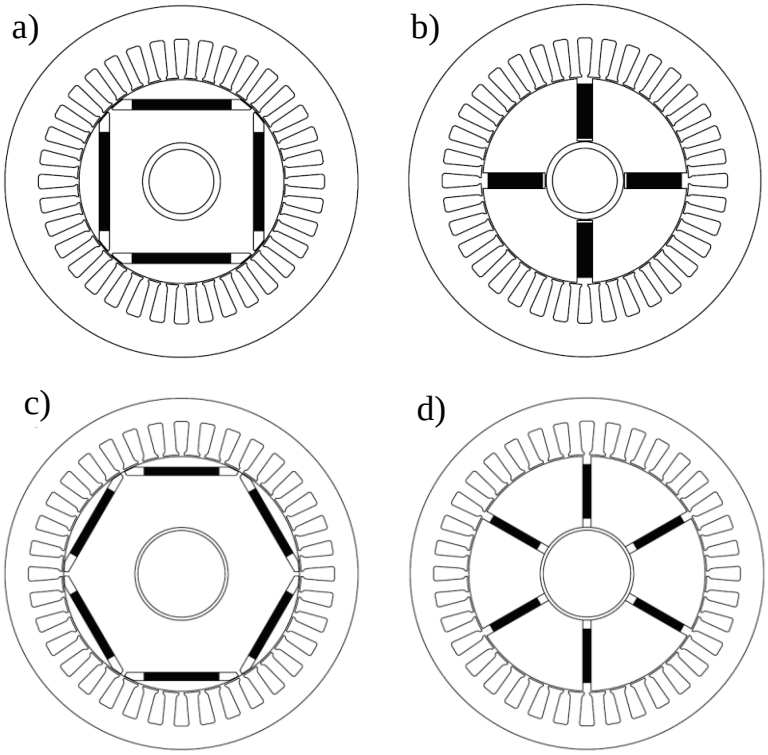
Обект на анализ в настоящата работа са две от най-разпространените конструкции на роторите на двигателите с възбуждане от постоянни магнити разположени във вътрешността на ротора - с радиално разположени магнити и тангенциално разположени магнити. Напречната геометрия на изследваните обекти е показана на фиг.1. Изследваните двигатели са с мощности 1,5 kW с 2p=4 (фиг.1.a и фиг.1.b) и 2,2 kW с 2p=6 (фиг.1.c и фиг.1.d)).

За възбуждане на изследваните двигатели са използвани редкоземни постоянни магнити NdFeB със следните характеристики: остатъчна индукция $Br = 1{,}05T$ и коерцитивен интензитет $Hc = 764\,kA/m$.

3. НОМИНАЛНА РАБОТНА ТОЧКА

За изследване на електромагнитния момент на електродвигателите за всеки от тях е построен модел в средата на програмния продукт FEMM, който позволява конструкцията да бъде анализирана по метода на крайните елементи. Номиналната точка, съответстваща на работа със зададената мощност, е определена като са използвани координатна система фиксирана към ротора (d-q координатна система), координатна система фиксирана към статора (x-y координатна система) и трансформации на Парк.

Определят се и се задават фазните стойности на токовете при допускането за синусоидално разпределение с начална стойност на разглеждания момент от време, в който токът във фаза A преминава през максимум:



Фиг.1. *Анализирани конструкции.*

$$i_A = I_1.\sqrt{2}.\cos\omega t \tag{1}$$

$$i_B = I_1.\sqrt{2}.\cos(\omega t - 120) \tag{2}$$

$$i_C = I_1.\sqrt{2}.\cos(\omega t - 240) \tag{3}$$

Определят се фазните стойности на потокосцепленията [5]:

$$\Psi = W_C.\frac{l_m}{S_z}\left(\int_{S_{z+}} A.dS - \int_{S_{z-}} A.dS\right) \tag{4}$$

където W_C е броят навивки на секция на разглежданата фаза, l_m е дължината на активната страна на секцията на фазата, S_z е сечението на статорния канал зает от проводниците на секцията, а A_+ и A_- са стойностите на магнитния вектор потенциал за положителните и отрицателните активни страни на секциите. Съставките на статорния ток и потокосцепление в d-q координатната система се определят по зависимостите:

$$i_d = \frac{2}{3}[i_A.\cos(\theta_r) + i_B.\cos(\theta_r - 120) + i_C.\cos(\theta_r - 240)] \tag{5}$$

$$i_q = -\frac{2}{3}[i_A.\sin(\theta_r) + i_B.\sin(\theta_r - 120) + i_C.\sin(\theta_r - 240)] \tag{6}$$

$$\Psi_d = \frac{2}{3}[\Psi_A.\cos(\theta_r) + \Psi_B.\cos(\theta_r - 120) + \Psi_C.\cos(\theta_r - 240)] \tag{7}$$

$$\Psi_q = -\frac{2}{3}[\Psi_A.\sin(\theta_r) + \Psi_B.\sin(\theta_r - 120) + \Psi_C.\sin(\theta_r - 240)] \tag{8}$$

При известни стойности на надлъжните и напречните съставки на тока и потокосцеплението се определят синхронните индуктивности и реактанси:

$$L_d = \frac{(\Psi_d - \Psi_{PM})}{i_d} \tag{9}$$

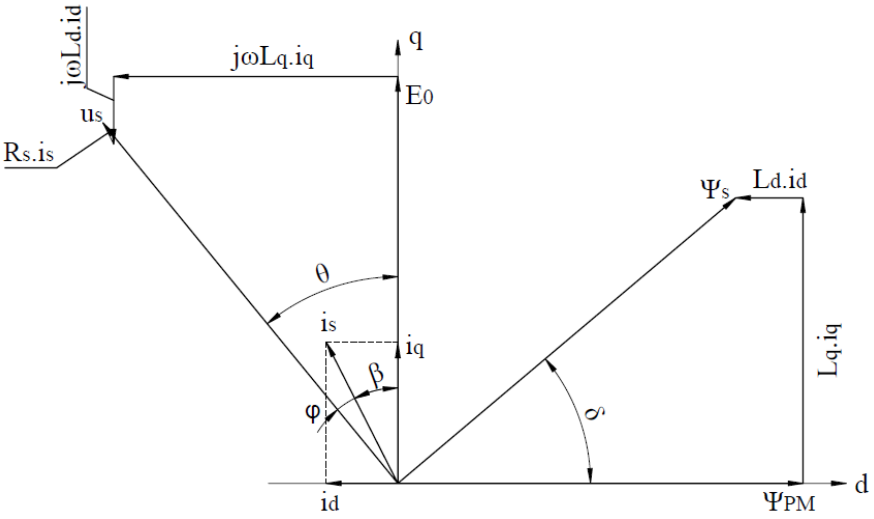
$$L_q = \frac{\Psi_q}{i_q} \tag{10}$$

$$x_d = \omega_1 . L_d \tag{11}$$

$$x_q = \omega_1 . L_q \tag{12}$$

където Ψ_{PM} е потокосцеплението на намотките от потока на постоянните магнити.

С така определените индуктивности и реактанси се построява векторната диаграма, показана на фиг.2 [6].



Фиг.2. *Векторна диаграма на синхронен двигател с постоянни магнити.*

Ъгъл β е фазовият ъгъл на тока и определя положението на изобразяващия вектор на тока спрямо оста q в d-q координатната система. Намирането на работната точка на двигателя е итеративен процес, при който се търси такава стойност на ъгъла β, при който се уравновесява захранващото напрежение:

$$u_S = E_0 + j\omega . L_d \cdot i_d + j\omega . L_q \cdot i_q + R_S \cdot i_S \tag{13}$$

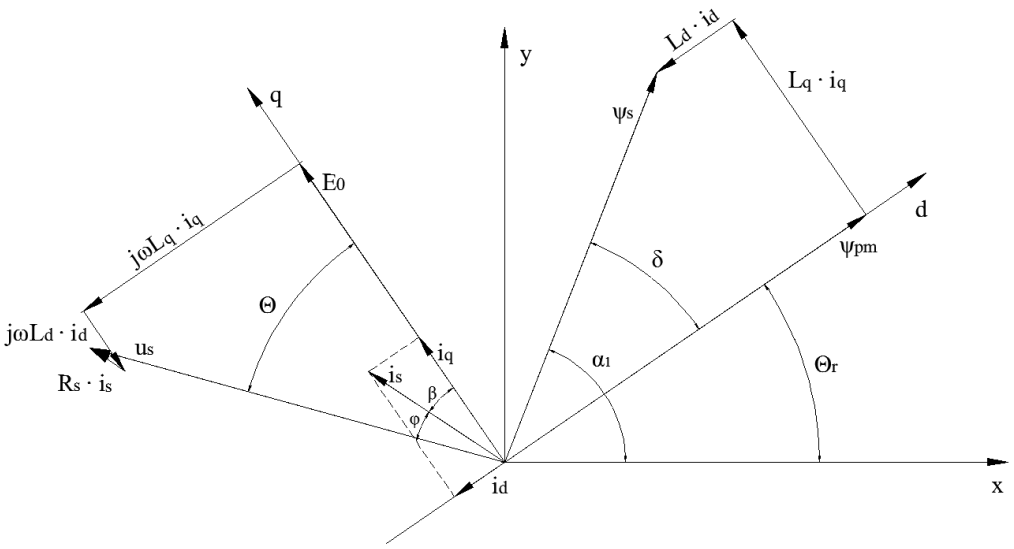
При установен баланс на напрежението се изчислява стойността на номиналния електромагнитен момент по зависимостта:

$$T_e = \frac{3}{2} p[(\Psi_d \cdot i_q) - (\Psi_q \cdot i_d)] \tag{14}$$

При равномерна въздушна междина и синусоидално разпределение на магнитната индукция във въздушната междина моментът има постоянна стойност. Поради назъбването на повърхността на статора магнитната проводимост на въздушната междина е неравномерна, а поради насищането на магнитната верига, разпределението на индукцията се различава от синусоидалното и това води до възникване на пулсации на електромагнитния момент.

4. ПУЛСАЦИИ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИЯ МОМЕНТ

За да бъдат определени пулсациите на момента, трябва да се моделира въртенето на ротора при номинален режим на работа на машината [5, 6]. Това отговаря на завъртане на роторната координатна система спрямо неподвижната статорна координатна система на определен ъгъл - фиг.3.



Фиг.3. *Ъглова зависимост между статорната и роторната координатна система.*

За всяко едно ъглово положение на ротора трябва да се намери зависимост между въртящата се роторна координатна система и неподвижната статорна координатна система. Ъгълът на отместване между роторната и статорната координатни системи е θ_r^o (ел. градуси), което отговаря на θ_r^o / p (мех. градуси) завъртане на ротора. При завъртането на осите на роторната система спрямо тези на статорната, всички вектори от векторната диаграма се завъртат на същия ъгъл θ_r^o. Директното преобразуване на векторите от роторната в статорната координатна система и обратно се осъществява чрез ъгъла θ_r :

$$i_s^s = i_s^r . e^{j\theta_r} \tag{15}$$

$$\Psi_s^s = \Psi_s^r . e^{j\theta_r} \tag{16}$$

$$u_s^s = u_s^r . e^{j\theta_r} \tag{17}$$

Всички вектори трябва да се разделят на техните съставки спрямо неподвижната координатна система по следния начин:

$$u_s^r = u_d + j u_q \tag{18}$$

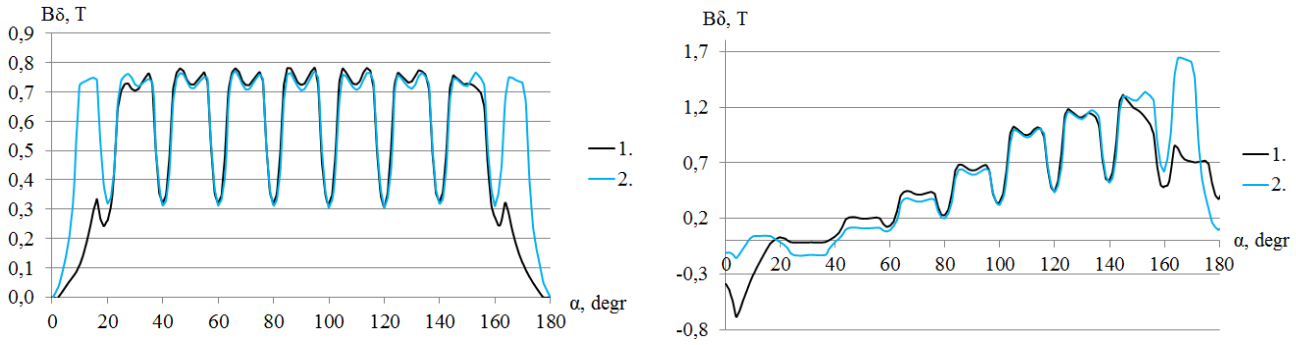
$$i_s^r = i_d + j i_q \tag{19}$$

$$\Psi_s^r = \Psi_d + j \Psi_q \tag{20}$$

след което трябва да бъдат заместени в уравнение (14) и да се изчисли стойността на електромагнитния момент за всяко ъглово положение на ротора.

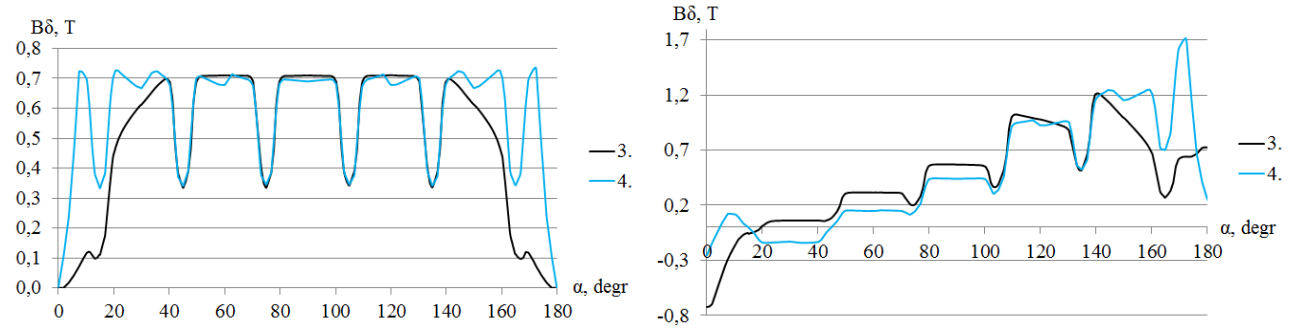
5. РЕЗУЛТАТИ

Разпределението на магнитната индукция за едно полюсно деление без ток в статорната намотка и при номинално натоварване е показано на фиг.4 и фиг.5.



а) ***б)***

Фиг.4. *Разпределение на магнитната индукция - 1,5 kW, 2p=4: а) без ток в статорната намотка; б) номинално натоварване*



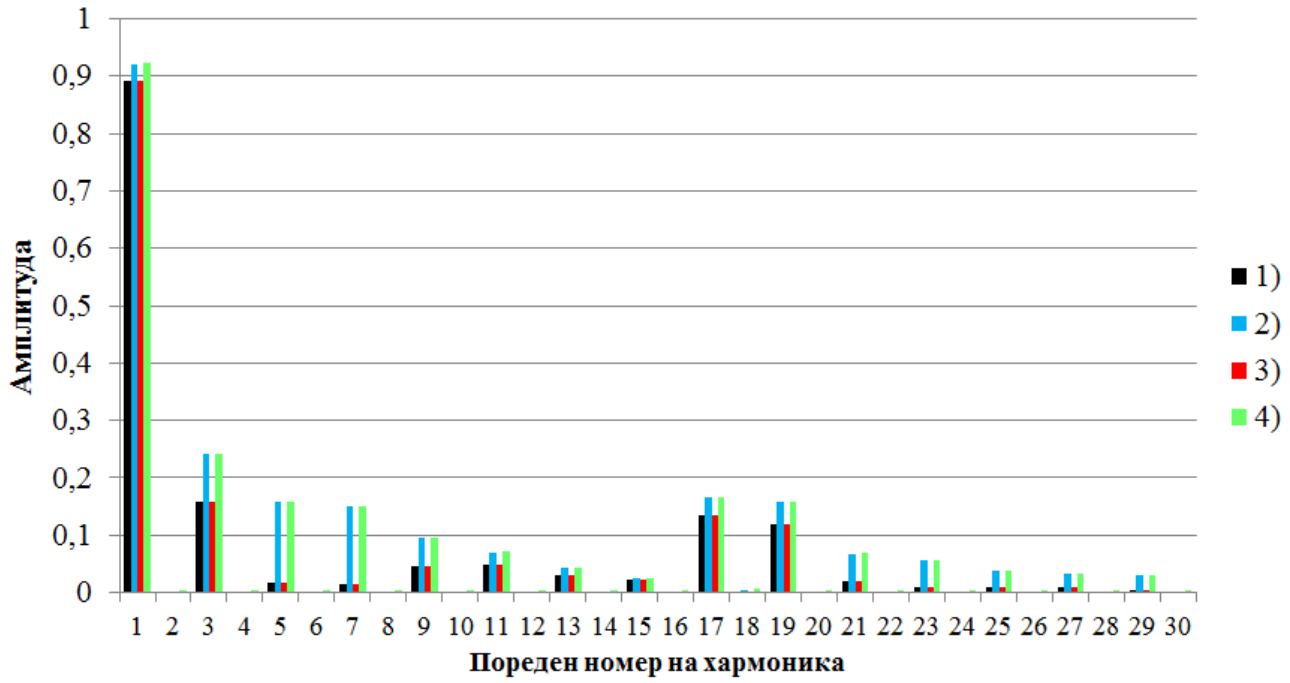
а) ***б)***

Фиг.5. *Разпределение на магнитната индукция – 2,2 kW, 2p=6: а) без ток в статорната намотка; б) номинално натоварване*

От полученото разпределение на индукцията ясно се виждат провалите причинени от отворите на каналите на статора. Освен това формата на индукцията на машините с тангенциално разположение на магнитите е по-близка до синусоидалната (фиг.4 крива 1 а) и фиг.5 крива 3 а)), докато при машините с радиално разположение на магнитите кривата има трапецовиден характер.

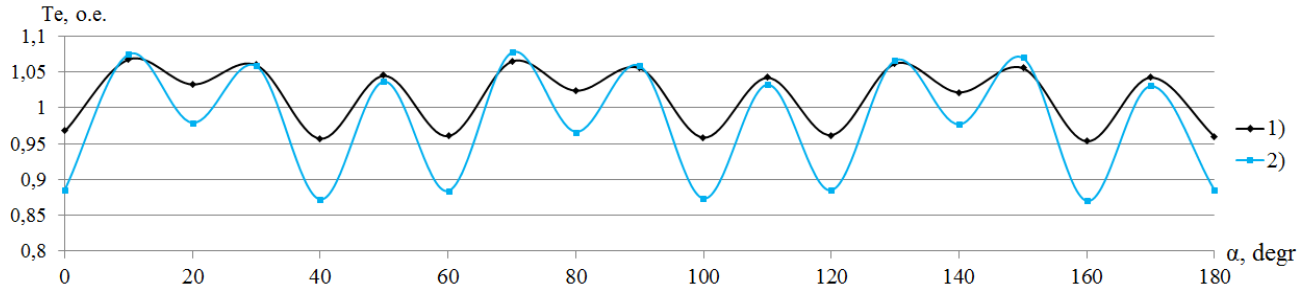
На кривите на индукцията при номинално натоварване е направен хармоничен анализ с цел по-ясно илюстриране на влиянието на неравномерността на въздушната междина и конструкцията върху формата на индукцията и пулсациите на момента. Хармоничният състав на кривите е показан на фиг.6.

Резултатите от анализа показват голямо съдържание на хармоници с ясно изразени амплитуди в кривата на индукцията на машините с радиално разположени магнити. При тази конструкция магнитният поток на едноименните полюси на два съседни магнита се концентрира през полюсното деление и увеличава насищането на магнитната верига, особено в зъбите на статора.

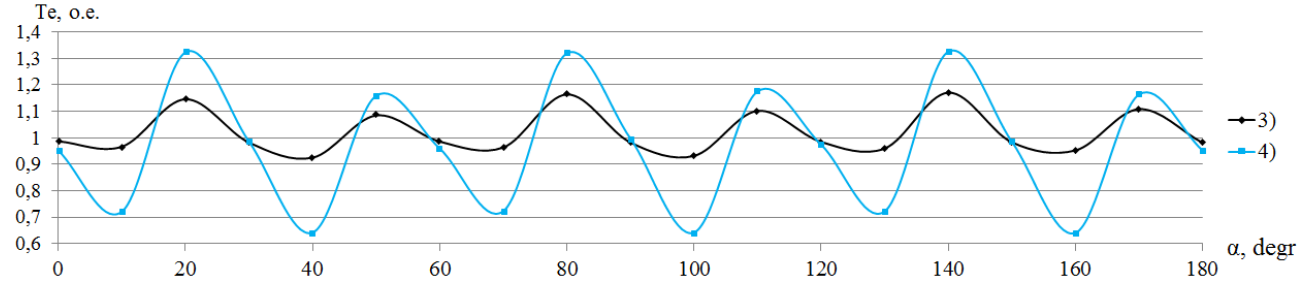


Фиг.6. *Хармоничен състав на кривите на индукцията.*

Получените пулсации на електромагнитния момент са показани на фиг.7 и фиг.8. Резултатите са показани за едно полюсно деление, при завъртане на ротора със стъпка $\Delta\theta_r = 10^0$ градуса (ел.). Снетите стойности на момента са представени в относителни единици.



Фиг.7. *Пулсации на електромагнитния момент – 1,5 kW, 2p=4*



Фиг.8. *Пулсации на електромагнитния момент – 2,2 kW, 2p=6*

Пулсациите на момента имат по-малки амплитуди при конструкцията с тангенциално разположение на магнитите поради по-малкото съдържание на висши хармоници в магнитния поток. Това предпоставя стабилна работа на двигателите, с по-малки вибрации и шум в целия диапазон на натоварване и регулиране на скоростта.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Големите амплитуди на пулсациите на момента са причина за силни вибрации и шум, което влошава нормалната работа на електродвигателя, както и работата на системата в която той е вграден. Минимизирането на тези пулсации още в процеса на проектирането на двигателя е от особена важност. Използването на МКЕ съвместно с векторните диаграми и трансформациите на Парк позволява достатъчно точно да бъдат моделирани и анализирани различни конструкции на СДПМ и да бъдат взети мерки за отстраняване на нежелани явления и подобряване на работата им.

Конструкцията на ротора оказа съществено влияние върху вида на индукцията във въздушната междина, а от там върху характера и големината на пулсациите на момента. Внимателен подбор на размерите и характеристиките на постоянните магнити и разположението им в ротора в процеса на проектиране може да подобри работата на машината. Всяка конструкция трябва да бъде индивидуално анализирана, за да се предприемат най-ефективните мерки за намаляване на пулсациите на момента.

Намаляването на пулсациите допълнително може да бъде осъществено чрез скосяването на статорните канали, скосяването на магнитите в ротора, изработване на роторните полюси с неравномерна въздушна междина или използване на феромагнитни клинове за затваряне на каналите.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Chang-Hyun Cho, Chang-Sung Jin, ***A comparative analysis of two kinds of poles for washing machines PMSM with the same torque and output power***, International Conference on Electrical Machines and Systems ICEM 2008, Wuhan, China, 17-20 Oct. 2008, pp. 3099-3101.

[2] Islam, R., Husain, I. , ***Permanent magnet synchronous motor magnet design with skewing for torque ripple and cogging torque reduction,*** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 45, No. 1, January/February 2009, pp. 1552-1559.

[3] Seok-Hee Han, Jahns, T.M., ***Torque ripple reduction in interior permanent magnet synchronous machines using the principle of mutual harmonic exclusion,*** Conference Record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference, 23-27 Sept. 2007, pp. 558-565.

[4] J. R. B. A. Monteiro, A. A. Oliveira Jr., ***Electromagnetic torque ripple and copper losses reduction in permanent magnet synchronous machines,*** European Transactions on Electrical Power, Published online in Wiley Online Library (*wileyonlinelibrary.com*).

[5] Ризов, П., Р.Спасов, Ц. Стоянов, В. Захариев, ***Определяне на зависимостта на потокосцепленията от натоварването при синхронни машини с постоянни магнити за хибридни автомобили***, VI Научна конференция ЕФ2014 – Созопол 15.09.2014-17.09 2014, Том 64, книга 4, стр. 97-105.

[6] Pyrhonen, J., T. Jokinen, V. Hrabovcová, ***Design of Rotating Electrical Machines***, 2014 John Wiley & Sons, Ltd, ISBN 978-1-118-58157-5.

Автори: Георги Тодоров, доц. д-р инж., катедра "Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *gtto@tu-sofia.bg*; Божидар Стоев, маг. инж. докторант, катедра "Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, Email adress: *bdst@tu-sofiq.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. дтн Ганчо Божилов

ВЛИЯНИЕ НА ШИРИНАТА НА ФЕРОМАГНИТНОТО РЕБРО ВЪРХУ ПАРАМЕТРИТЕ И ПУЛСАЦИИТЕ НА МОМЕНТА НА СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ВЪЗБУЖДАНЕ ОТ ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Георги Тодоров, Божидар Стоев

Резюме: *В работата е анализирано влиянието на ширината на феромагнитното ребро върху параметрите и работата на синхронен двигател с възбуждане от постоянни магнити разположени вътре в ротора. Анализът е проведен при незахранена статорна намотка и при номинален режим на работа. С използване на метода на крайните елементи, векторни диаграми и трансформации на координатни системи по метода на Парк е отчетено изменението на параметрите при различни ширини на реброто и влиянието върху пулсациите на електромагнитния момент при работа на електродвигателя*
Ключови думи: *феромагнитно ребро, МКЕ, трансформации на Парк, пулсации на момента*

INFLUENCE OF FERROMAGNETIC RIB WIDTH ON THE PARAMETERS AND TORQUE RIPPLE OF INTERIOR PERMANENT MAGNET MOTORS

George Todorov, Bozhidar Stoev

Abstract: *The current work presents an analysis of the influence of the ferromagnetic rib width on the parameters and torque ripple of interior permanent magnet motor. The analysis is carried out in two modes - for unexcited stator winding and for rated load. The influence of the rib width on the motor parameters and torque ripple is illustrated with the use of Finite Element Analysis, space vector diagrams and Park transformations.*
Keywords: *ferromagnetic rib, FEA, Park transformations, torque ripple*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Синхронните електродвигатели с възбуждане от постоянни магнити притежават редица качества, които ги превръщат в предпочитана алтернатива на асинхронните двигатели. Големият момент за единица обем, високата стойност на коефициента на полезно действие и фактора на мощността, както и възможността за прецизно управление са причината тези двигатели да са предпочитани в изграждането на високоефективни задвижващи системи.

Двигателите с постоянни магнити вградени в ротора проявяват явнополюсен характер, подобно на класическите явнополюсни машини с електромагнитно

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

възбуждане. При разполагане на магнитите вътре в ротора те са изцяло обградени от феромагнитен материал, при което част от магнитния поток на магнитите се шунтира в ротора. Тази част от потока не преминава през въздушната междина, не се сцепва с навивките на статора и не участва в образуването на електромагнитния момент на машината [1]. Това предполага използване на по-голямо количество магнитен материал за достигане на желаната стойност на потока и момента.

За да се използва ефективно потока на постоянните магнити, без да се налага увеличаването на количеството магнитен материал, около тях се изработват въздушни бариери за ограничаване на разсейването в ротора. Феромагнитният материал между въздушната бариера и повърхността на ротора (феромагнитен мост) и феромагнитният участък в междуполюсното пространство (феромагнитно ребро) усложняват еквивалентната магнитна верига. Обикновено тези феромагнитните участъци се изработват с малки размери за по-бързото им насищане и ограничаване на потоците на разсейване през тях. В [2,3,4] е анализирано влиянието на формата на въздушните бариери и размерите на феромагнитните мост и ребро върху степента на насищане на магнитната верига и влиянието върху параметрите на електродвигатели с вътрешно разположение на магнитите. Формата на бариерите и размерите на феромагнитният мост и ребро оказват съществено влияние върху състоянието на магнитната верига което налага определянето на потоците, които преминават през тях [5]. Освен върху състоянието на магнитната верига, те оказват влияние и върху механичната якост на ротора при работа на електродвигателя. Това предполага да бъдат определени такива размери на моста и реброто, които да осигурят достатъчна механична якост на ротора и да се ограничи разсейването на магнитен поток през тях.

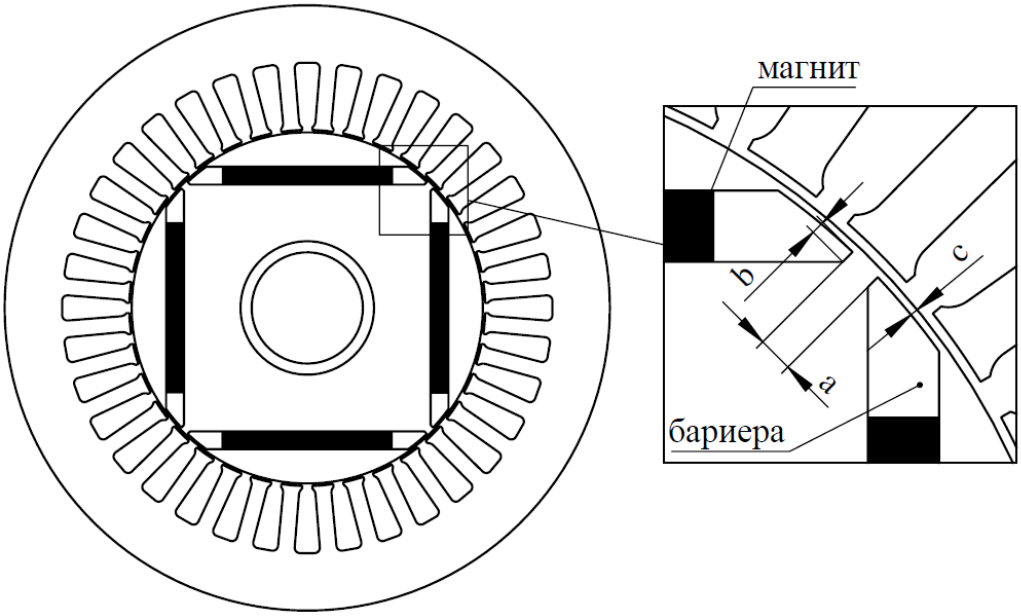
В настоящата работа е анализирано влиянието на ширината на феромагнитния участък в междуполюсното пространство (феромагнитното ребро) върху параметрите и работата на синхронен електродвигател с възбуждане от постоянни магнити разположени вътре в ротора.

2. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследване на настоящата работа е синхронен двигател с тангенциално разположени в ротора магнити, показан на фиг.1. Електродвигателят е с мощност 1,5 kW и 2p = 4.

За възбуждане са използвани редкоземни магнити NdFeB със следните характеристики: остатъчна индукция $Br = 1{,}05T$ и коерцитивен интензитет $Hc = 764\,kA/m$. С ***a*** е означена ширината на реброто, ***b*** е радиалната дължина на реброто, а ***c*** е ширината на мостчето.

Влиянието на ширината на реброто върху параметрите на двигателя е илюстрирана, като е променяна от 2 до 12 mm със стъпка 1 mm, а останалите размери се запазват постоянни. Разположението на постоянните магнити в ротора също не се променя.



Фиг.1. *Напречна геометрия и размери на феромагнитното ребро и мост.*

3. ВЛИЯНИЕ НА ШИРИНАТА НА РЕБРОТО
3.1. БЕЗ ТОК В СТАТОРНАТА НАМОТКА

За изследване на влиянието на ширината на реброто върху разпределението на магнитното поле и параметрите е построен модел на електродвигателя в средата на програмния продукт FEMM. При създаването на модела се задават геометричните размери и характеристиките на използваните материали и чрез МКЕ се анализира разпределението на магнитното поле, като се отчита насищането във всички участъци на магнитната верига.

При незахранена намотка за всяка ширина на реброто се отчита стойността на потока във въздушната междина $\Phi_{\delta 0}$ и се изчислява стойността на е.д.н. по:

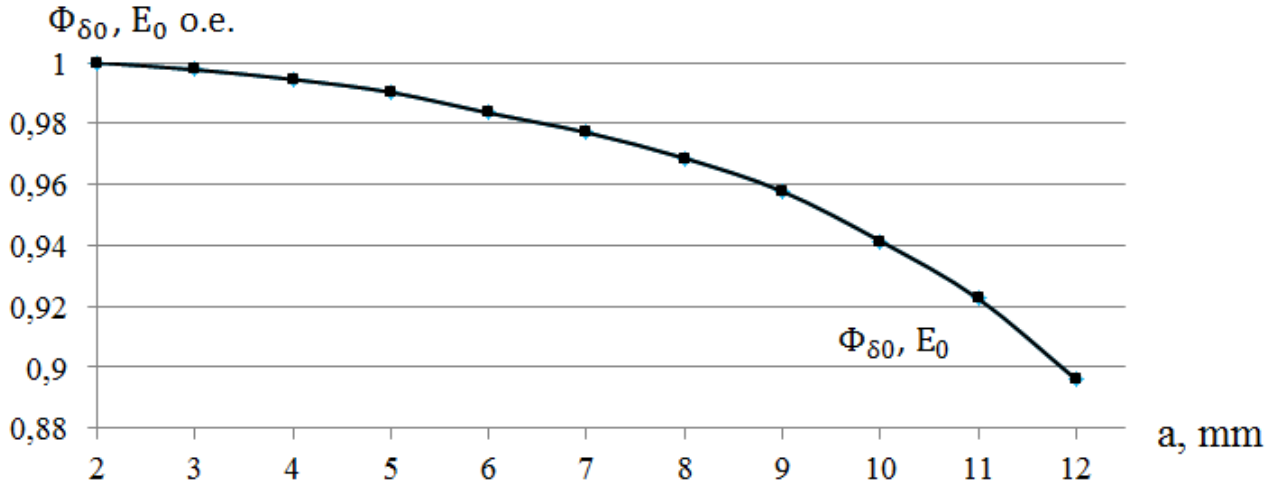
$$E_0 = \sqrt{2}.\pi.W_1.k_{W_1}.f_1.\Phi_{\delta 0} \qquad (1)$$

където W_1 е броят навивки за фаза, k_{W_1} е коефициентът на намотката, а f_1 е честотата на захранващото напрежение.

Стойностите на потока и е.д.н. в действителни и относителни единици са представени в табл.1 и показани на фиг.2.

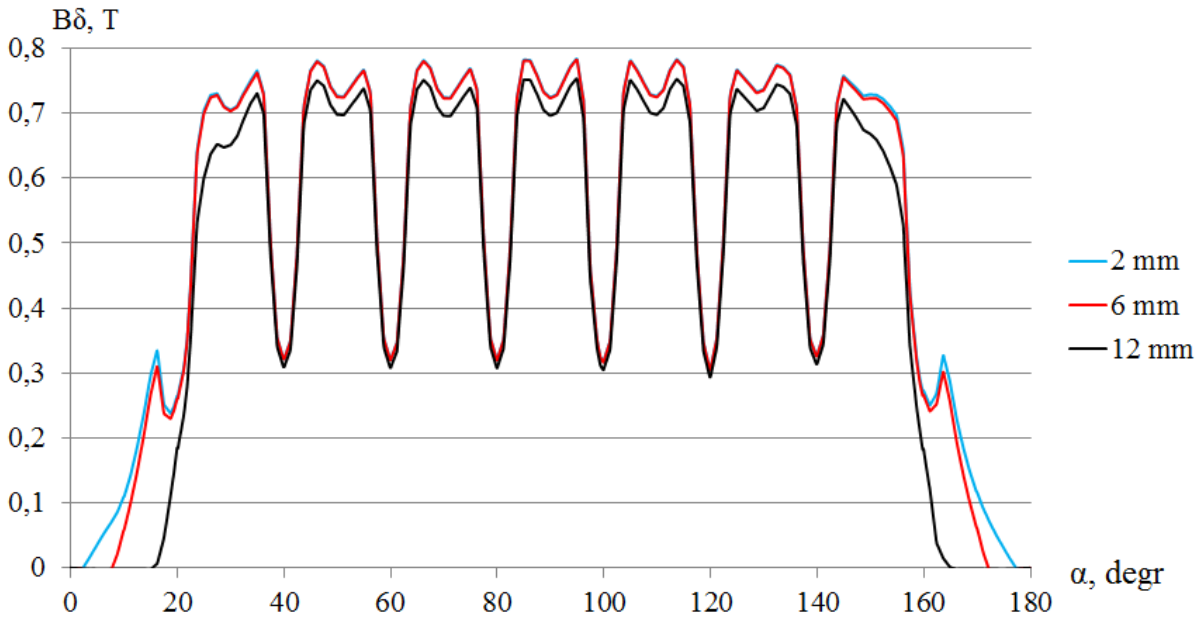
Таблица 1

a, mm	2	4	6	8	10	12
$\Phi_{\delta 0}$, Wb	0,002592	0,002578	0,002549	0,002511	0,00244	0,002322
E_0, V	271,79	271,27	269,6233	267,43	262,73	252,08
Относителни единици						
$\Phi_{\delta 0}$	1	0,994479	0,983418	0,968596	0,941351	0,895923
E_0	1	0,994479	0,983418	0,968596	0,941351	0,895923



Фиг.2. *Зависимост на е.д.н. и магнитния поток от ширината на реброто.*

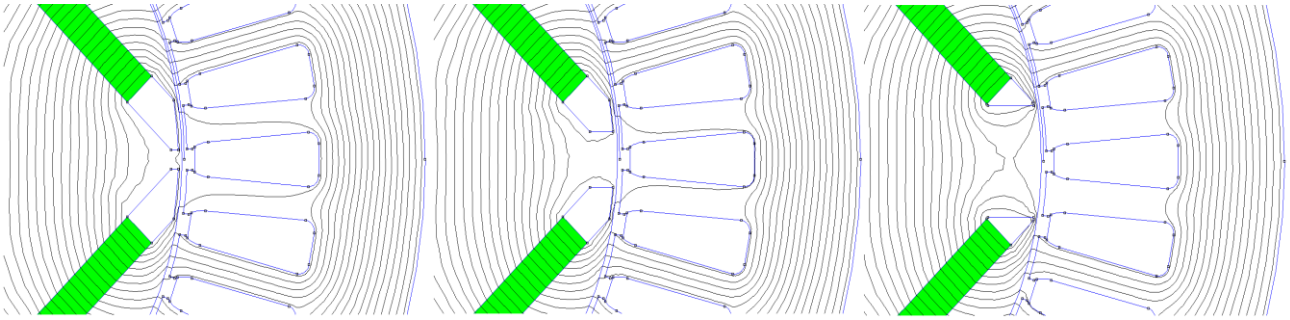
От представените криви се вижда, че при размер на реброто до 6 мм, потокът и е.д.н. намаляват с не-повече от 2 %, докато при по-нататъшно увеличаване на размера магнитният поток намалява с над 10%. За пояснявване на това явление е анализирано разпределението на магнитната индукция във въздушната междина, показано на фиг.3. Представените криви са снети за едно полюсно деление за три размера на реброто.



Фиг.3. *Разпределение на магнитната индукция.*

Ясно се вижда, че с увеличаване на ширината на реброто стойността на магнитната индукция във въздушната междина намалява и магнитният поток не обхваща цялото полюсно деление - фиг.3. Причината е, че с увеличаване на ширината магнитното съпротивление на реброто намалява и магнитният поток на постоянните магнити се шунтира около въздушната бариера. Тази част от потока на магнитите не преминава през въздушната междина, откъдето стойността на магнитния поток във въздушната междина намалява. На фиг.4 е показано

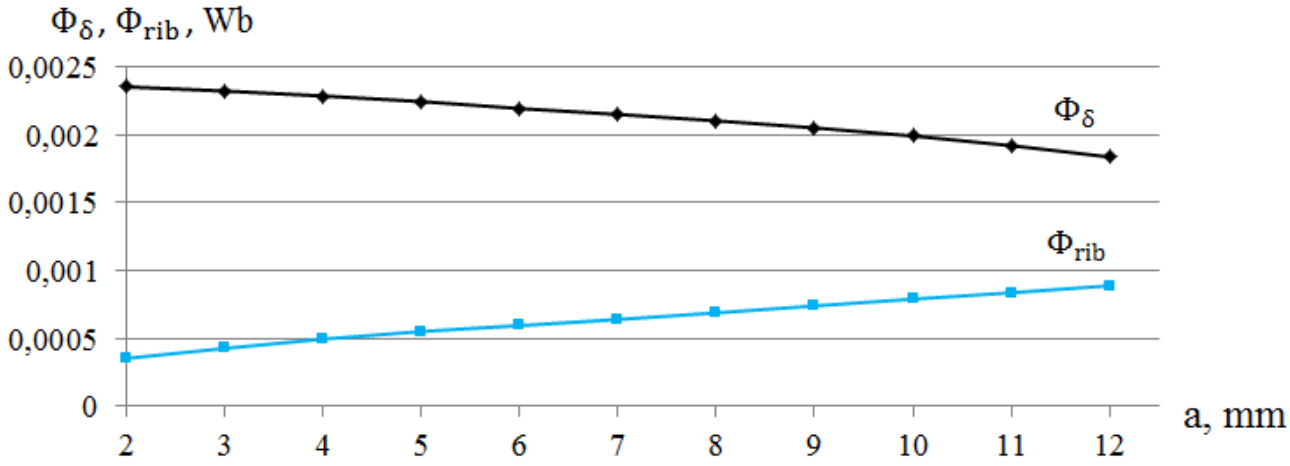
разпределението на магнитното поле получено след анализ по МКЕ, за три размера на реброто.



Фиг.4. *Разпределение на магнитното поле при различни размери на реброто*

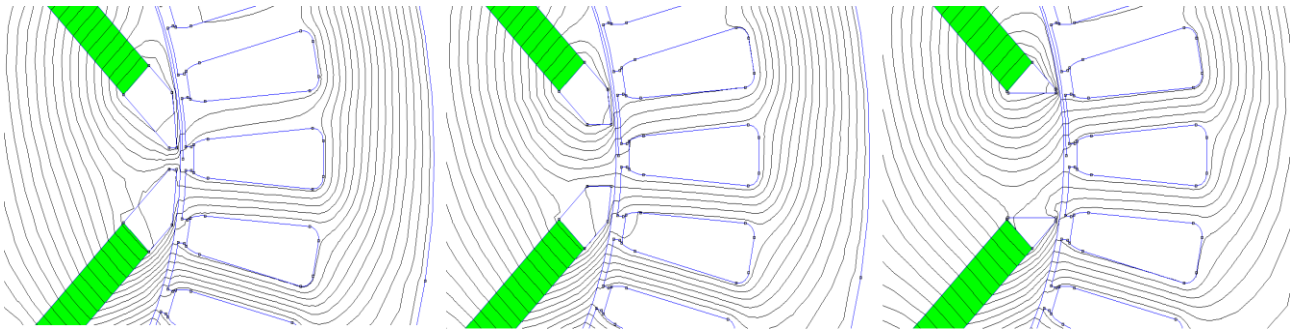
3.2. НОМИНАЛНА РАБОТА НА ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

За изследване на влиянието на ширината на феромагнитното ребро върху параметрите на двигателя за номиналния режим, трябва да бъде определена работната му точка. За определянето ѝ е приложена методиката представена в [6,7]. Търсенето на номиналната точка на работа е извършено за всички изследвани ширини на реброто. За всяка нова ширина е намерен съответният ъгъл на тока и са изчислени стойностите на синхронните реактанси и електромагнитния момент. За базова е приета конструкцията на ротора с най-малката ширина – 2 mm. На фиг.5 е представено изменението на потока във въздушната междина и потока през реброто в зависимост от ширината му.



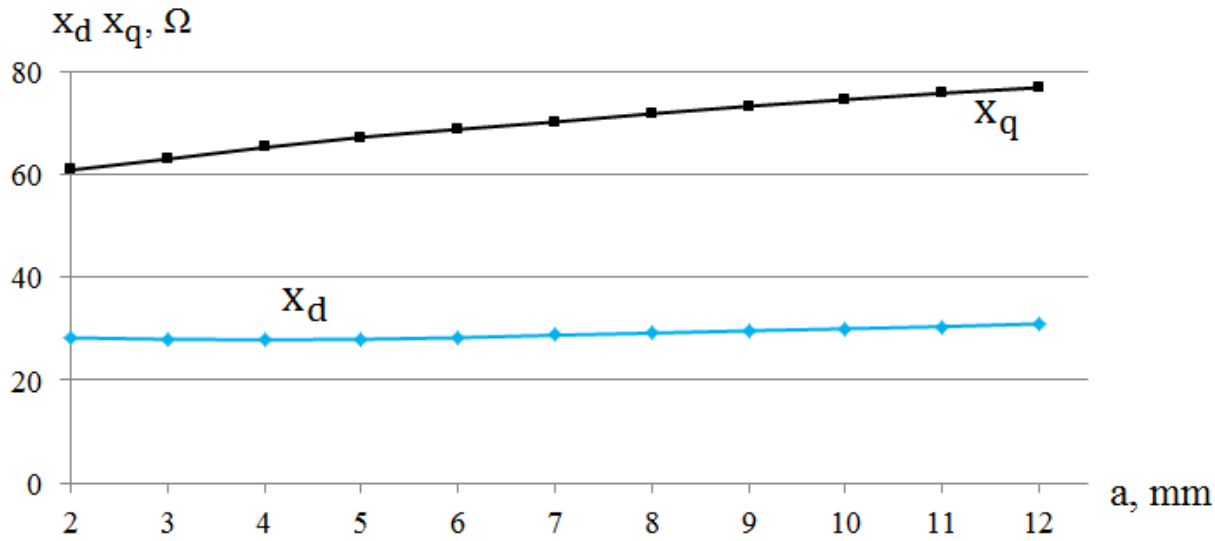
Фиг.5. *Изменение на магнитния поток във въздушната междина и реброто в зависимост от ширината.*

С увеличаване на ширината на реброто насищането му намалява и се образува зона с по-голяма магнитна проводимост. В резултат по-голяма част от магнитния поток на магнитите преминава през него, а не преминава през въздушната междина и не се сцепва с навивките на статора [1, 2]. На фиг.6 е представено разпределението на магнитното поле при номинално натоварване за три размера на реброто.



Фиг.6. *Разпределение на магнитното поле при различни размери на реброто*

Фиг.7. илюстрира изменението на стойностите на синхронните реактанси в зависимост от ширината на феромагнитното ребро.



Фиг.7. *Изменение на реактансите в зависимост от ширината на реброто*

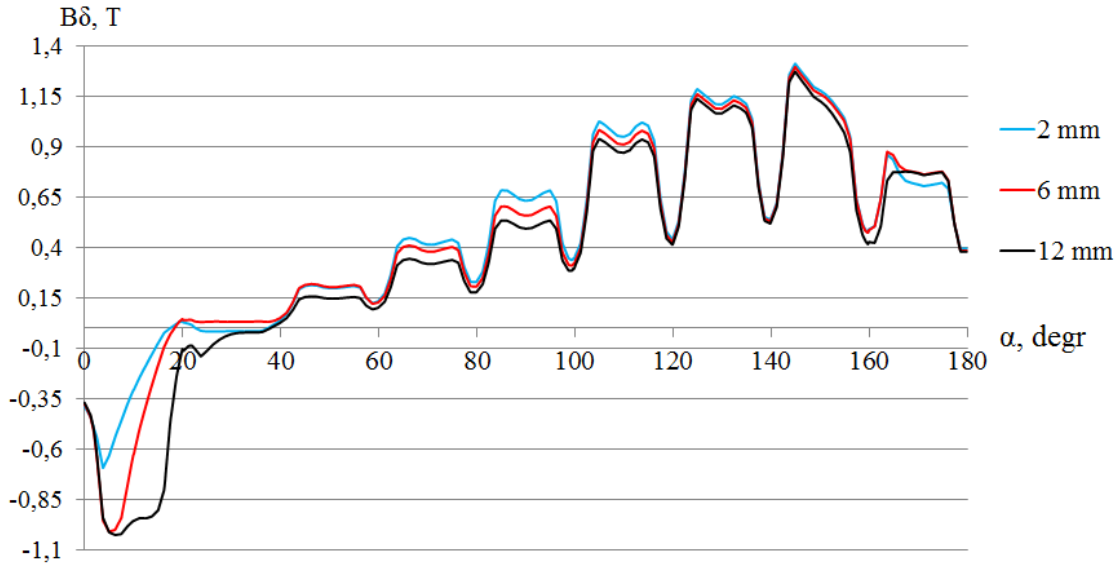
С увеличаване на ширината на реброто, магнитната му проводимост се увеличава и ефекта на напречно насищане върху пътя на магнитния поток на напречната реакция намалява. В резултат стойността на напречния синхронен реактанс нараства, както може да бъде видяно от фиг.7. Стойността на надлъжния реактанс се запазва постоянна при всички изследвани ширини на реброто. Причината е, че стойността му се определя основно от магнитното съпротивление на постоянните магнити и размерите им. Тъй като размерите на магнитите не се изменят при промяна на ширината на реброто, то стойността на надлъжния реактанс също не се изменя. Резултатите от изследването са обобщени в табл.2.

Таблица 2

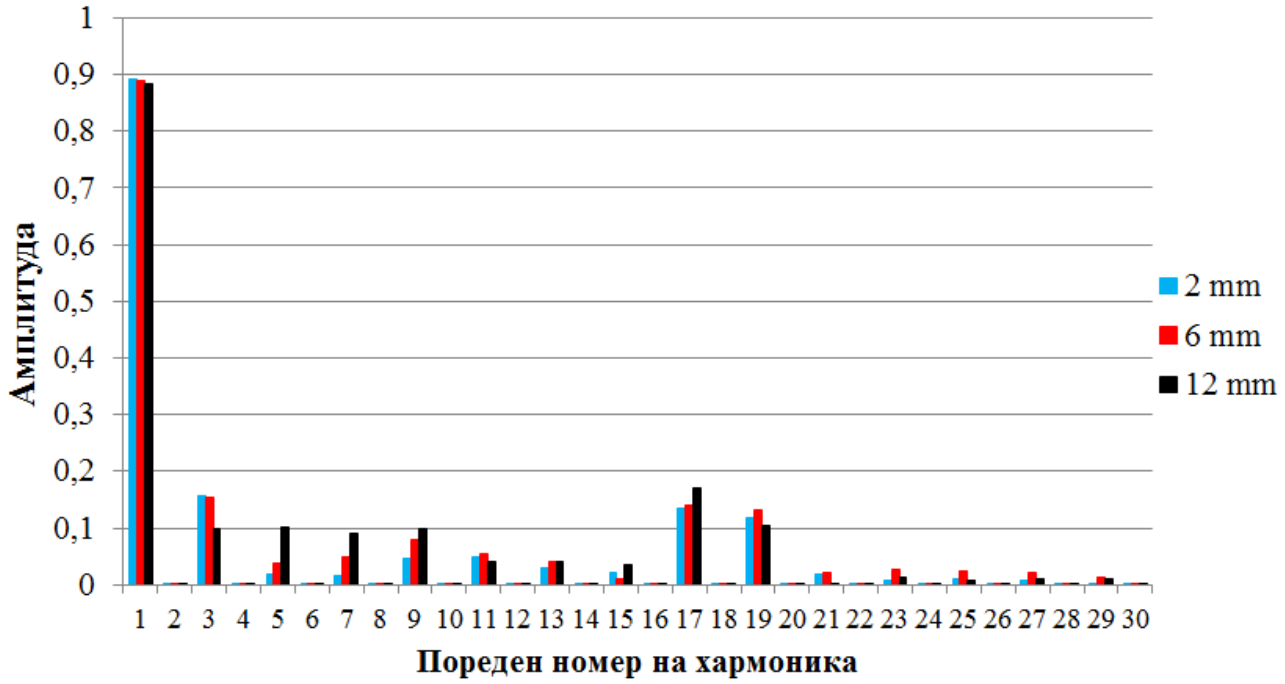
a, mm	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Xd, Ω	28,24	27,95	27,86	27,94	28,27	28,75	29,15	29,61	30,00	30,42	30,97
Xq, Ω	60,83	62,95	65,21	67,19	68,72	70,17	71,76	73,21	74,51	75,75	76,83
Θ, deg	39,41	40,27	41,15	41,95	42,70	43,46	44,31	45,20	46,16	47,28	48,75

4. ВЛИЯНИЕ НА ШИРИНАТА НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНОТО РЕБРО ВЪРХУ ПУЛСАЦИИТЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИЯ МОМЕНТ

По методиката за определяне на пулсациите на момента, представена в [6] е анализирано влиянието на размера на феромагнитното ребро върху пулсациите на електромагнитния момент при номиналната работа на електродвигателя. Пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина за три размера е представено на фиг.8. На трите снети криви е направен анализ за определяне на хармоничния състав и амплитудите на хармониците – фиг.9.



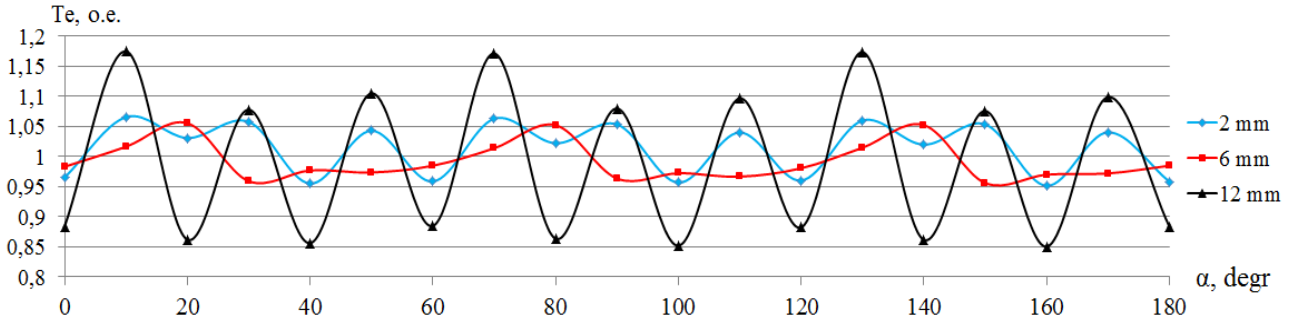
Фиг.8. *Разпределение на магнитната индукция при номинално натоварване*



Фиг.9. *Хармоничен състав на кривите на индукцията*

С увеличаване на ширината на реброто, основният хармоник на индукцията намалява и се влошава цялостният хармоничен състав на кривата. При ширина 12

mm кривата на индукцията съдържа хармоници с ясно изразени амплитуди, значително по-големи от амплитудите на хармониците при останалите два размера. Наблюдаваните хармоници образуват допълнителни моменти, които се наслагват към момента създаден от основния и причиняват пулсации. Снетите криви на пулсациите са представени в относителни единици на фиг.10. При ширини на реброто между 2 и 6 mm магнитната проводимост при въртене на ротора не се изменя значително и кривите на индукцията съдържат хармоници с малки амплитуди, затова амплитудите на пулсациите не се различават значително и не надвишават 5% от номиналния момент.



Фиг.10. *Пулсации на момента при различни ширини на реброто.*

Освен наличието на хармоници с големи амплитуди в кривата на индукцията при по-голяма ширина (напр.12 mm), се получават и големи разлики в магнитната проводимост при въртенето на ротора. В резултат се получават пулсации на момента със значителни амплитуди, които достигат до 15 % от номиналния момент на електродвигателя, както се вижда от зависимостите, показани на фиг.10.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложната конструкция на роторите с вътрешно разположение на постоянните магнити налага внимателното им анализиране в процеса на проектиране. Феромагнитните участъци като реброто и мостчето над въздушните бариери променят структурата на магнитната верига и оказват влияние върху разпределението на магнитното поле и параметрите и работата на електродвигателите. Всяка конструкция на ротора трябва да бъде анализирана индивидуално и да се определят такива размери на феромагнитните участъци, които да гарантират желаните параметри и нормалната работа на проектирания електродвигател и да осигурят достатъчна механична якост на ротора. С помощта на МКЕ, векторните диаграми и теорията на изобразяващите вектори, различните конструкции на роторите и работата на електродвигателите може да бъде анализирана и да бъдат определени такива размери, които да удовлетворят поставените изисквания към проектираната машина.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Huijuan Liu, Haijiao Zhang, ***PM Design of IPMSM using Parameterized Finite Element Model***, TELKOMNIKA, Vol. 11, No. 12, December 2013, pp. 7072-7080.

[2] Yamazaki, K., Ishigami, H., ***Rotor-Shape Optimization of Interior-Permanent-Magnet Motors to Reduce Harmonic Iron Losses,*** IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 1, January 2010, pp. 61-69.

[3] Р.Спасов, П. Ризов, В. Захариев, Ц. Стоянов, ***Приложение на метода на крайни елементи за определяне на момента и загубите в зъбите на статора при синхронни двигатели с вътрешни магнити***, VI Научна конференция ЕФ2014 – Созопол 15 -17.09 2014, Том 64, книга 4, pp. 161-171.

[4] Feng Yaojing, Huang Shoudao, ***Research on Optimal Design of Permanent Magnet Synchronous Motors based on Field circuit Coupled Method,*** 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, China Oct. 22-25, 2014.

[5] Chunting Mi, Filippa M., ***Analytical Method for Predicting the Air-Gap Flux of Interior-Type Permanent-Magnet Machines***, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 1, January 2004, pp. 50-58.

[6] Тодоров Г., Б. Стоев, ***Изследване на пулсациите на момента на синхронни двигатели с възбуждане от постоянни магнити***, VII Научна Конференция ЕФ 2015, Созопол, 19-21.09.2015.

[7] Pyrhonen, J., T. Jokinen, V. Hrabovcová, *Design of Rotating Electrical Machines*, 2014 John Wiley & Sons, Ltd, ISBN 978-1-118-58157-5.

Автори: Георги Тодоров, доц. д-р инж., катедра "Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *gtto@tu-sofia.bg*; Божидар Стоев, маг. инж. докторант, катедра "Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, Email adress: *bdst@tu-sofiq.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. дтн Ганчо Божилов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТОДИТЕ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА МЕТРОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ДВУСТРАНЕН ЧЕСТОТЕН ТЕНЗОПРЕОБРАЗУВАТЕЛ

Свилен Стоянов

Резюме: *В настоящият доклад е изследвана възможността на разширяване на измервателните диапазони и увеличаване на линейността на двустранен интегриращ тензопреобразувател на изменението на съпротивлението в девиация на честотата по метода на разгъващото право преобразуване. Преобразувателят е предназначен за измерване на сили и моменти при различни технологични процеси с помощта на тензосъпотивителни датчици, свързани в пълен мост. Използвана е съвременна елемента база с високи метрологични характеристики. Получените практически резултати от реализацията на преобразувателя са дадени в табличен и графичен вид, като са направени и съответните изводи.*
Ключовидуми: *измерване, интегриращ преобразувател, тензодатчик, технологични процеси*

RESEARCH METHODS OF ENHANCING THE METROLOGICAL PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF BIDIRECTIONAL FREQUENCY STRAIN GAUGES CONVERTER

Svilen Stoyanov

Abstract: *In the present report examined the possibility of expanding the range and increasing the linearity of bidirectional disbalance strain gauges converter into frequency deviation method ramp right conversion. The converter is designed to measure forces and moments in different technological processes using strain gauges sensors connected in a full bridge. Used is contemporary component with high metrological characteristics. Received practical results from the realization of the converter are given in tabular and graphical form, they are made and the corresponding conclusions.*
Keywords: *measurement, ramp converter, strain gauges bridge, technological processes*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Измерването на сили и моменти с тензосъпротивителни датчици е широко разпространено, поради факта, че с едни и същи преобразуватели могат да бъдат изследвани силовите характеристики на различни технологични процеси.

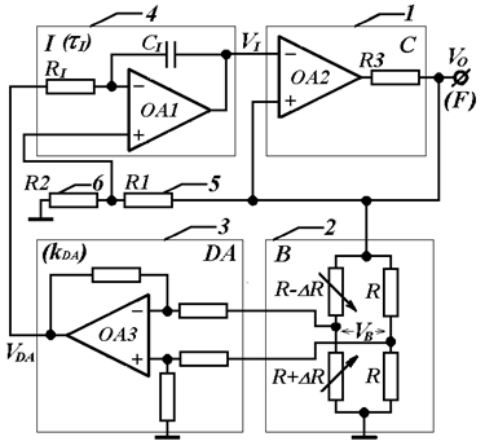
Към устройствата за измерване параметрите на технологичните процеси се предявават изключително високи изискалия по отношение на точност и бързодейс-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

твие. Самите технологични процеси се характеризират с относително голяма продължителност (от няколко десетки секунди до няколко минути), като в повечето случаи натоварването е прекъснато или знакопроменливо. Тези натоварвания са особено трудни за изследване, поради периодичното преминаване на изследваната величина през нулевата стойност и дори адитивната грешка при работа да има малка стойност, тя влияе силно върху измерваната величина.

Обект на изследване е двустранен интегриращ измервателен преобразувател на изменението на съпротивлението в девиация на честотата [2]. Принципната схема на преобразувателя е показана на фиг.1. Схемата съдържа диференциален усилвател DA, интегратор I и компаратор C, като захранващият диагонал на моста B е свързан между общата маса и изхода на компаратора, който е и изход на преобразувателя. Измервателният диагонал на моста е присъединен към входовете на диференциалния усилвател, чийто изход е свързан с инвертиращия вход на интегратора. Изходът на интегратора е свързан към инвертиращия вход на компаратора, чийто неинвертиращ вход е обединен с изхода на преобразувателя. С резисторите R1 и R2 е реализиран делител на напрежение, като средната точка на делителя е свързана с неинвертиращия вход на интегратора.



Фиг.1. Принципна схема на преобразувателя

Изведено е уравнението на преобразуване (1):

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{1}{T} = \frac{\beta}{4\tau_I(1-\beta)} + \frac{k_{DA}}{8\tau_I(1-\beta)}\delta R \qquad (1)$$

където: - $\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ – коефициент на делителя на напрежение; -k_{DA}–коефициента на усилване на диференциалния усилвател; - τ_I– времеконстанта на интегратора; -δR – относително изменение на съпротивлението на тензодатчиците при натоварване (деформация).

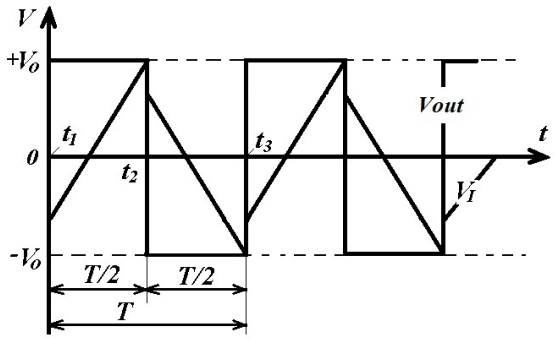
Първата част от уравнението определя началната честота, а втората част представлява изменението на честотата при относителното изменение на съпротивлението на тензодатчиците.

При работа с преобразувателя е необходимо да се спазва условието за линейност (2). От формулата се вижда, че максималното изменение на честотата под въздействието на деформацията на тензодатчиците не трябва да надвишава на-

чалната честота на преобразувателя. За устойчива работа се препоръчва минимална работна честота над 500Hz.

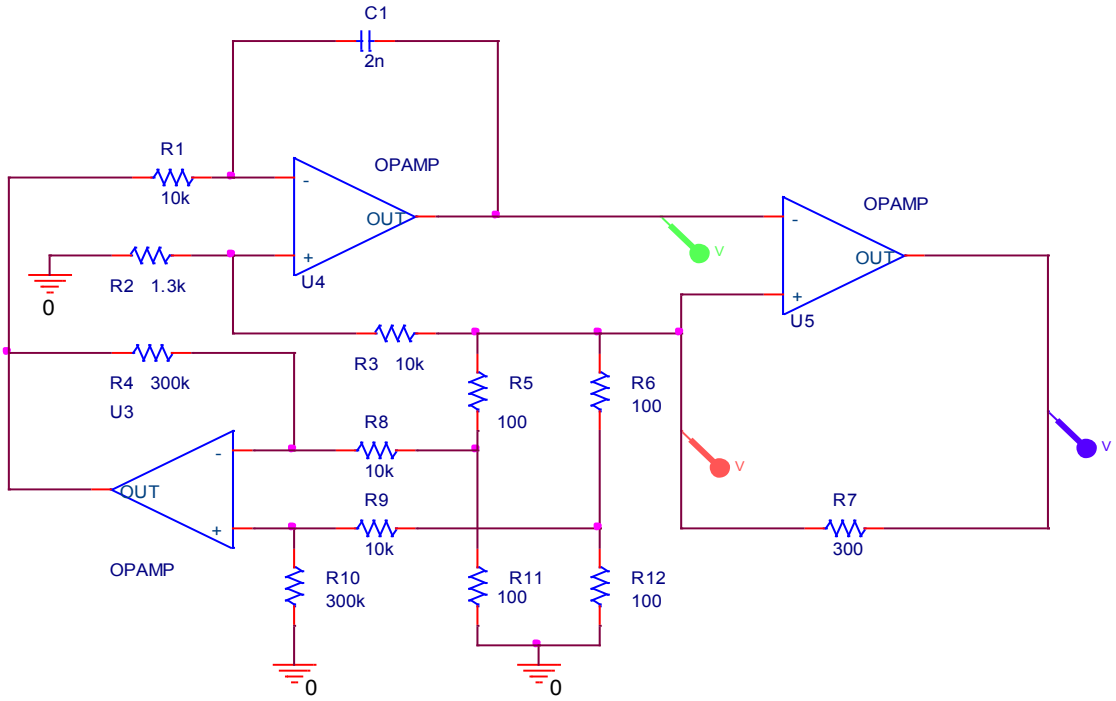
$$\frac{k_{DA}}{8\tau_I(1-\beta)}|\delta R| < \frac{\beta}{4\tau_I(1-\beta)} \qquad (2)$$

Времедиаграмите на работа са показани на фиг.2, като се виждат правоъгълните импулси от изхода преобразувателя V_{out}, която е и изход на компаратора и характерните триъгълни импулси на изхода на ингеграторa V_I с малък скок по задния фронт, който се определя от стойността на коефициента на делителя на напрежение β.



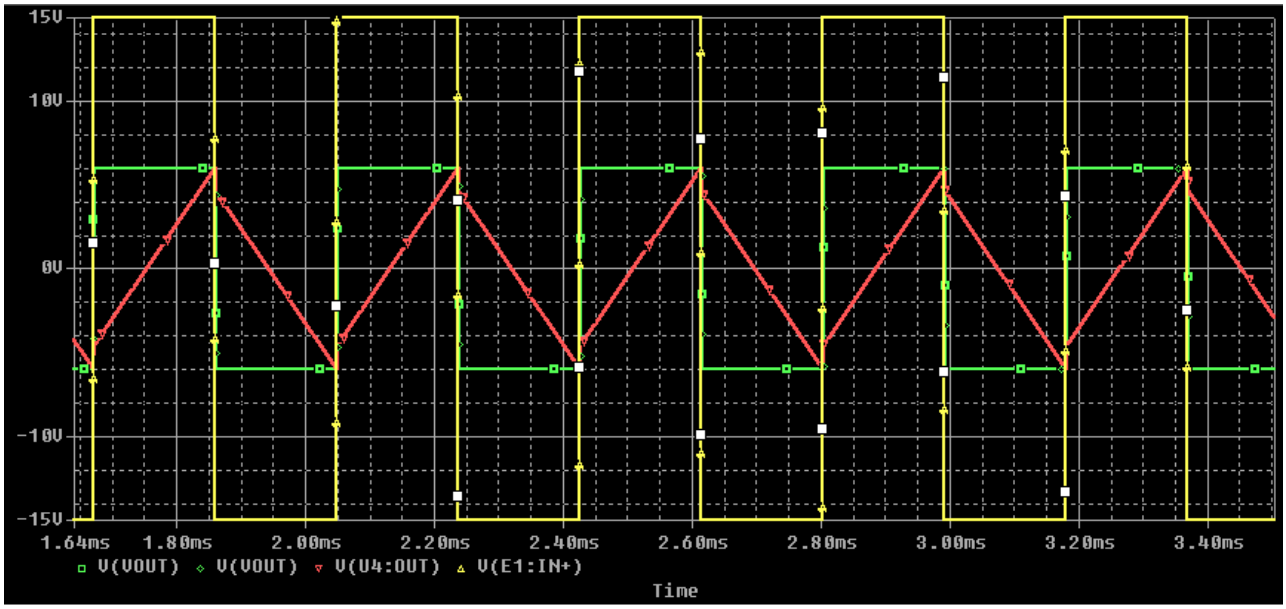
Фиг.2. Времедиаграми на преобразувателя

Схемата е симулирана на ORCAD [2] със стойности на елементите, както е показано на фиг.3. Тензорезисторите са представени чрез съпротивленията R_5 = 100,0 …100,5 Ω, R_{11} = 100,0…99,5 Ω изменящи се със стъпка 0,1 Ω.



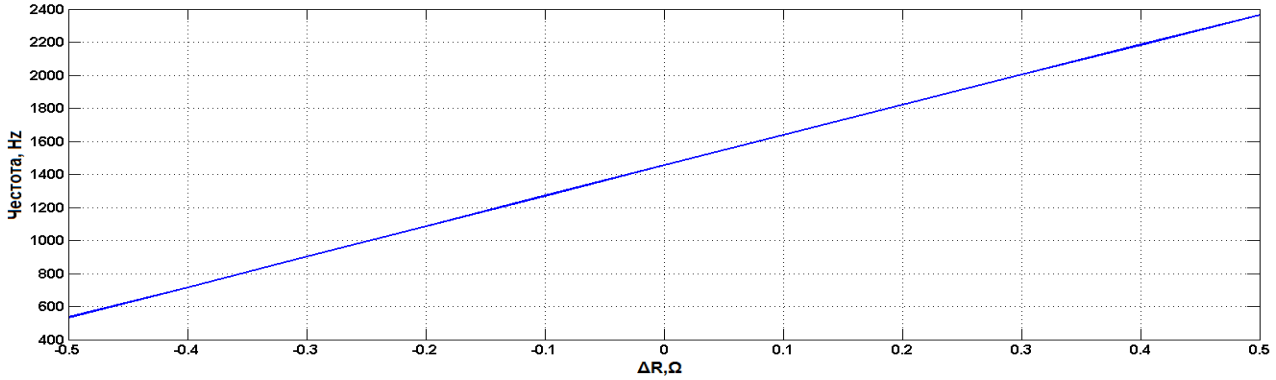
Фиг.3. Принципна схема на симулирания преобразувател

На фиг.4 са показани времедиаграмите от симулацията на напреженията. Изходното напрежение на компаратора U_{OUT} с жълт цвят се подава на тензомоста, посредством резистора R_7- зелен цвят -U_R, а изходното напрежение на интегратора U_I е в червен цвят.



Фиг.4. Времедиаграми от симулацията на напреженията U_{OUT}, U_R и U_I

За проверка действието на преобразувателя от фиг.3 бе реализиран експериментален макет, като са използвани следните компоненти: за компаратор - операционен усилвател LF357N; за диференциален усилвател и интегратор - операционен усилвател LF356N; резистори с толеранс ±1% и кондензатор с толеранс ±2%. За стойности на елементите са подбрани: R=100Ω – началното съпротивление на датчика, $R_1=R_I=10k\Omega$, $R_2=1.3k\Omega$, $C_I=2.2nF$, коефициент на усилване на диференциалния усилвател $K_{DA}=30$. При тези стойности на елементите и разбаланс на резистивния мост $\Delta R=\pm 0{,}5\Omega$ (зададен с резистивна декада) са получени следните резултати: начална честота (при балансиран мост) $f_0=1446{,}7$ Hz и стъпка на изменение на честотата 181,9 Hz (за $\Delta R=0{,}1\Omega$). На базата на получените резултати е определена приведената грешка γ, като максималната й стойност е 0,16%. При сравняване на получените резултати с теоретичните, за относителната грешка на началната честота се извежда $\delta_{f0}=-1{,}5\%$, а за относителната грешка на чувствителността на преобразувателя се извежда $\delta_к=-5\%$. Получените резултати са представени на фиг.5.



Фиг.5. Експериментално изследване на получената изходна честота f_{out} при точно изменение на ΔR/R

За подобряването на метрологичните характеристики и параметри на преобразувателя е необходимо оптимизиране на схемата, което се свежда до замяна на диференциалния усилвател с високоточен инструментален усилвател и подбор

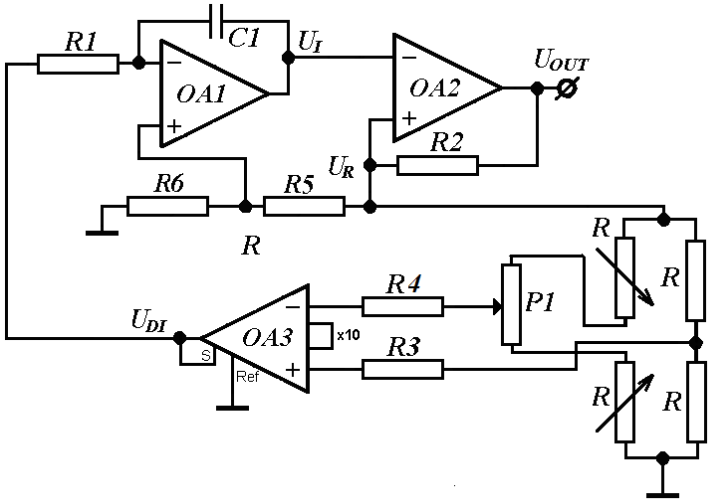
на операционни усилватели на компаратора [4], [6]. Работата на интегратора в преобразувателя е разгледана подробно и моделирана в [5]. В настоящия доклад се ползват постигнатите резултати при подбора на елементи за обезпечаване на нужното бързодействие. Друг подход за корекция на динамичните свойства на този тип преобразуватели е посочен в [4].

Подобряването на метрологичните характеристики би спомогнало за намаляване нелинейността на преобразувателя чрез използване на съвременна елементна база при запазване относителната простота на схемното решение.

2. МЕТОДИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА МЕТРОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ДВУСТРАНЕН ТЕНЗОПРЕОБРАЗУВАТЕЛ

2.1. РАЗРАБОТВАНЕ НА ДВУСТРАНЕН ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ С ИНСТРУМЕНТАЛЕН УСИЛВАТЕЛ

На фиг.6 е представена принципната схема на двустранен преобразувател на разбаланса на тензорезистивен мост в изменение на честотата, а времедиаграмата на работа е идентична с показаната на фиг.2.

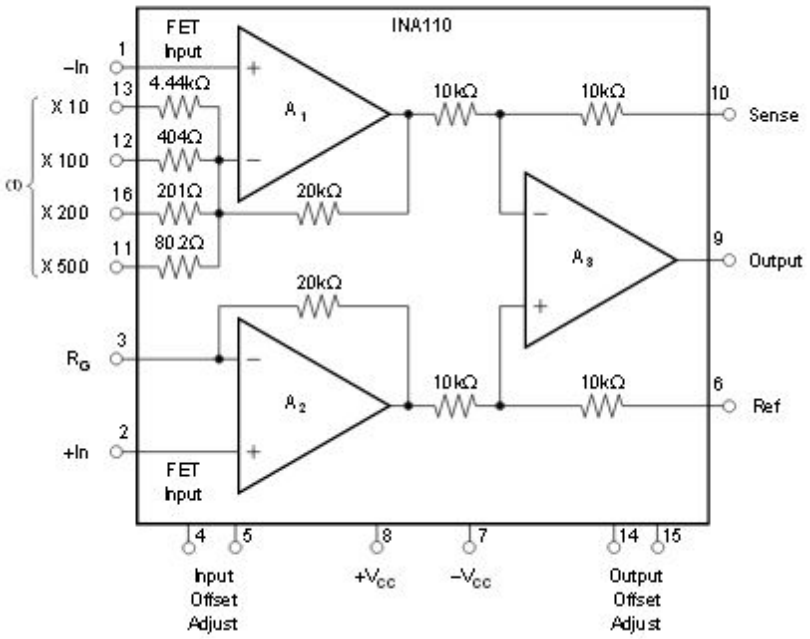


Фиг.6. Принципна схема на преобразувател с инструментален усилвател

Основната разлика в схемата е замяната на диференциалния усилвател ОА3 с прецизен инструментален усилвател INA110. Освен това е показана резистивната декада Р1 за симулиране работата на преобразувателя с точно определена стойност на разбаланс.

Интегралната схема INA 110 [7] представлява универсален монолитен инструментален усилвател. Характерни за нейната топология са дълбоките отрицателните обратни връзки по ток и прецизните лазерни обработки на входовете, които й осигуряват отлична динамика и точност. Инструменталният усилвател се установява за 4 μs до 0,01%, което го прави идеален при работа с високи скорости или работа като мултиплексна входна система за обработка на данни. Входовете са защитени от двуполярни или синфазни напрежения до стойността на захранващото напрежение. Коефициентът на усилване се задава чрез резисторна матрица със стъпки k_{IU}=1, 10, 100, 200 и 500 V/V.

Характерни за схемата са много високото входно съпротивление и малкият среден остатъчен входен ток, които я правят подходяща за работа с чувствителни на смущения входни величини, изискващи наличието на входни филтри или вериги за защита на входа от смущения.
Схемата притежава много добри честотни свойства с f_1=2,5MHz, но само при усилване до 10 V/V. При усилване k_{IU} =100 V/V и повече пъти, честотата на единичното усилване е f_1=470 MHz и плавно намалява до 100 MHz при k_{IU} =500 V/V. Скоростта на нарастване на изходното напрежение се лимитира само в обхвата до 10 V/V, а за останалите обхвати липсват данни.



Фиг.7. Инструментален усилвател INA110

При работа със схемата се забелязаха различия в захранващите напрежения от различни производители. Съгласно [7], [10] захранването на ИС е двуполярно 6÷18V и съответно 12÷36V.

Изборът на захранващо напрежение се оказа ключов за успешната работа на преобразувателя. Съгласно препоръките на производителите бе избрано двуполярно захранващо напрежение 15V. Промяната на напрежението, особено под 12V влияе силно върху началната честота на преобразувателя и не е за препоръчване- табл.1.

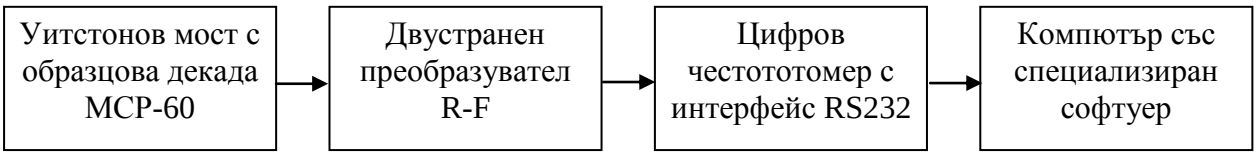
Табл.1.

Зависимост на изходната честота от стойностите на захранващите напрежения

E_{cc}, V	6	6,2	7	8	12	15
f_{out}, Hz	0	75	505	806	1310	1478

2.2.ОПИТНА ПОСТАНОВКА

Свързването на необходимата апаратура за изследване метрологичните характеристики на преобразувателя е показано на блок-схемата на фиг.8.



Фиг.8. Блок-схема

Сигналът от разбаланса на тензодатчиците с помощта на образцовата декада, се подава на преобразувателя, който преобразува относителното изменение на съпротивлението на тензодатчиците в девиация на честотата. Получената честота се подава на точен цифров честотомер модел UNI-T UT803 на фирмата Uni Trend Groupe Limited тип : Digital Bench-Type Auto ranging True RMS Multimeters със следните характеристики: UNI-T UT803 100kHz With RS232C USB Interface, LCD Backlight Display, Data Hold, Auto-Ranging, клас на точност при измерване на честота ±0,1% и на постоянно напрежение ± 0,3%. Предаването на данните от измервателните прибори към компютъра се извършва с интерфейс RS232C по USB порт. За запис и обработка на данните се използва специализиран софтуер на същата фирма. Изходните резултати се получават в xls формат, което е изключително удобно за последващи обработки. Програмата автоматично построява и графика, която служи като ориентир за цялостното протичане на измервателния процес.

Предвидени за изследване са пет вида операционни усилватели на компаратора, като най-важните им параметри са дадени в таблица 2 [9], [11]. За този клас измервателни преобразуватели е доказано е, че остатъчните напрежения на операционните усилватели на интегратора и компаратора не влияят на изменението на изходната честота, което е и съществено предимство [1].

Табл.2.

Параметри на операционни усилватели

Параметри	LF356N	LF411CP	TL080	HA17741	μA741
SR V/μs	10	8	8	1	0,8
f_1 MHz	5	3	3	2	0,5

2.3. ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТАТА НА ПРЕОБРАЗУВАТЕЛЯ

Първоначално на изследвания преобразувател е извършен измервателен баланс по схемата на Келвин-Уорлей [3], при нулева стойност на съпротивителната декада МСП60. Използваната схема дава възможност за тариране с точност до 1μV, като за галванометър е използван същият високоточен измервателен прибор UT803.

Експериментите се извършват при задаване на 11 фиксирани стойности на двустранно изменение на съпротивлението през 0,1Ω. Мостът бе реализиран с две активни рамена с помощта на образцова декада Р1 с клас на точност 0,02%. В качеството на резистори R_1-R_6 са използвани резистори с толеранс ±1% и ТКС

±100ppm. Кондензаторът е със стойност 2,2nF, фабрично подбран и тестван (2 кондензатора в комплект). За ОУ на интегратора е избран LM833N.

Изменението на тензосъпротивленията е в същия обхват както при симулационните изследвания.

В табл.3 и табл.4 са приведени получените експериментални резултати и изчисления при коефициент на усилване k_{IU}=10V/V, а в табл.5 при k_{IU}=100V/V. В първата колона са показани симулационните стойности на изменението на съпротивлението на тензорезисторите, задавано чрез образцовата декада. На всеки ОУ са дадени получената изходна честота f и са изчислени съответните точки от линеаризиращата права f_{lin} в Hz, и приведената грешка от нелинейност по формула 3 [1].

$$\gamma = \frac{f_{out} - f_{out_lin}}{f_{out_\max} - f_{out_\min}} 100\% \qquad (3)$$

Табл.3.

Експериментални резултати при k_{IU}=10V/V

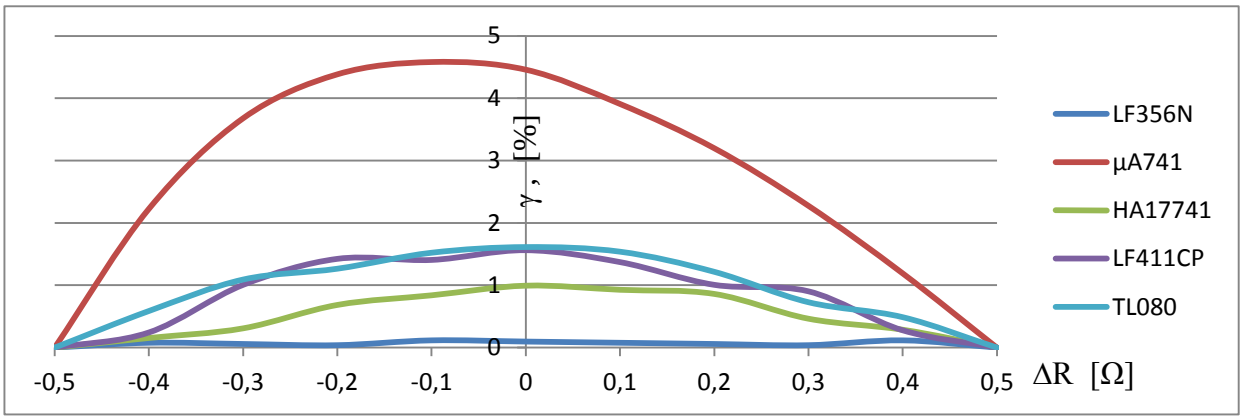
ΔR	LF356N			LF411CP			TL080		
Ω	f, Hz	f_{lin}, Hz	γ, %	f, Hz	f_{lin}, Hz	γ, %	f, Hz	f_{lin}, Hz	γ, %
-0,5	1220	1220	0	829	829	0	816	816	0
-0,4	1272	1271,6	0,077519	888	886,6	0,243056	880	876,45	0,587262
-0,3	1323,5	1323,2	0,05814	950	944,2	1,006944	943,5	936,9	1,091811
-0,2	1375	1374,8	0,03876	1010	1001,8	1,423611	1005	997,35	1,265509
-0,1	1427	1426,4	0,116279	1067,5	1059,4	1,40625	1067	1057,8	1,521919
0	1478,5	1478	0,096899	1126	1117	1,5625	1128	1118,25	1,612903
0,1	1530	1529,6	0,077519	1182,5	1174,6	1,371528	1188	1178,7	1,538462
0,2	1581,5	1581,2	0,05814	1238	1232,2	1,006944	1246,5	1239,15	1,215881
0,3	1633	1632,8	0,03876	1295	1289,8	0,902778	1304	1299,6	0,727874
0,4	1685	1684,4	0,116279	1349	1347,4	0,277778	1363	1360,05	0,488007
0,5	1736	1736	0	1405	1405	0	1420,5	1420,5	0

Табл.4.

Експериментални резултати при k_{IU}=10V/V

ΔR	HA17741			μA741		
Ω	f, Hz	f_{lin}, Hz	γ, %	f, Hz	f_{lin}, Hz	γ, %
-0,5	1175	1175	0	501	501	0
-0,4	1221	1220,3	0,154525	730	688,3	2,226375
-0,3	1267	1265,6	0,309051	944,5	875,6	3,67859
-0,2	1314	1310,9	0,684327	1145	1062,9	4,383342
-0,1	1360	1356,2	0,838852	1336	1250,2	4,580886
0	1406	1401,5	0,993377	1521	1437,5	4,458089
0,1	1451	1446,8	0,927152	1698	1624,8	3,908169
0,2	1496	1492,1	0,860927	1872	1812,1	3,198078
0,3	1539,5	1537,4	0,463576	2042	1999,4	2,274426
0,4	1584	1582,7	0,286976	2209	2186,7	1,190603
0,5	1628	1628	0	2374	2374	0

Получените експериментални резултати са представени и графично на фиг.9 и фиг.10.

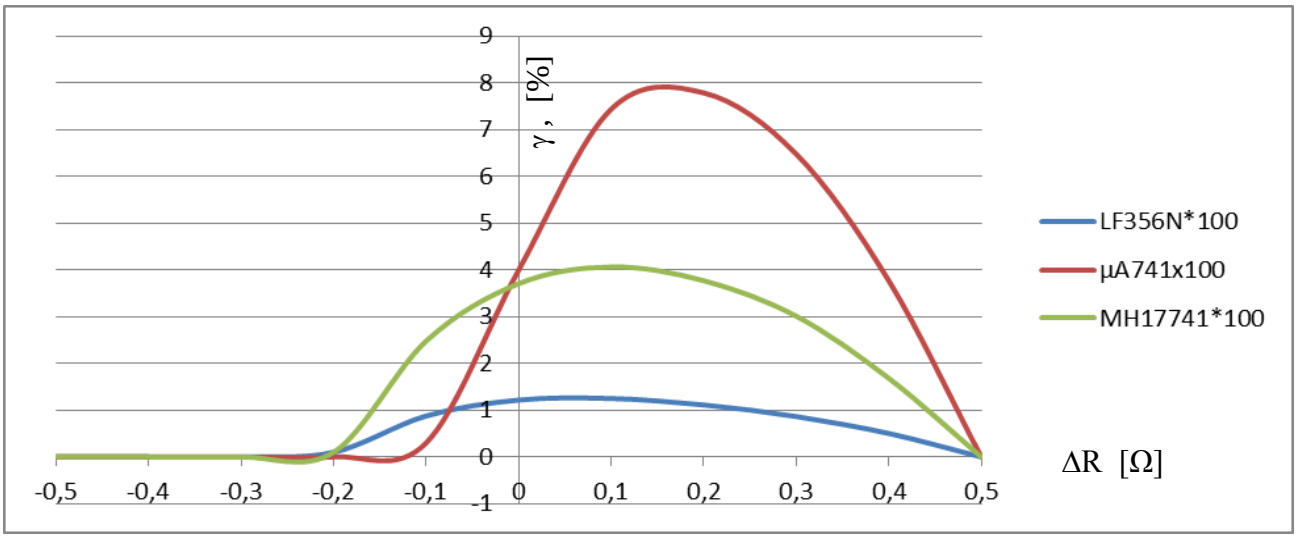


Фиг.9. Получени експериментални резултати при двустранен разбаланс на схемата със стъпка от 0,1Ω и k_{IU}=10V/V.

Табл.5.

Експериментални резултати при k_{IU}=100V/V

ΔR	LF356N*100			MH17741*100			µA741x100		
Ω	*f*, Hz	f_{lin}, Hz	γ, %	*f*, Hz	f_{lin}, Hz	γ, %	*f*, Hz	f_{lin}, Hz	γ, %
-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,2	763	763	0	724	724	0	0	0	0
-0,1	1302	1270,857	0,87603	1237	1145,857	2,478729	100	100	0
0	1822	1778,714	1,217601	1704	1567,714	3,706438	587	492,8333	3,995192
0,1	2331	2286,571	1,249749	2139	1989,571	4,063872	1061	885,6667	7,438835
0,2	2834	2794,429	1,11312	2550	2411,429	3,7686	1462	1278,5	7,78532
0,3	3333	3302,286	0,863974	2944	2833,286	3,010995	1824	1671,333	6,47716
0,4	3828	3810,143	0,502311	3317	3255,143	1,682272	2153	2064,167	3,768915
0,5	4318	4318	0	3677	3677	0	2457	2457	0



Фиг.10. Получени експериментални резултати при двустранен разбаланс на схемата със стъпка от 0,1Ω и k_{IU}=100V/V.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на получените резултати от разработената схема и направените експерименти могат да бъдат направени следните изводи:

1. Осъществено е развитие на метода с разгъващо преобразуване за работа с резистивни тензомостове чрез внедряване на инструментален усилвател в преобразувателя.
2. Изследвана е работата на преобразувателя с пет различни операционни усилвателя на компаратора.
3. Изчислена е приведената грешка от нелинейност при всички експерименти, като приведените параметри на ОУ се оказва ключови за подобряване метрологичните характеристики на преобразувателя.
4. Най-добри резултати са постигнати при използване на ОУ LF356N, като максималната приведена грешка от нелинейност е 0,116%, което е над 32% подобряване линейността на преобразувателя.
5. При увеличаване на коефициента на усилване над 10 се забелязва силно влошаване на метрологичните характеристики.
6. Получените рузултати са база за по-нататъшно усъвършенстване на преобразувателя с цел разработка на нов прототип или серийно изделие с индустриално или лабораторно приложение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация са извършени по проект НП 22/2015г. в рамките на присъщата на ТУ-Варна научноизследователска дейност, финансирана целево от държавния бюджет.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Гигов Х., „Измервателна електроника“, ТУ – Варна, 2013;

[2] Гигов Х., Стоянов С,. Станков С., Подадена заявка за Патент №111382/25.01.2013г., „Преобразувател на разбаланса на резистивен мост в честота” и публикувана в Официален бюлетин, бр.7, стр.12, Официално издание на патентно ведомство на Р. България, 2014;

[3] Славов И., „Първични преобразуватели“, Държавно издателство „ТЕХНИКА”, София, 1975;

[4] Станков, Ст., Димитрова, Е., Гигов Х., „Изследване на динамичните свойства на преобразувател с разгъващо преобразуване”, Списание Компютърни науки и комуникации, Бургас, том 2, брой 1, 2013 г., стр. 42-52, ISSN: 1314-7846;

[5] Стоянов С. и др., „Моделиране на интегратор в състава на честотен преобразувател" , НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ - 2014, том 53, серия 3.1, стр. 23-28;

[6] Стоянов С. и др., „Моделиране на грешката от неравенството на изходните напрежения на компаратор в състава на честотен преобразувател , Научни трудове на Русенския университет- 2014, том 53, серия 3.1 стр.115 – 120;

[7] http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/56672/BURR-BROWN/INA110.html;

[8] Stoyanov S., „A Line a converter of strain gauge bridge bidirectional disbalance into frequency deviation“, списание “E+E”, бр.3-4, стр. 21-26, 2014, ISSN 0861-4717;

[9] datasheetlib.com/datasheet/259065/lf411cp_ti-texas-instruments.html;

[10] www.ti.com/product/ina110;

[11] www.ti.com/lit/ds/slos011c/slos011c.pdf.

Автор: Свилен Стоянов, ас. д-р инж. от ТУ-Варна, Добруджански технологичен колеж гр. Добрич, Email adress: *svilen.stoyanov@tu-varna.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент:** доц. д-р Адриан Иванов

РЕГУЛАТОР НА ЧЕСТОТАТА НА ВЪРТЕНЕ НА ПТД

Даниел Добрилов, Ангел Цолов

Резюме: *Целта на настоящото изследване е да се осигури възможност за анализ на влиянието на възбудителния ток върху честотата на въртене на синхронен генератор, работещ на празен ход, преди да бъде включен в паралел с ЕЕС. За да се направи това е необходимо да се разработи управление на двигател-генераторна група, която да може да се управлява с ШИП. Постояннотоковия двигател трябва да се управлява, че да се симулира поведението на хидро турбина. Чрез него се цели да се регулира напрежението на постояннотоковия двигател, като така се управляват честотата на въртене на синхронната машина и отдаваната активна мощност.*
Ключови думи: *регулатор, постояннотоков двигател, управление, IGBT*

SPEED CONTROLLER FOR DC MOTOR

Daniel Dobrilov, Angel Tsolov

Abstract: *The aim of this study is to provide an opportunity to analyze the influence of the excitation current on the rotation speed of the synchronous generator on idle running before being included in parallel with the Electrical Power System. To do this it is necessary to develop a PWM controlled module for engine generator group. DC motor can be run to simulate the behavior of hydro turbine. The PWM controller regulates the voltage of the DC motor, thus manage the speed of the synchronous machine and attach active power.*
Keywords: *controller, DC motor control, IGBT*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В статията се разглежда разработен транзисторен (IGBT), регулатор на скоростта на въртене на постояннотоков двигател със смесено възбуждане. ПТМ задвижва синхронен генератор, куплиран на вала ѝ, като изпълнява ролята на турбина. По този начин се дава възможност за лесно осъществяване на цифрово управление на честотата и активната мощност на СГ.

ПТД е производство на Динамо Сливен АД, основното му предназначение е за задвижване на хидравлични машини. Параметрите на машината са дадени в табл.1.

Табл. 1

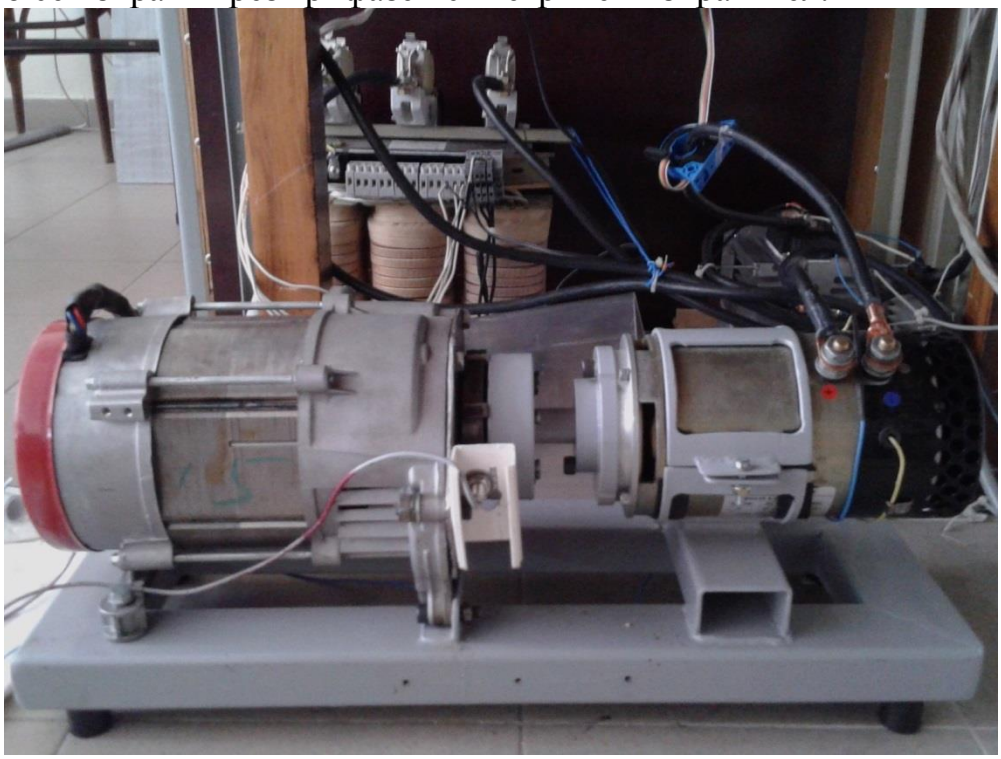
ТИП	$P_н$, *kW*	$U_н$, *V*	$I_н$, *A*	*n, min -1*	*режим*
DH 125 3.0 / 35 24	*3*	*24*	*168*	*3500*	*S2-10 min*

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ОПИСАНИЕ НА ОБЕКТА И РЕГУЛАТОРА

Двигател-генераторната група е създадена, като към постояннотоковия мотор е куплиран явнополюсен синхронен генератор с мощност 3.5kW, номинално напрежение 400V и един чифт полюси. Мрежовото напрежение за захранване на постояннотоковата машина се понижава през трифазен трансформатор 400/16V, след което се изправя през трифазен симетричен изправител.



Фиг.1. *Управляваната двигател - генераторна група*

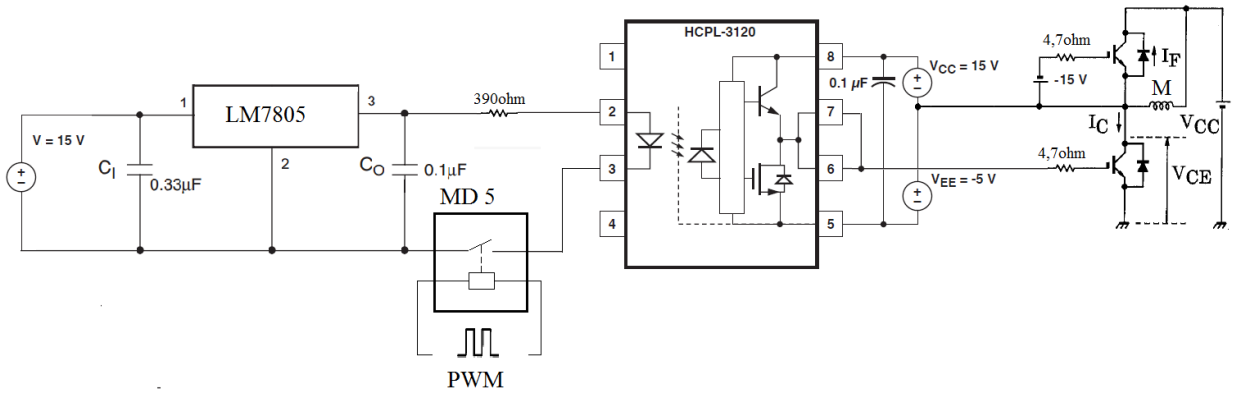
Обектът на разработката е широчинно-импулсен преобразувател ШИП на постоянно напрежение, чрез който се осъществява регулирането. Последователно с товара е свързан електронен ключ, (пълно управляем полупроводников ключов елемент - транзистор IGBT). Ако ключът се приеме за идеален, в интервала ti, когато той е затворен, моментната стойност на напрежението на товара е равна на напрежението на захранващия източник Ud, а в интервалите, когато ключът е отворен (интервалите на паузите tп), стойността на напрежението върху товара е равно на нула. Следователно изходното напрежение представлява поредица от правоъгълни импулси с постоянна амплитуда [1].

$$U_{TO} = \frac{1}{T}\int_0^{ti} U_d dt = U_d \frac{t_i}{T} = U_d.K \qquad (1)$$

Регулирането на Uто става чрез изменение на времето ti на отпушено състояние спрямо периода на превключване T, т.е. чрез изменение на коефициента на запълване на импулсите. То се реализира с изменение на интервала на проводимост ti, който се формира импулсът, а се запазва постоянен периода на превключване T.

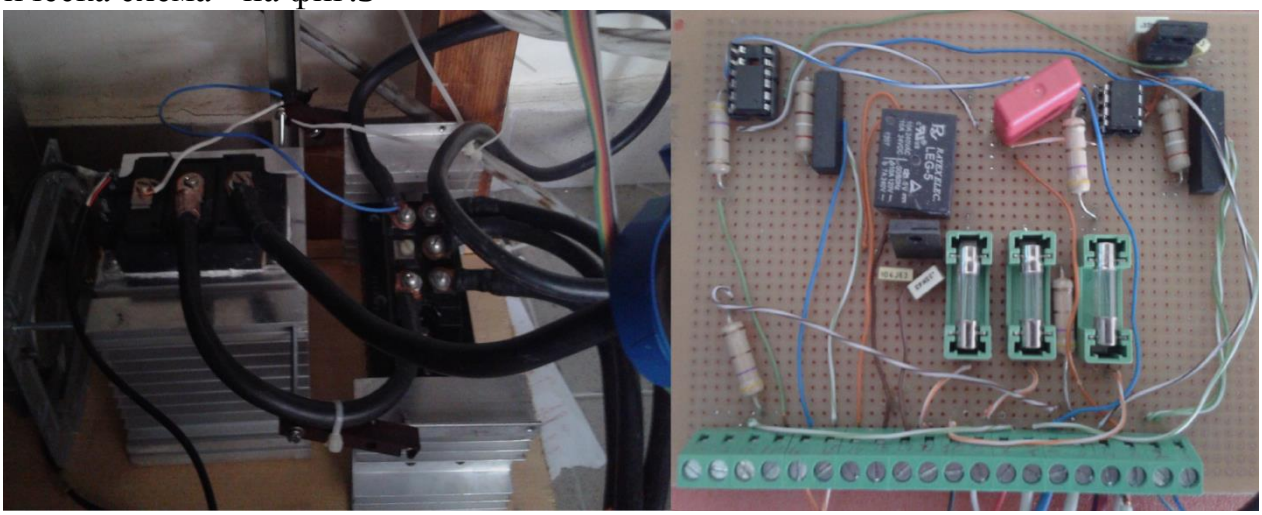
Разработеният постояннотоков регулатор е разделен на силова част и драйвер за управление. Принципната схема е показана на фиг.2. Тя се състои от:

- Захранващ блок на управляващата схема – захранването става от захранващата мрежа чрез понижаващ трансформатор и изправителна група, като се подават нива и стойности за нормалното функциониране на управляващата схема. Захранващия блок захранва управляващата схема.
- Управляваща схема - управлява електронния ключ, подава към електронния ключ поредица от импулси с постоянен период и различна продължителност.
- Електронен ключ - включва и изключва товара (РН) с период и продължителност на импулса определен от управляващата схема.
- Работни намотки - Средната стойност на напрежението (тока) формирано върху РН се изменя и позволява изменение параметрите на възбудителната система и на тока на котвата.
- Захранващ блок - става от захранващата мрежа чрез понижаващ трансформатор и изправителна група. Електронния ключ комутира подаденото захранване през РН.



Фиг.2. *Разгъната електрическа схема на регулатора*

Тъй като номиналния ток на двигателя е 168А, се използва IGBT транзистор, тип MG200Q2YS50 на фирма TOSHIBA. Транзистора има вградени обратни диоди свързани паралелно на транзисторите, това е най-общо силовата част. Снимка на разработения готов регулатор е показана на фиг.2, а пълната електрическа схема - на фиг.3



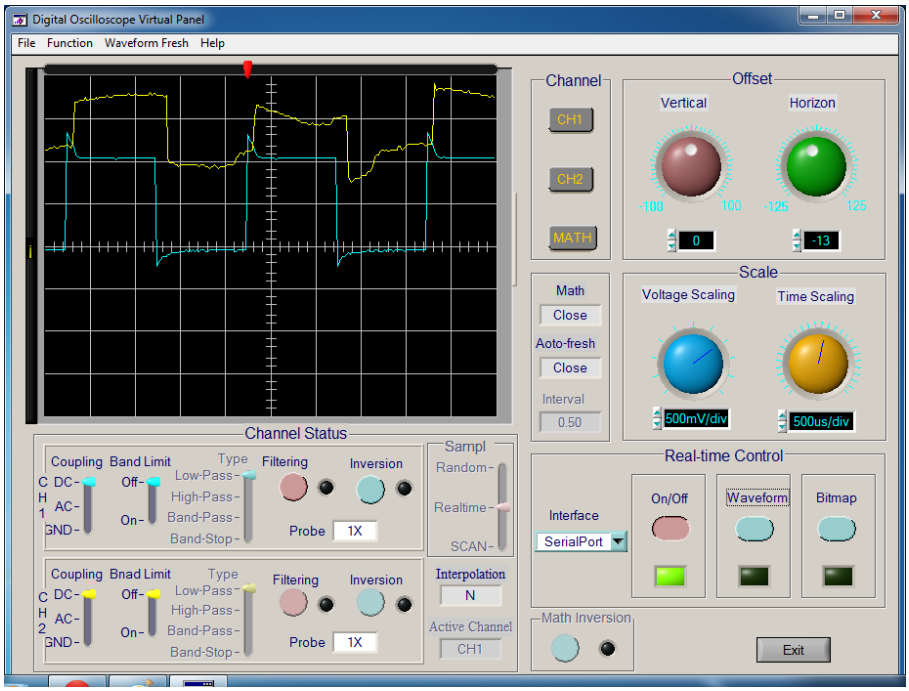
Фиг.3. *Силова и управляваща част на регулатора*

Функционални възможности

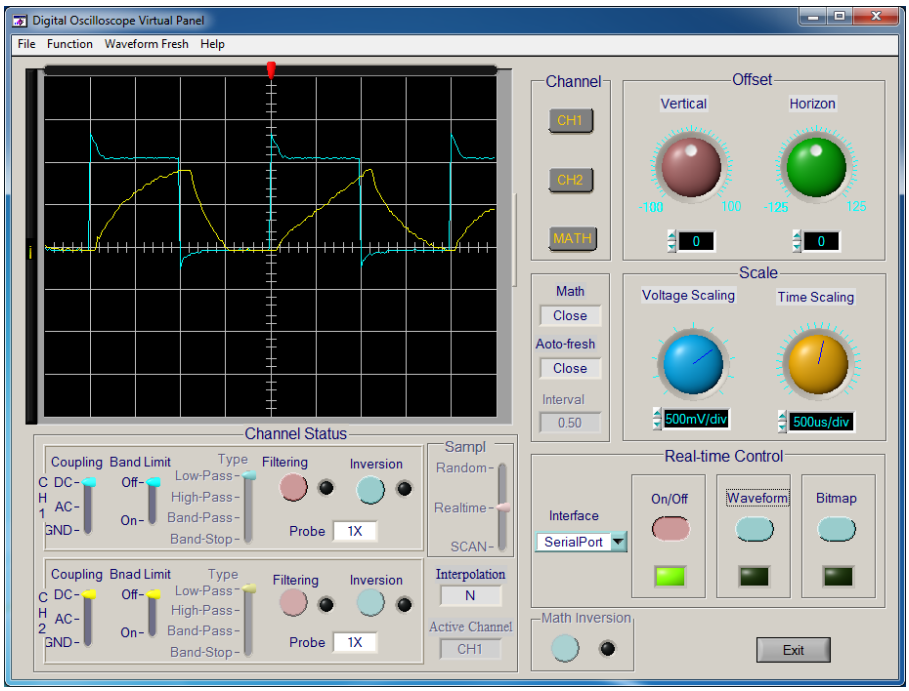
- Чрез тази PWM схема може се регулира напрежението (тока през намотките на двигателя). Диапазонът на регулиране в зависимост от подадения коефициента на запълване на импулсите е от 0,1 до 0,9 при настройваем в широк диапазон период T (функция на времеконстантите на обекта).
- Осигурява галванично разделяне от електронния ключ с помощта на оптрон тип HCPL 3120 на фирма Avago Technologies[3]с ниво на изолация от 3.75kV(rms). През него се подава сигнал на гейта на транзистора, като има галванично разделяне на силовата от управляващата част.
- Бързина на превключване на импулсите с помощта електронен ключ. В качеството на електронен ключ е използван IGBT транзистор MG200Q2YS50 на фирма TOSHIBA.
- Предвидена е възможност за широк обхват на работните режими, така че да се осигури възможност за работа под управление на цифрова система за управление с мултифункционални алгоритми на регулиране на еквивалентната механична мощност.

1. РЕЗУЛТАТИ ОТ ФИЗЧЕСКИ ТЕСТОВЕ НА РЕГУЛАТОРА

На фиг.4 и фиг.5 са показани осцилограми на тока напрежението върху намотките на постояннотоковия двигател. Анализът на получената база данни с резултати (част от които са показани като осилограми), показва че има закъснение между подадения управляващ сигнал и получената реакция на сигнала в обекта се дължи на собственото време на междинното реле MD-5. Практически това е систематична грешка която не указва влияние върху прецизността на регулирането, но трябва да бъде отчетена в алгоритмите за управление.

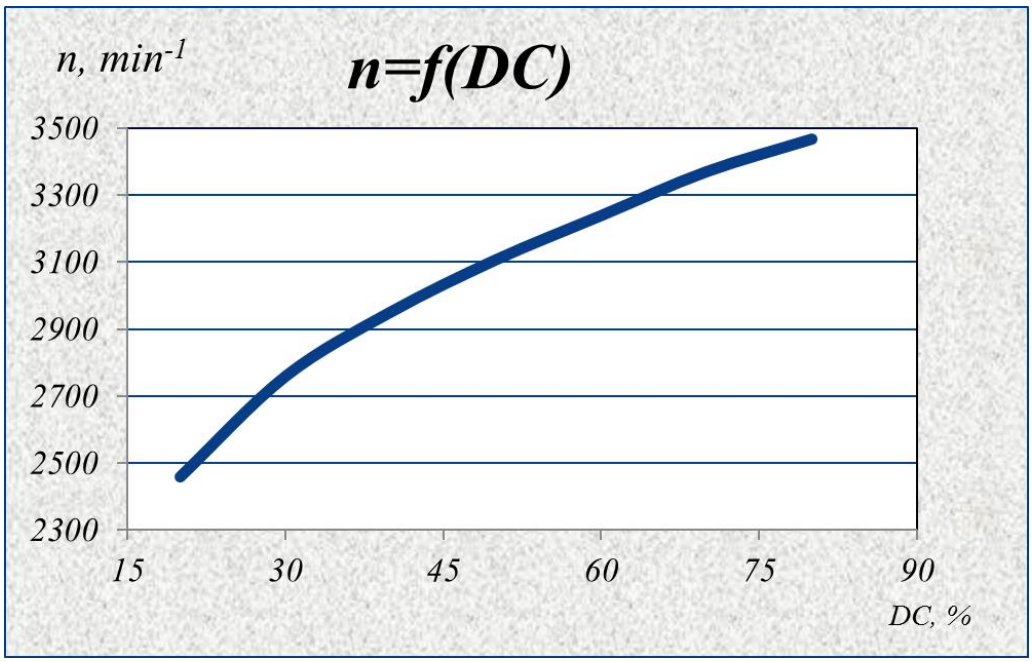


Фиг.4. *Управляващ сигнал и напрежение върху намотката на двигателя* f_{pwm} *=500Hz, DC=50%*



Фиг.5. *Управляващ сигнал и ток през намотката на двигателя* f_{pwm} *=500Hz, DC=50%*

Токът през работните намотки постояннотоковия двигател, се изменя експоненциално, дори и след прекъсване на управляващия сигнал, протича ток във веригата, който се дължи на собствената и индуктивност-режим на прекъснат ток [2].



Фиг.6. *Зависимост на честотата на въртене от коефициента на запълване*

4. ИЗВОДИ И ПРЕПОРЪКИ

Разработения регулатор в заедно със силовото електромашинно оборудване дава възможност за:

- ❖ изследване влиянието на възбудителния ток при СМ върху честотата на въртене на агрегата в процес на синхронизация;
- ❖ валидиране на алгоритми и настройки при синхронизация;
- ❖ регулиране на честота/активна мощност;
- ❖ изследване на процесите при хвърляне на товар;
- ❖ изследване на съвместна работа на СГ с УШР;
- ❖ валидиране на алгоритми за PSS на СГ;
- ❖ изследване работата на полупроводниковата част и др.

Разработеният регулатор напълно покрива очакваните резултати. Въпрос на бъдещи изследвания е съвместната му работа със СГ.

Така разработения регулатор дава възможност постояннотоковата машина от физическия модел да бъде интерпретирана, като хидротурбина от синхронен агрегат. Широкия диапазон на регулиране дава възможност за програмна настройка на съответните времеконстанти.

БЛАГОДАРНОСТИ

Тази публикация е свързана с резултатите от изследвания и разработки по проект ДФНИ Е02/8, фонд Научни изследвания към МОН на Р. България.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бобчева М и др., Преобразувателна техника,Техника, София, 2002 г.

[2] Бобчева М и др., Ръководство за проектиране на силови електронни устройства, Техника, София; 1991г.

[3] http://*www.avagotech.com/docs/AV02-0161EN*

Автори: Даниел Добрилов, маг. Инж. Докторант, катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address *dobrilow@abv.bg ;* Ангел Цолов, доц. д-р, катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *abc@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: ас. инж. Ангел Петлешков

МОДУЛНО ЗАДВИЖВАНЕ ЗА ЕЛЕКТРОМОБИЛ

Иван Миленов, Васил Димитров, Румен Баев, Венцислав Станков

Резюме: *При разработването на концепции, прототипи и серийни модели на електромобили в последно време автомобилните производители залагат на модулния принцип – отделни системи, възли и агрегати се проектират като отделни блокове (модули) със стандартизирани габарити и размери, които са взаимно заменяеми. Прилагайки тази идея и варирайки с възможни комбинации от модули, на практика се получават модели електромобили с различни технически параметри и характеристики. В доклада са представени основните моменти и резултати от разработването на двигателния модул на електромобил, осигуряващ постигането на заложените в национален проект технически параметри и характеристики. Представена е и методиката за проектиране.*
Ключови думи: *електромобил, модулно задвижване, проектиране*

MODULAR DRIVE FOR ELECTRIC VEHICLE

Ivan Milenov, Vasil Dimitrov, Rumen Baev, Vencislav Stankov

Abstract: *Recently automakers rely on the modular principle in the development of concepts, prototypes and production of models of electric vehicles - separate systems, units and assemblies are designed as separate units (modules) with standardized dimensions and sizes, which are interchangeable. Applying this idea and varying with combinations of modules, electric models with different technical parameters and characteristics are received. This paper presents highlights and results of the development of electrical drive module, ensuring the achievement of technical parameters and characteristics set in a national project. The methodology of design is also presented.*
Key words: *electric vehicle, modular drive, design*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В последните години почти всички автомобилни производители започнаха да подготвят свои концепции, прототипи и дори серийни модели на електромобили. Всички те залагат на това, че в близко бъдеще електромобилите ще могат да заемат полагащото им се място, особено в пренаселената градска среда. Там и в момента предимствата на електромобила (икономичност, екологичност, безшумност, компактност и др.) са безспорни [1-4]. За да се постигнат конкурентни цени и високо качество в съвременното автомобилопроизводство се залага на висока степен на автоматизация и роботизация. При това в широка степен е застъпена т.н. модулност - отделни системи, възли и агрегати се проекти-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

рат като отделни блокове (модули), които са със стандартизирани габарити и размери и са взаимно заменяеми. Прилагайки идеята за модулност и варирайки с възможни комбинации от различни модули, на практика се получават различни модели автомобили, имащи различни технически параметри и характеристики.

Идеята за модулност при електромобилите е в основата на спечелен проект BG161PO003-1.1.05-0254-C0001 на тема: „Разработване на опитен образец на модулен електрически автомобил“, финансиран по оперативна програма „Развитие на конкурентоспособността на българската икономика 2007-2013, процедура „Разработване на иновации от стартиращи предприятия“ от фирма „Соларлаб ООД“. Самият опитен образец се състои от няколко основни модула: акумулаторен, двигателен, купе, преден мост и др. Например акумулаторният модул може да бъде изпълнен в няколко различни варианта – с оловни тягови батерии, с литиево-йонни тягови батерии, с един или с два комплекта акумулаторни батерии, с акумулаторни батерии и суперкондензатори. По този начин се получават различни варианти (модели) на електромобили с различни възможности и характеристики. Самият конструктор има възможност да отговори на изискванията на клиенти от много по-широк спектър, съобразявайки се с желания пробег и финансовите възможности на купувача. По същия начин може да се разглежда и двигателният модул. Той е разработен в следните варианти: с един задвижващ двигател и предавка (триколка), с един задвижващ двигател без предавка (двигател колело), с два задвижващи двигателя и две предавки и с два задвижващи двигателя без предавки (хъп двигатели).

2. ПРОЕКТИРАНЕ НА ДВИГАТЕЛЕН МОДУЛ ЗА ЕЛЕКТРОМОБИЛ

В работата са представени основните моменти и резултати от разработването на двигателния модул - задвижването на електромобила. То трябва да бъде проектирано така, че да осигури постигането на заложените в проекта технически параметри и характеристики на бъдещия електромобил. В табл.1 са представени изходните данни и методиката за проектиране.

2.1. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОБЩАТА МАСА НА АВТОМОБИЛА

$$m_a = m_c + m_t + m_б + m_p = 500 + 30 + 75 + 75 = 680kg \quad (1)$$

където $m_в$ е маса на водача, $m_б = 75kg$; m_p - маса на пътника, $m_p = 75kg$.

2.2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ДИНАМИЧНИЯ И СТАТИЧНИЯ РАДИУС НА КОЛЕЛОТО

На базата на зададения размер на гумите $165/70R13$ се определя:

$$r_{ст} = 255mm = 0{,}255m; \qquad r_д = r_к = 272mm = 0{,}272m;$$

2.3. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НЕОБХОДИМАТА МОЩНОСТ ЗА ДВИЖЕНИЕ НА АВТОМОБИЛА И НА ЗАДВИЖВАЩИЯ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛ

Изчисляването на необходимата мощност за задвижване на автомобила се извършва за проектната максимална скорост на автомобила. Също така, за гарантиране на движението на автомобила със скорости $50km/h$ и $90km/h$, се

Таблица 1

Изходни данни за проектирането

Параметър	**Стойност**
Тип на автомобила	градски автомобил
Брой места	$1+1$
Максимална скорост на движение	$V_{\max} = 120km/h = 33{,}3m/s$
Собствена маса на автомобила	$m_c = 500kg$
Товароносимост (багаж)	$m_t = 30kg$
Пробег с едно зареждане на батерията	$100km$
Коефициент на въздушно съпротивление	$0{,}40$
Размер на гумите	$165/70/R13$
Габаритни размери на автомобила (дължина/ширина/височина):	$3{,}0/1{,}3/1{,}3m$
Колесна формула	4×2, задни задвижващи колела
Време за ускоряване на автомобила	$0-50km/h < 5{,}5s$
Разпределение на масата на автомобила (предна ос/задна ос)	$40/60\%$

отчита максималният допустим надлъжен наклон на пътя. Данните за наклона се вземат от Наредба №1 за проектиране на пътища [5]. Отчетените допустими максимални надлъжни наклони в зависимост от проектната скорост на пътя са: за скорост 50km/h – 7.8%, за скорост 90km/h – 5.5%.

- Съпротивление от търкаляне на колелата при движение:

$$F_f = f.m_a.g.\cos\alpha \tag{2}$$

където: α - надлъжен ъгъл на наклона на пътя; f - коефициент на съпротивление при търкаляне.

- Съпротивление от наклона на пътя:

$$F_i = m_a.g.\sin\alpha \tag{3}$$

- Съпротивление от въздуха:

$$F_v = \frac{1}{2}\rho_в.S_a.c_x.V^2 \tag{4}$$

където $\rho_в = 1{,}2041kg/m^3$ е плътност на въздуха при температура 20^oC и атмосферно налягане $101{,}325kPa$; S_a - челна площ на автомобила; c_x - коефициент на въздушно съпротивление.

- Необходима мощност за движение на автомобила:

$$P` = F_f V + F_i V + F_v V \tag{5}$$

- Необходима мощност на задвижващия електродвигател

$$P_{ел.дв.} = Kp.\frac{P_{\max}}{\eta_{тр}} \tag{6}$$

където $Kp = (1{,}0 \div 1{,}05)$ е кофициент на запаса по мощност; $\eta_{тр}$ - к.п.д. на трансмисията; приема се $Kp = 1{,}05$, $\eta_{тр} = 0{,}95$.

Крайните получени резултати за съпротивителните сили и необходимата мощност в зависимост от скоростта на движение са показани в табл.2.

Таблица 2

	F_f, N	F_i, N	F_v, N	P, kW
$V = 50km/h; \alpha = 7{,}8\%$	89,8	518,7	78,6	9,6
$V = 90km/h; \alpha = 5{,}5\%$	112,4	366,6	254,4	18,3
$V = 120km/h; \alpha = 0\%$	137,4	0	451,3	19,6

За задвижване на електромобила е избран електродвигател с мощност 20kW, тип $AC-20$ с номинално напрежение $72V$ и максимален ток $650A$. Регулируеми задвижвания с асинхронни двигатели, гарантиращи голяма претоварваща способност и високи динамични показатели намират все по-широко приложение в транспортните средства [3, 4, 6]. Задвижването на електромобили с асинхронни двигатели с честотно управление позволява:

- регулиране скоростта на задвижването в широки граници;
- намаляване на пусковите токове в двигателя и на механичните ударни въздействия при потегляне;
- елиминиране на пренапреженията при спиране на двигателя;
- намаляване на времето за откриване на неизправности, повишаване на надеждността при експлоатация и увеличаване на срока на служба на електрозадвижването.

Прилагането на векторно управление на асинхронното електрозадвижване позволява освен това и:

- плавно регулиране на скоростта при изменение на товара в широки граници;
- висока точност на автоматичното управление при оптимални енергийни показатели, намаляване разхода на енергия;
- ниски пулсации на момента, гарантиращи плавност и комфорт на движението;
- системата за управление позволява използването на максималния коефициент на сцепление при ЕТС, ако е необходимо (напр. при потегляне или изкачване на наклон), както и реализирането на устойчивост срещу буксуване.

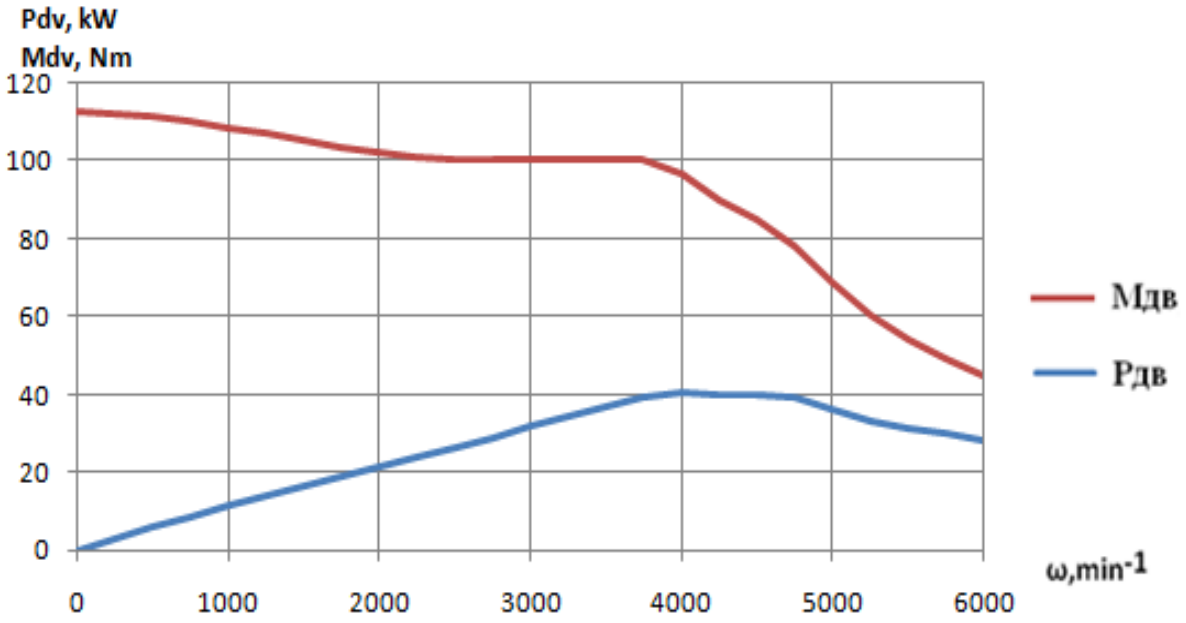
Характеристиките $P_{\max}, M_{\max} = f(\omega_{дв})$ на избрания електродвигател са показани на фиг.1.

2.4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРЕДАВАТЕЛНОТО ОТНОШЕНИЕ НА ТРАНСМИСИЯТА

Предавателното отношение на трансмисията се определя в зависимост от радиуса на задвижващите колела на автомобила и максималната честота на въртене на електродвигателя с цел постигане на проектната максимална скорост от автомобила:

$$i_{тр} = \frac{\omega_{дб\max} . r_k}{V_{\max}} = \frac{628.0{,}272}{33{,}3} = 5{,}13 \qquad (7)$$

където $\omega_{дб\max} = 628 rad/s$ е максималната честота на въртене на вала на електродвигателя.



Фиг.1. Характеристики на задвижващия електродвигател $AC-20{,}72V{,}650A$

2.5. СИЛОВ БАЛАНС НА АВТОМОБИЛА

- Определяне на теглителната сила:

$$F_T = \frac{M_{дв}.i_{тр}.\eta_{тр}}{r_к}, N \tag{8}$$

- Определяне на съпротивителната сила:

$$F_C = F_f + F_i + F_v, N. \tag{9}$$

- Определяне на максималната сцепна сила:

$$F_{сц} = \mu.m_a^{сц}.g, \tag{10}$$

където μ е коефициент на сцепление между гумата и пътя.

2.6. УСКОРЕНИЕ НА АВТОМОБИЛА

Ускорението се изчислява по следния израз:

$$a = \frac{F_T - F_C}{\gamma_j.m_a}, m/s^2 \tag{11}$$

където γ_j е коефициент, отчитащ влиянието на въртящите се маси:

$$\gamma_j = 1{,}04 + 0{,}0025.i_{тр}^2 \tag{12}$$

При заместване за скорост 50 km/h се получава $a = (1800–168{,}6)/748=2{,}18m/s^2$

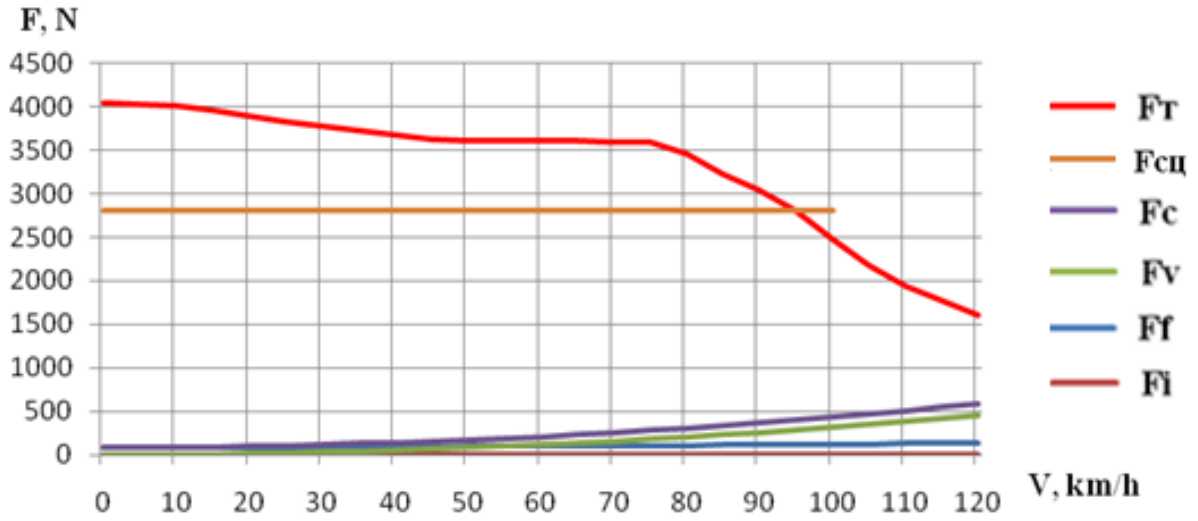
2.7. ВРЕМЕ ЗА УСКОРЕНИЕ НА АВТОМОБИЛА

Времето за ускорение на автомобила ще бъде изчислено чрез стойностите на ускорението, получени в т. 2.6 и чрез използване на зависимостта:

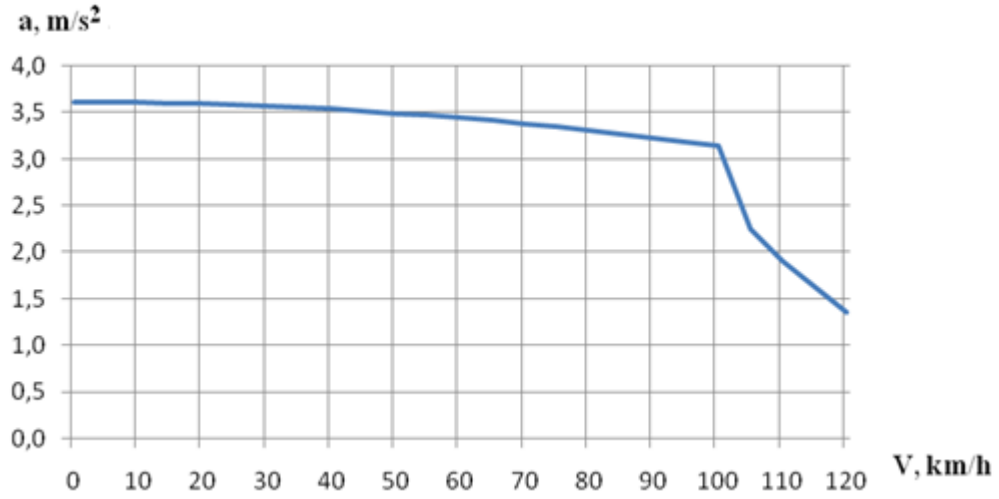
$$t = \frac{V - V_0}{a}, \tag{13}$$

където *t, s* е времето за ускорение в съответния интервал.

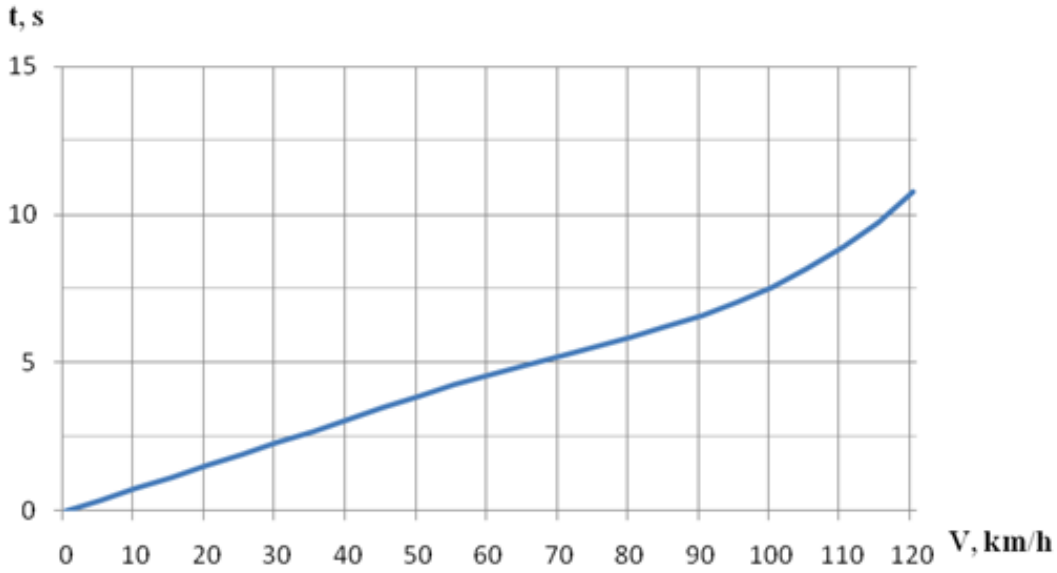
Ускорението се изчислява на интервали от 5 km/h, за скорост на движение от нула до максималната проектна скорост (120 km/h).
За достигане на скорост 50 km/h изчисленото време е 6,37s. Това време е с 0,87s по-голямо от заданието, но трябва да се отчете и фактът, че самата методика не може да даде абсолютната точност. Освен това при постигане на по-ниско тегло на електромобила (което на практика е реализирано) заложеното ускорение ще бъде по-малко от 5,5 s.
При реализиране на двигателен модул с два двигателя и две предавки се получава електромобил със значително по-добри динамични качества. Това може да се види от силовия баланс, показан на фиг.
На фиг.3 е представено в графичен вид изчисленото ускорение на автомобила при задвижване с два двигателя.
На фиг.4 е представено в графичен вид изчисленото време за ускорение на електромобила при задвижване с два двигателя.
Времето за достигане на скорост 50 km/h е 3,89s, а за 100 km/h е 7,5s.
На фиг.5 е показан прототипът на разработения модулен електромобил, а на фиг.6 . задвижващият модул с един електродвигател тип АС-20.



Фиг.2. Силов баланс на автомобила с 2 задвижващи двигателя $AC-20{,}72V{,}650A$



Фиг.3. Ускорение на автомобила с два електродвигателя $AC-20{,}72V{,}650A$



Фиг.4. Време за ускорение на автомобила с 2 електродвигателя $AC-20{,}72V{,}650A$

Фиг.5. Прототип на модулен електромобил

Фиг.6. Задвижващ модул с един електродвигател

3. ИЗВОДИ

Разработен и изпитан е двигателен модул за електромобил, който отговаря на техническото задание за проектиране.

Разработеното електрозадвижване осигурява постигането на основните технически параметри и характеристики - достигане на максималната скорост от 120 km/h и ускорение за достигане на скорост 50km/h за време 5,5 s.

Разработеният двигателен модул има висок КПД и благодарение на най-съвременното си управление има и демонстрира отлични регулировъчни качества.

Реализираният принцип на модулност позволява да се произвеждат електромобили с различни технически показатели в зависимост от интереса и желанието на клиента.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Българанов Л., И. Миленов, Г. Павлов, Ч. Джамбазки, Електрозадвижване, София, 2009

[2] Българанов Л., Електрически транспорт, ISBN 954-12-0103-2, София, 2009

[3] Давидов С., И. Миленов, Х. Иванов, Малки електромобили. ISBN 978-954-8640-16-9, София, 2012

[4] Иванов Р., И. Евтимов, Електромобили, Изд. на Русенски университет, 2012.

[5] Наредба № 1 от 26.05.2000г. за проектиране на пътища, Министерство на регионалното развитие и благоустройството, ДВ бр. 47/09.06.2000, изм. ДВ бр.102/20.12.2005, в сила от 09.12.2000

[6] Dimitrov V., Dimkina E., Dimitrova E., Research of Frequency Controlled Asynchronous Drives Applicability in Electric Vehicles-Laboratory Simulator, 5th International Conference on Experiments/ Process/ System Modeling/ Simulation/ Optimization IC-EpsMsO, Athens, Greece, 3-6 July, 2013, Proceedings, Vol. II, SET: 978-618-80527-0-3, ISBN: 978-618-80527-2-7, pp. 489 - 495

Автори: Иван Костадинов Миленов, проф. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков" - София, Email adress: *milenov55@abv.bg ;* Васил Димитров Димитров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков" - София, Email adress: *vdimitroff@abv.bg* ; Румен Баев, президент на фирма „Соларлаб ООД"; Венцислав Станков, електроинженер във фирма „Соларлаб ООД".

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. дтн Иван Ячев

ПОДОБРЯВАНЕ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ЛАБОРАТОРЕН СИМУЛАТОР ПРИ ИЗПИТАНИЯ НА АСИНХРОННО ЗАДВИЖВАНЕ

Васил Димитров, Иван Миленов

Резюме: *Съвременните електрозадвижвания се проектират на базата на високоефективни асинхронни двигатели и преобразуватели с микропроцесорни системи за управление и защита. Развитието на задвижванията поставя по-високи изисквания към научноизследователската дейност и качеството на обучение. Лабораторен симулатор за изследване на асинхронни задвижвания с честотно управление при променлив съпротивителен момент бе проектиран и разработен със съвременна елементна база. Може да се реализира адаптивно управление чрез оценка на съпротивителния момент. В доклада са предложени възможности за повишаване на ефективността на задвижването. Скоростта се измерва чрез енкодер и се повишава точността при оценката на момента.*
Ключови думи: *асинхронни задвижвания, адаптивно управление, ефективност*

IMPROVING PERFORMANCE OF LABORATORY SIMULATOR DURING ASYNCHRONOUS DRIVE TESTS

Vasil Dimitrov, Ivan Milenov

Abstract: *Contemporary electrical drives are designed on the base of energy-saving asynchronous motors controlled by highly efficient devices and microprocessor safety and control systems. The development of the electrical drives set up higher requirements of research and education quality. A laboratory simulator has been designed and built on contemporary devices. It offers various opportunities to examinate frequency controlled asynchronous drive at inconstant load torque. Opportunity to implement an adaptive control on the drive by evaluating the load torque is ensured. In this paper a possibility to increase the efficiency of the drive is proposed. An encoder reports the speed, thus the accuracy of the assessment of the load torque is increased.*
Key words: *asynchronous electrical drives, adaptive control, efficiency*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Една от основните цели в развитието на промишлеността и транспорта е повишаване на енергийната ефективност. Регулируеми променливотокови задвижвания навлизат все по-широко в промишлените предприятия и транспортните средства [1, 2, 3, 4]. Освен сериозните предимства на асинхронната машина с кафезен ротор по отношение на конструкция, цена и надеждност, развитието на електронната и измервателна техника създаде предпоставки за реализацията на регулируеми задвижвания, гарантиращи голяма претоварваща способност и ви-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

соки динамични показатели. Това налага непрекъснато повишаване нивото на специалистите, работещи в тези области, поставя по-високи изисквания по отношение на качеството на обучение на студентите, подготвяни за тези сфери. Особено е необходима засилена практическа насоченост. Изграждането на нови симулатори и макети и модернизацията на съществуващата лабораторна база са едни от важните условия за постигане на високите цели, поставени пред преподавателите в съответствие с тенденциите в развитието на образованието. В тази връзка е проектиран и изграден лабораторен симулатор за научни и инженерни изследвания на асинхронни задвижващи системи. Използвана е съвременна елементна база, показани са най-новите постижения в областта на асинхронните задвижвания в различни сфери на промишлеността и транспорта. На симулатора могат да се провеждат изпитания на задвижването в различни аспекти при променлив съпротивителен момент [5, 6, 7]. Създадена е възможност за оценка на момента и за реализиране на адаптивно управление чрез PLC [6].

2. КОНФИГУРАЦИЯ НА ЛАБОРАТОРНИЯ СИМУЛАТОР

Симулаторът за изпитания на асинхронно задвижване е реализиран със следните елементи (фиг.1):

- Трифазен асинхронен двигател (АД) с олекотена конструкция и повишена енергийна ефективност (номинални данни – табл. 1).

- Система за натоварване на двигателя, изградена от синхронен генератор СГ с вграден токоизправител, товарни реостати R_1, R_2, R_3, бутони S, B_1, B_2, контактори K_1, K_2 и регулатор на възбуждането на генератора (РВ). Генераторът е куплиран към двигателя чрез ремъчна предавка с преводно отношение $i = n_г/n_д \approx 2$. Трите реостата могат да бъдат паралелно свързани към генератора и осигуряват общ ток до 60А.

- Честотен преобразувател Sinamics G120 със силов модул PM 240, управляващ модул CU 240S, операторски панел (Basic Operator Panel – BOP) и комплект за връзка с персонален или преносим компютър.

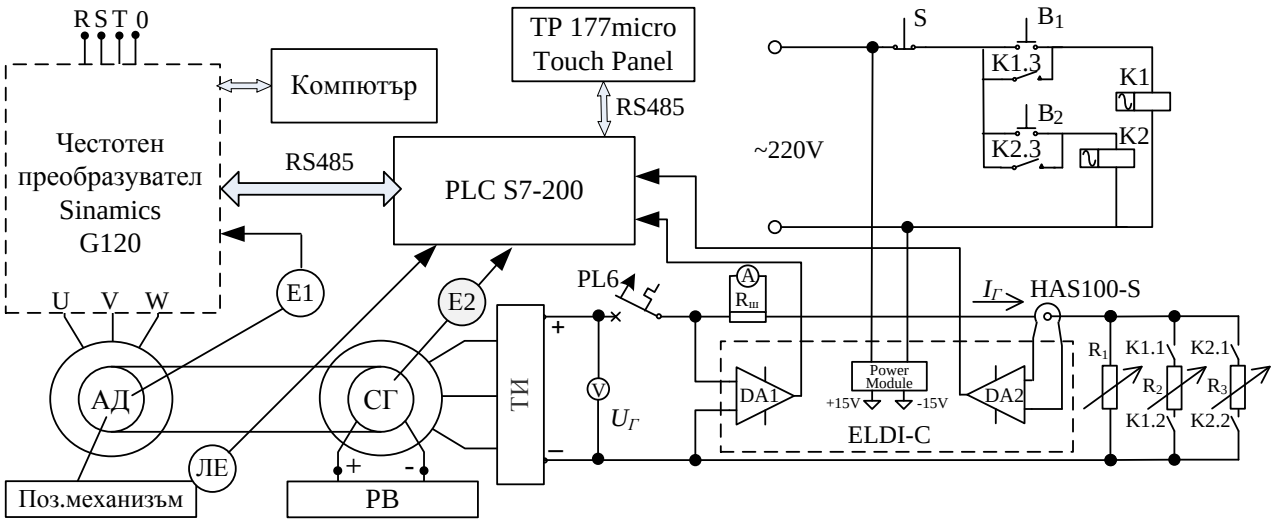
- Програмируем логически контролер PLC Simatic S7-200 224XP, свързан с CU240S на Sinamics G120 посредством интерфейс RS485.

- Информационен панел TP177 micro Touch Panel – човеко-машинен интерфейс за управление и мониторинг на задвижването.

- Позиционен механизъм, снабден с линеен енкодер (LE), свързан с PLC.

- Система за оценка на момента – във веригата на синхронния генератор са включени сензори на ток и на напрежение, свързани към аналоговите входове на PLC. Промяната на съпротивителния момент води до изменение на мощността и скоростта на въртене на синхронния генератор. Оценката на момента се реализира чрез измерване на тока и напрежението на СГ ($I_г$ и $U_г$) и изчисляване на скоростта му $n_г$ чрез измерването от енкодера (E1) по следната формула:

$$M_с = \frac{P_г}{\omega_г} = \frac{U_г.I_г}{\omega_г} = \frac{30.U_г.I_г}{\pi.n_г} = \frac{30.U_г.I_г}{\pi.i.n_д} \quad (1)$$



Фиг.1. Конфигурация на лабораторния симулатор

Таблица 1.

Номинални данни на електрическите машини

Асинхронен двигател тип **1LA7106-4AA60-Z H57** (Siemens)	
Номинално напрежение	400 VD/690 VY, 50 Hz
Номинална мощност	2,20 kW
Номинална скорост	1420 rpm
Номинален въртящ момент	14,8 Nm
Номинален ток	4,7 A (D) ; 2,7 A (Y)
Коефициент на полезно действие	82,0 %
Фактор на мощността	0,82
Материал на корпуса	Aluminum
монтиран на вала **ротационен енкодер**: rotary pulse encoder Type 1XP8 001-1 (HTL)	1024 pulses/rev. (24 VDC)
Синхронен генератор тип **SKS 112.1/10.12**	
Скорост на въртене, n	1200 / 6000 rpm
Напрежение, U	24 / 28 V
Ток, I	50 / 60 A
Мощност, P	1,2 / 1,68 kW
Възбудително напрежение, $U_{B\cdot max}$	12,5 V

Като сензор на тока $I_г$ е монтиран токов трансдусер HAS100-S. За сензор на напрежението $U_г$ се използва диференциален усилвател ELDI-C. За визуален контрол на тока и напрежението на генератора са предвидени електронни измервателни уреди. Системата за оценка на момента е монтирана на общ макет с контакторите и бутоните от системата за натоварване.

Осигурена е възможност за провеждане на изпитания на елементите от симулатора както поотделно, така и в цялост: изпитания на асинхронно задвижване с честотно управление при променлив съпротивителен момент (снемане на статични механични и регулировъчни характеристики при различен тип управление; динамични характеристики при преходни процеси пускане, спиране, промяна на заданието за скорост или на натоварването – стойностите на парамет-

рите на задвижването се следят в реално време и се снемат на компютър); изследване на сензори на ток и напрежение; изпитания на синхронен генератор; изследване на позиционни системи в различни аспекти; реализация на адаптивно управление на асинхронно задвижване чрез управляващо устройство от по-високо ниво (PLC) - програмна реализация на желана регулировъчна характеристика (тягова, скоростна и др.); решаване на оптимизационни задачи чрез промяна на параметрите на задвижването, използвайки възможностите на PLC и специализираните софтуерни продукти и др. [6,8]. Създадени са условия за непрекъснато разширяване на конфигурацията чрез допълване на нови елементи и модули.

3. ИЗПИТАНИЯ НА ЛАБОРАТОРНИЯ СИМУЛАТОР

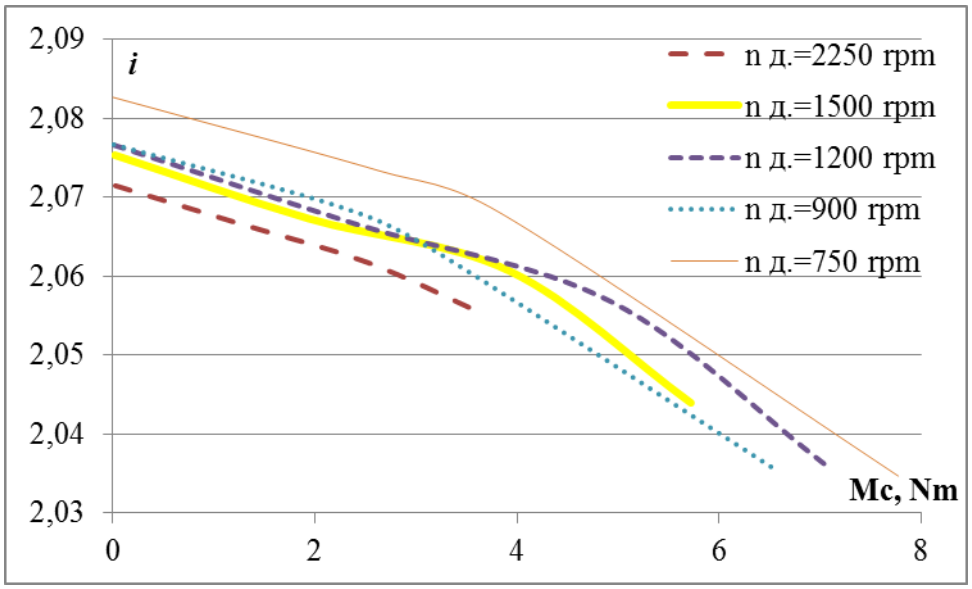
Проведени са изпитания на задвижването с цел установяване на зависимостта на преводното отношение i на ремъчната предавка и на коефициента на полезно действие η от скоростта и натоварването:

$$i = \frac{n_г}{n_д} \qquad \eta = \frac{P_г}{P_д}.100,\% \tag{2}$$

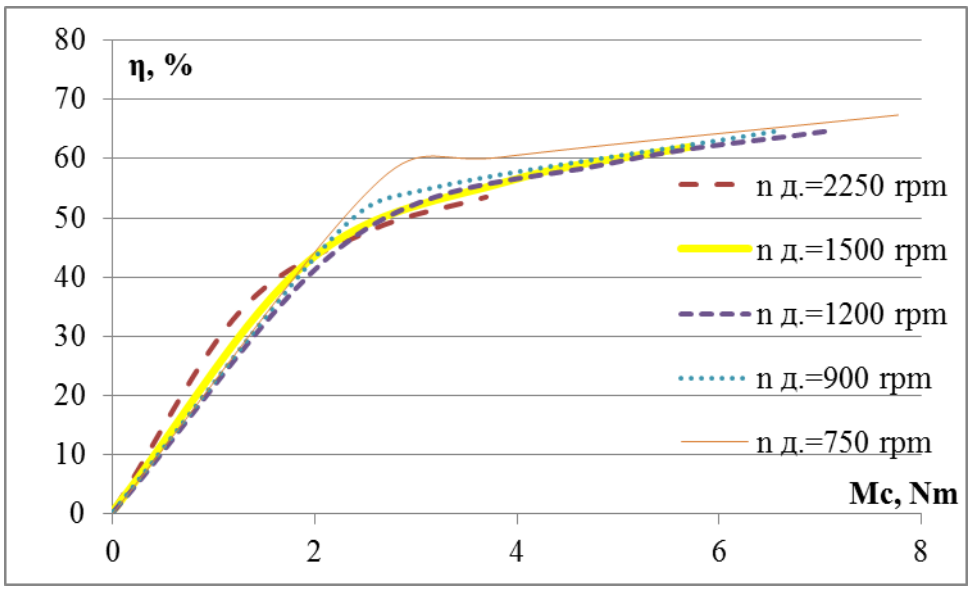
Използван е режим на векторно управление, който осигурява стабилна скорост на въртене независимо от натоварването. По този начин се свежда до минимум възможността за грешки при определяне на преводното отношение вследствие повишаването на хлъзгането на ротора на двигателя при голям товар на вала. Скоростта се измерва с Digital tachometer DT-2234A (photo type) – безконтактен цифров тахометър с клас на точност 0,05. Получените резултати са показани в графичен вид на фиг. 2 и 3.

Необходимо е да се отбележат някои конструктивни особености, които се налага да бъдат коригирани:

➢ Асинхронният двигател и генераторът са монтирани директно върху маса, на която са разположени всички останали елементи на симулатора.



Фиг.2. Преводно отношение при различни скорости и натоварване



Фиг.3. КПД при различни скорости и натоварване

Голямата площ на тази маса и дървено-металната ѝ конструкция създават предпоставки за недостатъчна стабилност на задвижването по време на провеждане на изпитанията. Забелязват се големи вибрации, особено при честоти около механичния резонанс (35 Hz).

➢ Предавката между двигателя и генератора е реализирана чрез клинов ремък и текстолитови шайби. Забелязва се увеличено триене, износване на ремъка и загряване на шайбите, особено при натоварване на задвижването. Това води до големи загуби в предавката и промяна на коефициента на предаване при различни натоварвания.

➢ Не е осигурена възможност за обтягане на ремъка. При провеждане на изпитания е нормално да настъпи след време известно разхлабване вследствие на износване, вибрации и т.н.

Всички тези особености водят до намаляване на ефективността на работа на задвижването и до получаване на неточна информация при оценката на момента. Следователно е необходимо да се усъвършенства конструкцията на лабораторния стенд и да се вземат мерки за повишаване точността при измерване на величините, които се използват за оценка на момента.

4. МОДЕРНИЗАЦИЯ НА ЛАБОРАТОРНИЯ СИМУЛАТОР

Направени са следните изменения в конструкцията на симулатора:

1) Асинхронният двигател и генераторът са монтирани върху отделен работен плот, който от своя страна е стабилно свързан към масата. По този начин вибрациите значително намаляват.

2) Двигателят е монтиран върху шейна, което дава възможност за лесно обтягане на ремъка при необходимост.

3) Сменена е шайбата на генератора - новата е изработена от метал, което води до значително намаляване на триенето и загряването.

4) Използва се назъбен ремък, характеризиращ се с по-добро сцепление, по-малко приплъзване, износване и загряване.

5) На вала на генератора е монтиран енкодер EN4000.0 IN24.0 256F със следните технически параметри [9]:

- захранващо напрежение U_C = 12-24 V (съвместимо с другите сензори);
- импулсни поредици A и B, дефазирани на 90^o – 256 ppr;
- импулсна поредица Z – 1 ppr.

Изходите на енкодера са свързани към 3 цифрови входа на PLC. Това създава предпоставки за определяне в реално време на състоянието на предавката и по-голяма точност при реализацията на адаптивно управление. При скорост на въртене на вала на генератора 6000 rpm честотата на импулсните поредици A и B е 25,6 kHz, което напълно съответства с възможностите на PLC за измерване на ъгъл на завъртане, скорост и ускорение.

Осигурена е възможност за самостоятелното изпитване на енкодера.

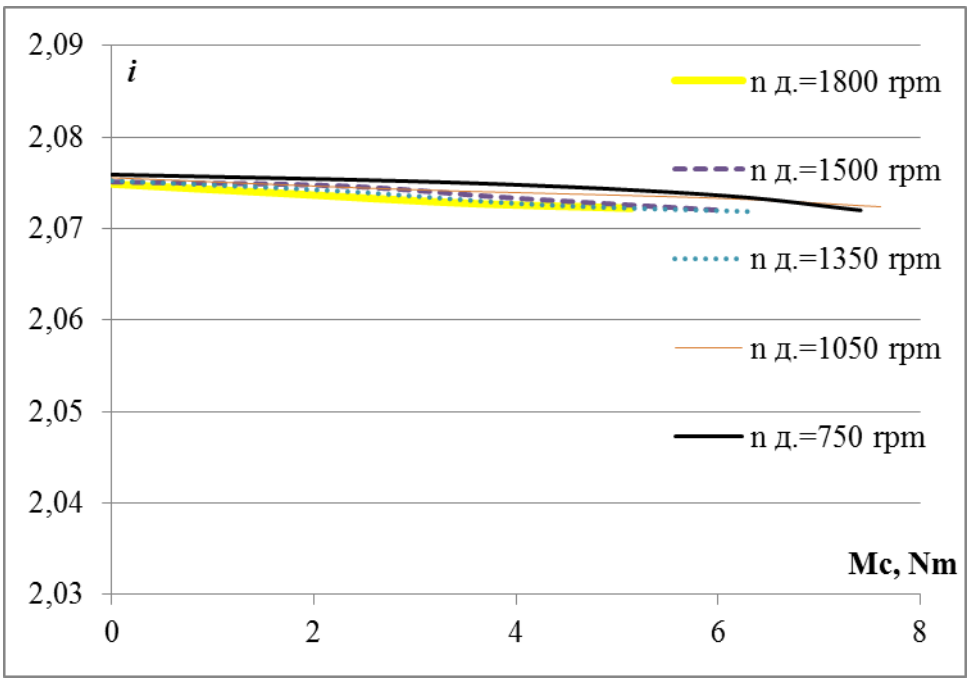
6) Предвидена е възможност за внедряване на сензор за директно измерване на момента в електрозадвижването. Той може да бъде монтиран както към вала на генератора, така и към вала на асинхронния двигател, за да дава информация за съпротивителния момент. Изходите могат да бъдат свърза-ни към PLC. Данните се изпращат в реално време към компютър [10].

Проведени са нови изпитания на задвижването след модернизацията с цел проверка на коефициентите на предаване и на полезно действие. Използван е отново режим на векторно управление. Получените графики са показани на фиг. 4 и фиг.5. Видно е, че коефициентът на предавката е много по-стабилен, изменя се в съвсем тесни граници. Може да се приеме средна стойност $i=2,075$, която с достатъчна точност да се използва за определяне на скоростта в целия диапазон. КПД се повишава. Забелязва се значително намаляване на вибрациите и на загряването на ремъка и шайбите. Внедряването на енкодер E2 позволява много по-точно определяне в реално време на съпротивителния момент по израза (1). Това е особено необходимо при реализация на адаптивно управление, тъй като значително се намалява вероятността за подаване на неподходящо управляващо въздействие от страна на PLC [6, 8].

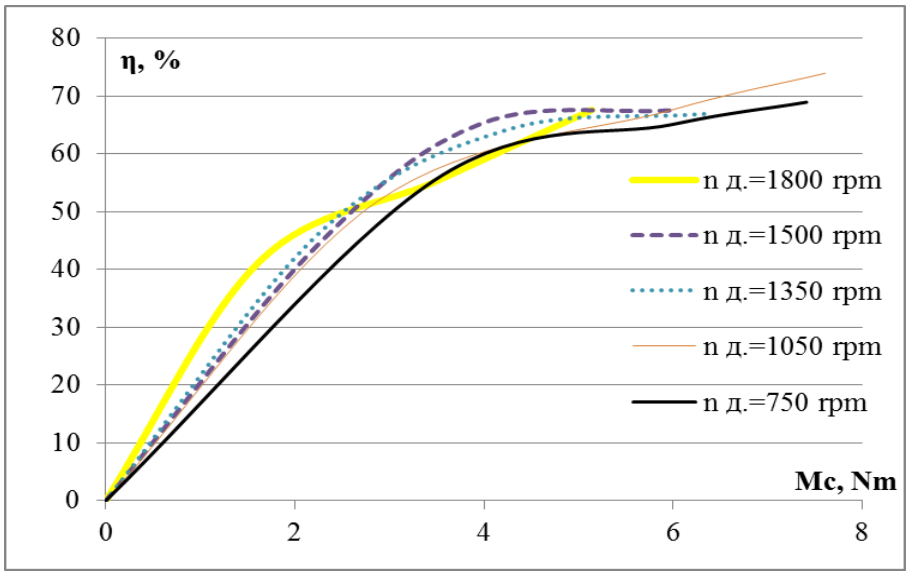
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бързото развитие на промишлената електроника, измервателната техника и транспортните технологии изисква непрекъснато повишаване на нивото на специалистите, работещи в тези области. Необходимо е високо качество на подготовка на студентите, които ще се внедряват в такива сфери. Обучението на специалисти за проектиране, изграждане и работа със съвременни системи за управление на асинхронни задвижвания е в съответствие с тенденциите в развитието на образованието, тъй като тези системи намират все по-широко приложение в различни области на промишлеността и транспорта.

Предпоставка за подготовка на кадри с високо ниво на квалификация е наличието на съвременни лабораторни стендове. В настоящия доклад е направена модернизация на съществуващ симулатор с цел подобряване на характеристиките и повишаване на възможностите за провеждане на лабораторни упражнения и експерименти.



Фиг.4. Коефициент на предавката на симулатора след модернизацията



Фиг.5. КПД след модернизацията

Проведени са изпитания на задвижването преди и след модернизацията, които показват значително по-стабилна и ефективна работа на симулатора. Това е особено необходимо при научните изследвания, тъй като адаптивното управление се базира на информация за контролираните величини ток, напрежение и скорост. Монтирането на енкодер към вала на синхронния генератор и свързването му към PLC гарантира точно измерване на скоростта и следователно много по-малка грешка при изчислението на съпротивителния момент. Освен това позволява контрол на състоянието на ремъчната предавка чрез сравняване в реално време на скоростите на двигателя и генератора, както и незабавно спиране на задвижването при аварийна ситуация.

Симулаторът представлява многоконтурна система за автоматично управление, с висока точност на измерване на контролираните величини в реално време. Та-

кива са значителна част от съвременните системи за управление на асинхронни задвижвания, реализиращи векторно управление, които намират все по-широко приложение в електрическите транспортни средства и в различни сфери на промишлеността.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Българанов Л., И. Миленов, Г. Павлов, Ч. Джамбазки, Електрозадвижване, София, 2009

[2] Стоянов П., Управление и защита на асинхронни двигатели, справочник, Schneider Electric, 2009

[3] Търпов И., Павлов Г., Железопътен мениджмънт в електро-потреблението, Научно списание "Механика, Транспорт, Комуникации", ISSN 1312-3823, том 11, брой 3, 2013 г., статия № 0896, стр. DS-166 – DS-172

[4] Павлов Г., М. Томчева, И. Търпов. Експериментално изследване на енергетичните параметри на модернизиран тиристорен локомотив серия 46-200, Научно списание "Механика, Транспорт, Комуникации", ISSN 1312-3823, том 12, брой 1, 2014 г., статия № 0929, стр. X-1 – X-6

[5] Dimitrov V., Dimkina E., Dimitrova E., Research of Frequency Controlled Asynchronous Drives Applicability in Electric Vehicles-Laboratory Simulator, 5th Int. Conf. EpsMsO, Athens, Greece, 3-6 July, 2013, Proceedings, Vol. II, SET: 978-618-80527-0-3, ISBN: 978-618-80527-2-7, pp. 489 - 495

[6] Димитров В., Адаптивно управление на тягови задвижвания - лабораторен симулатор, Годишник на Технически Университет - София, ISSN 1311-0829, т. 63, кн. 5, 2013, V-та конференция на електротехнически факултет „ЕФ 2013", 2 - 5 септември 2013 г., Созопол, България, стр. 155-162

[7] Dimitrov V., E. Dimitrova, Research of PWM pulse frequency influence on the asynchronous drives characteristics – laboratory simulator, сп. Електротехника и електроника „E+E", Vol. 48, ISSN 0861-4717, No 9-10/2013, pp. 37 – 44

[8] Димитрова Е., Г. Чернева, Моделиране на процеса на управление на технически системи, Научно списание "Механика, Транспорт, Комуникации", Международна научна конференция "ТРАНСПОРТ - 2013", ISSN 1312-3823, том 11, брой 3, 2013 г., статия № 0877, стр. DS-41 – DS-46

[9] Rotary encoders, Technical Specifications, available at: *http://spektrum-bg.com/index.php?op=incremental_encoders*

[10] Rotary Torque Sensors TRD, TRH, TRS 600/ 605/ 705 Series, Operating Manual, Futek, 2012, available at: *http://futek.com*

Автори: Васил Димитров Димитров, доц. д-р инж., кат. „ЕЕТ", ВТУ „Т. Каблешков"-София, Email adress: *vdimitroff@abv.bg* ; Иван Костадинов Миленов, проф. д-р инж., кат. „ЕЕТ", ВТУ „Т. Каблешков"-София, Email adress: *milenov55@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Радослав Спасов

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СИСТЕМА С ТОРОИДАЛЕН ФЕРИТ

Валентин Матеев, Мигленна Тодорова, Илиана Маринова

Резюме: *В тази статия е представен компютърен модел на феритен материал с тороидална форма. Изследването е реализирано с магнитостатични и квазистационарни модели, разработени в среда на програмата Ansys Maxwell 16.0. Получени са резултати за: разпределението на векторите на интензитета на магнитното поле; разпределението на магнитната индукция по повърхността на ядрото на феритния материал, разпределението на токовата плътност по повърхността на намотката на тороидалния ферит. Изследвано е динамичното изменение на индуктираното напрежение и загубите във феритното ядро и намагнитващата намотка. Реализирана е оценка на хомогенността на полето във ферита. Получените резултати са сравнени с експериментално измерени данни.*
Ключови думи: *компютърно моделиране, магнитен материал, ферит, магнитостатичен модел, квазистационарен модел*

COMPUTER MODELING OF AN ELECTROMAGNETIC SYSTEM WITH A TOROIDAL FERRITE

Valentin Mateev, Miglenna Todorova, Iliana Marinova

Abstract: *In this paper a computer modeling of a ferrite material with a toroidal shape is presented. The study is performed with magnetostatic and transient models, which are developed in an environment of the programme Ansys Maxwell 16.0. Results for the distribution of the vectors of the intensity of the magnetic field, results for the distribution of the magnetic induction on the surface of the core of the ferrite material and results for the distribution of the electric current density on the coil's surface of the toroidal ferrite are obtained. The dynamic variations of the induced voltage and of the losses in both the ferrite core and the magnetizing coil are investigated. An evaluation of the homogeneity of the field in the ferrite is implemented. The results are compared with an experimentally measured data.*
Keywords: *computer modeling, magnetic material, ferrite, magnetostatic model, transient model*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Компютърното моделиране е важен етап от процеса на проектирането на едно работоспособно електромагнитно устройство в експлоатационна среда. В това число компютърното моделиране на електромагнитни системи не прави изклю-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

чение. Моделирането на електромагнитните системи в съчетание с магнитни материали позволява да се разбере тяхното поведение в различни режими на работа на устройства, съдържащи такива системи в себе си.

Приложенията на магнитните материали в електротехниката, електрониката, автоматиката, информационните технологии и други области на науката непрекъснато нарастват. Едни от най-широко разпространените магнитни материали са феритите.

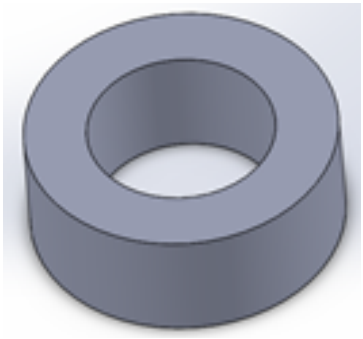
Феритите представляват керамични материали, съставени от химически свързани железни оксиди и един или няколко метални елемента. Магнитно меките феритни материали се характеризират със сравнително голяма намагнитеност на насищане, малък коерцитивен интензитет, малка площ на хистерезисната крива и респективно малки загуби от пренамагнитване. Специфичната проводимост на феритите е много голяма, което ги прави особено подходящи за работа при високи честоти, тъй като загубите от вихрови токове са пренебрежимо малки. Съществено предимство на феритите е, че изработването на магнитопроводи е просто и евтино, като лесно се изготвят сложни конструкции. Феритните материали намират широко приложение като електронни компоненти, индуктори, трансформатори, сензори и др. [1-2]

В тази статия е извършено компютърно моделиране на реален феритен материал с тороидална форма. Получени са резултати за разпределението на векторите на магнитния интензитет в ядрото на изследвания ферит, резултати за разпределението на магнитната индукция по повърхността на ядрото на феритния материал, резултати за разпределението на токовата плътност по повърхността на намотката на тороидалния ферит при магнитостатичен модел. Също така в статията са посочени резултати за изменението на индуктираното напрежение и тока във времето и резултати за зависимостта на загубите във феритното ядро от времето при квазистационарен модел. Оценката на хомогенността на полето на ферита е реализирана с помощта на софтуерната програма Ansys Maxwell 16.0 при магнитостатичен и квазистационарен модели.

2. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследване е тороидален образец от феритен материал с възбудителна намотка, равномерно навита върху него.

Геометрията на модела на тороид с възбудителна намотка е построена в среда на ***SolidWorks***.



Фиг.1. Геометрия на тороидален ферит

Фиг.2. Пълна геометрия на ферита с намотка с 20 навивки

Геометрията на магнитопровода представлява тороид с правоъгълно сечение (фиг.1). Тороидът има външен диаметър 16 mm, вътрешен диаметър 9.6 mm и височина 6.3 mm. На фиг.2 е показана пълната геометрия на модела на тороидалния ферит **R16/9.6/6.3** с намотка с 20 навивики, равномерно навита около него.

3. ОСНОВНИ УРАВНЕНИЯ ЗА АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ

При нестационарен процес, линейност на средите (μ=const., γ=const.) и въвеждане на калибровъчното условие на Лоренц уравнението спрямо магнитния вектор-потенциал **A** е:

$$\nabla^2 \boldsymbol{A} - \mu\gamma \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} = -\mu \boldsymbol{J}_e \qquad (1)$$

където **μ** е магнитната проницаемост, **γ** е специфичната електрическа проводимост и $\mathbf{J_e}$ представлява токовата плътност на външните източници.

За оценка на разпределението на токовата плътност в обема на проводника служи т.нар. *дълбочина на проникване*, която в случай на периодично изменение на тока има вида:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}} \qquad (2)$$

където **ω** е ъгловата честота.

В случай на синусоидално изменение на величините уравнението (2) може да се запише чрез комплексни образи във вида:

$$\nabla^2 \dot{\boldsymbol{A}} - j\omega\mu\gamma\dot{\boldsymbol{A}} = -\mu \dot{\boldsymbol{J}}_e \qquad (3)$$

Уравнение (3) се нарича *уравнение на Хелмхолтц*. При него чрез комплексните образи се избягва решаването на задачата във времето. [4]

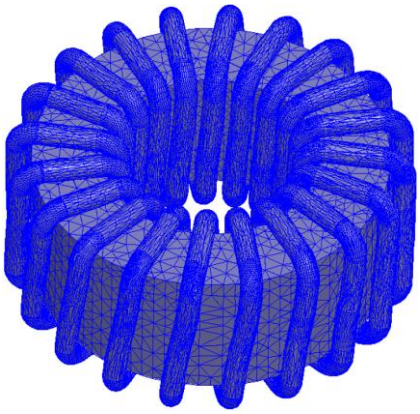
Симулацията на модела се извършва с помощта на ***Ansys Maxwell 16.0*** за решаването на магнитостатична и квазистационарна задачи.

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ КОМПЮТЪРНОТО МОДЕЛИРАНЕ

Резултатите от компютърното моделиране при магнитостатичната задача са получени при феритно ядро тип **R16/9.6/6.3**, намотка с диаметър 1mm, 20 навивки и намагнитващ ток 0.05A. Фигури от фиг.4 до фиг.10 показват решения на изследвания ферит при магнитостатичен модел.

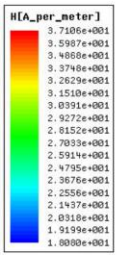
Резултатите от компютърното моделиране при квазистационарната задача са получени за същия ферит, но разликата при тази задача е, че намотката, навита равномерно около изследвания тороидален ферит, има 5 навивки. Фиг.10, фиг.11 и фиг.12 показват решения на изследвания ферит при квазистационарен модел. Честотата на изменение на захранващото напрежение е 10 kHz с амплитуда 1 V, която се увеличава по експоненциален закон.

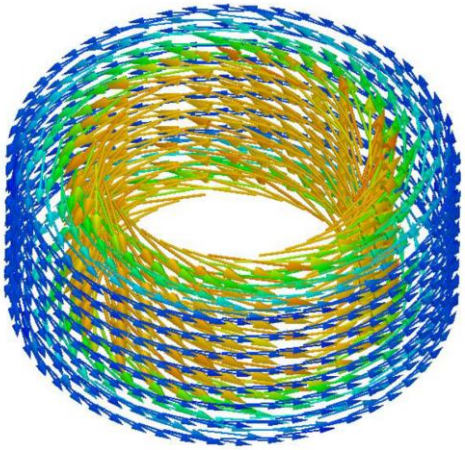
Мрежата от крайни елементи на изследвания тороидален ферит е показана на фиг.3.



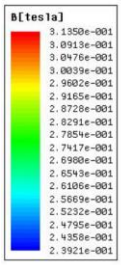
Фиг.3. Мрежа от крайни елементи с общ брой 367770 при тороидалния ферит R16/9.6/6.3 при магнитостатичен модел

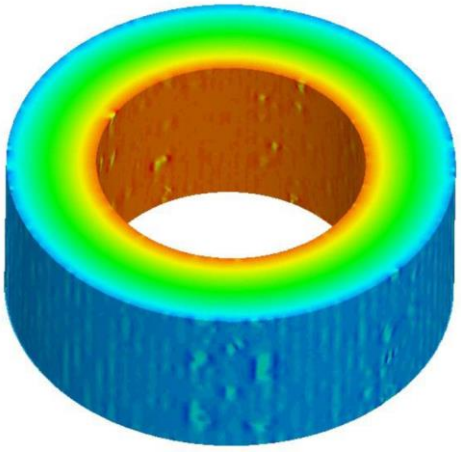
На фиг.3 е дадена дискретизацията от крайни елементи в областта на изследвания обект, който в нашия случай е магнитно мек феритен тороидален материал **R16/9.6/6.3**. Вижда се, че мрежата от крайни елементи е сгъстена, което повишава точността на решението на магнитостатичния модел. Крайните елементи имат общ брой 367770. На фиг.4 и фиг.5 са показани съответно векторите на магнитния интензитет в ядрото на ферита и разпределението на магнитната индукция по повърхността на ядрото на изследвания ферит.





Фиг.4. Вектори на магнитния интензитет в ядрото на тороидалния ферит R16/9.6/6.3.



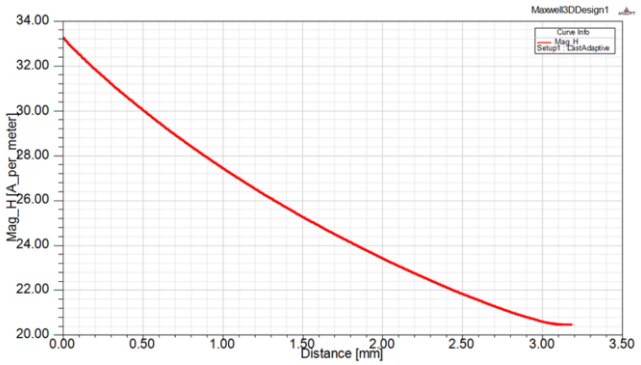


Фиг.5. Разпределение на магнитната индукция по повърхността на ядрото на тороидалния ферит R16/9.6/6.3.

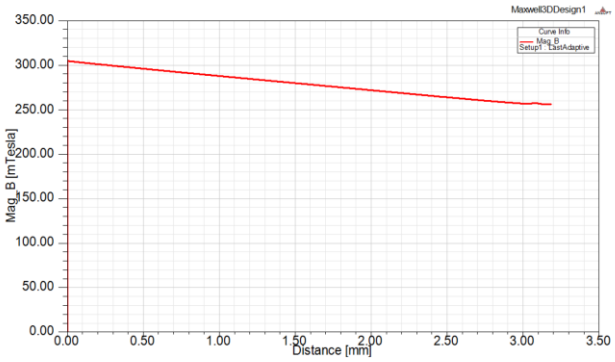
На фиг. 4 е показана посоката на векторите на магнитния интензитет в ядрото на изследвания тороидален ферит. От 3D визуализацията на модела може да се направи заключението, че интензитетът е по-голям в центъра на ядрото, като той започва да намалява с приближаване към периферията на ядрото. Интензитетът има най-голяма стойност, когато магнитното съпротивление е най-малко, а то има най-малка стойност там, където магнитната линия е най-къса. Това твърдение потвърждава, че в центъра на ядрото на ферита минава най-голям магнитен поток.

Фиг.5 показва визуализация на разпределението на магнитната индукция по повърхността на ядрото. Магнитната индукция има по-големи стойности в центъра на ядрото и по-малки стойности по периферията на феритния материал. Тъй като магнитната индукция, магнитният интензитет и магнитната проницае-

мост са свързани с отношението: $B = \mu.H$, то тогава, когато се увеличава стойността на магнитния интензитет - ще се увеличи и стойността на магнитната индукция. Фиг.6 и фиг.7 показват графичното представяне на интензитета и магнитната индукция по ширината на ядрото на тороидалната феритна проба.



Фиг.6. Изменение на магнитния интензитет по ширината на тороидалната феритна проба.

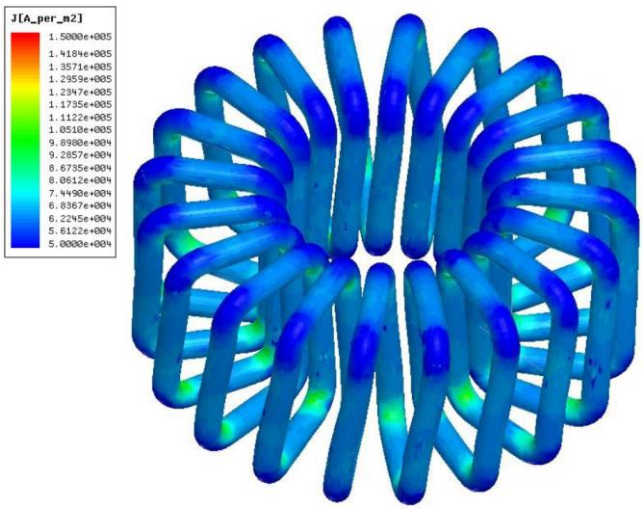


Фиг.7. Изменение на магнитната индукция по ширината на тороидалната феритна проба.

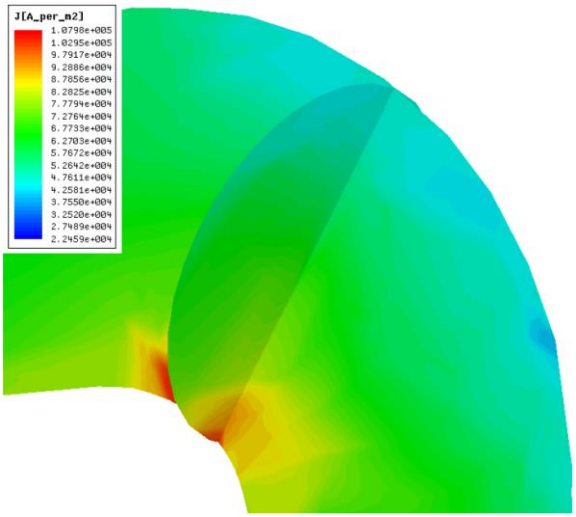
Графичното представяне на изменението на магнитния интензитет по ширината на ядрото на ферит **R16/9.6/6.3** е показано на фиг.6. Тази графика потвърждава твърдението, посочено в анализа за фиг.4, че стойностите на магнитния интензитет започват да намаляват от центъра към периферията на феритната сърцевина на тороидалния магнитен материал.

Графичното представяне на изменението на магнитната индукция по ширината на ядрото на изследвания ферит е показано на фиг.7. Анализът е аналогичен на този за фиг.6, но само че става въпрос за магнитната индукция.

На фиг.8 е дадено разпределението на токовата плътност по повърхността на намотката на ферит **R16/9.6/6.3** и на фиг.9 е дадено разпределението на токовата плътност в надлъжно и напречно сечения на една навивка на намотката на феритната проба.



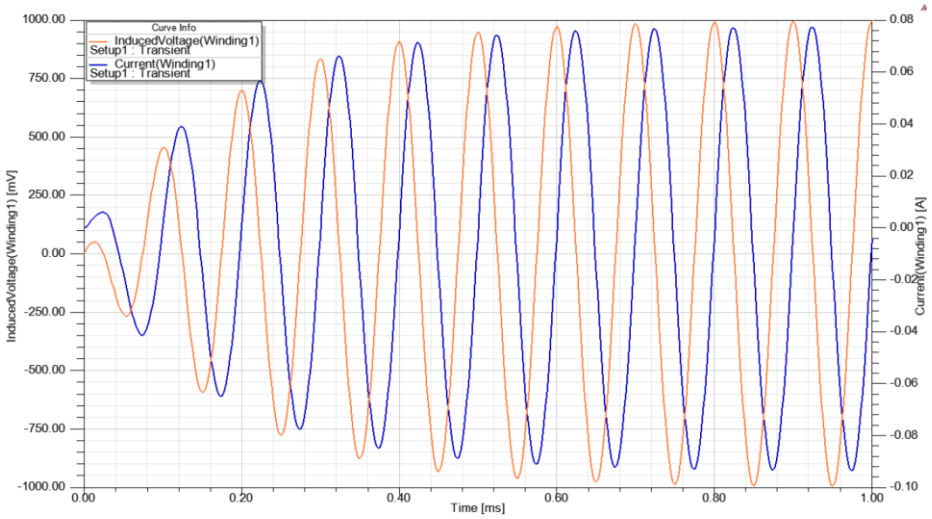
Фиг.8. . Разпределение на токовата плътност по повърхността на намотка с 20 навивки на тороидалния ферит R16/9.6/6.3.



Фиг.9. Разпределение на токоватата плътност в надлъжното и напречното сечения на проводника в областта на огъване.

От фиг.8 се вижда, че токовата плътност в мястото на огъване на проводника се променя в зависимост от радиуса на огъване. Токовата плътност има най-голяма стойност при най-малкия радиус на огъване на проводника. Това се дължи на по-ниската стойност на съпротивлението на проводника, поради това, че именно там е най-късият път за тока. Аналогично, токовата плътност има най-малка стойност при най-големия радиус на огъване на проводника.

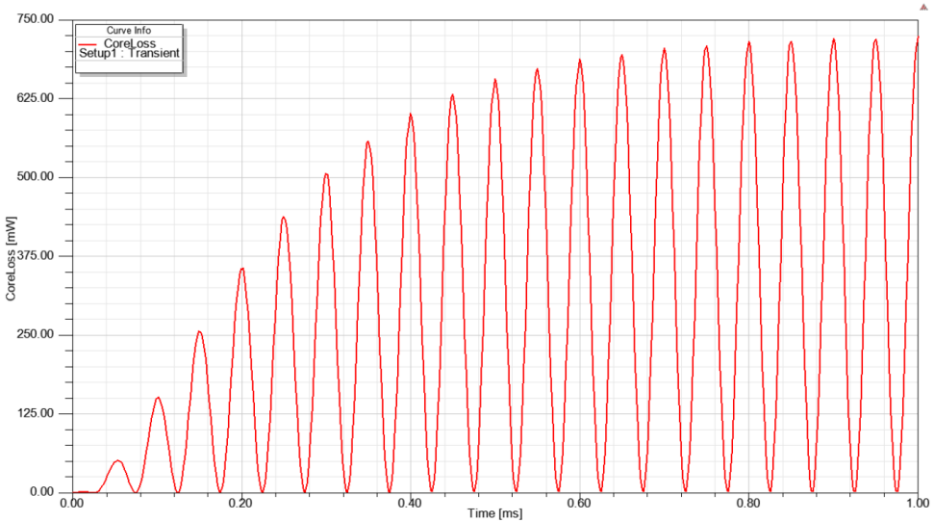
Изменението на индуктираното напрежение и тока в намотката, имаща 5 навивки, във функция от времето е показано на фиг.10 при квазистационарния модел. Индуктираното напрежение съвпада напълно със захранващото, поради което последното не е показано.



Фиг.10. Изменение на амплитудните стойности на индуктираното напрежение и тока в намотката във функция от времето при квазистационарен модел.

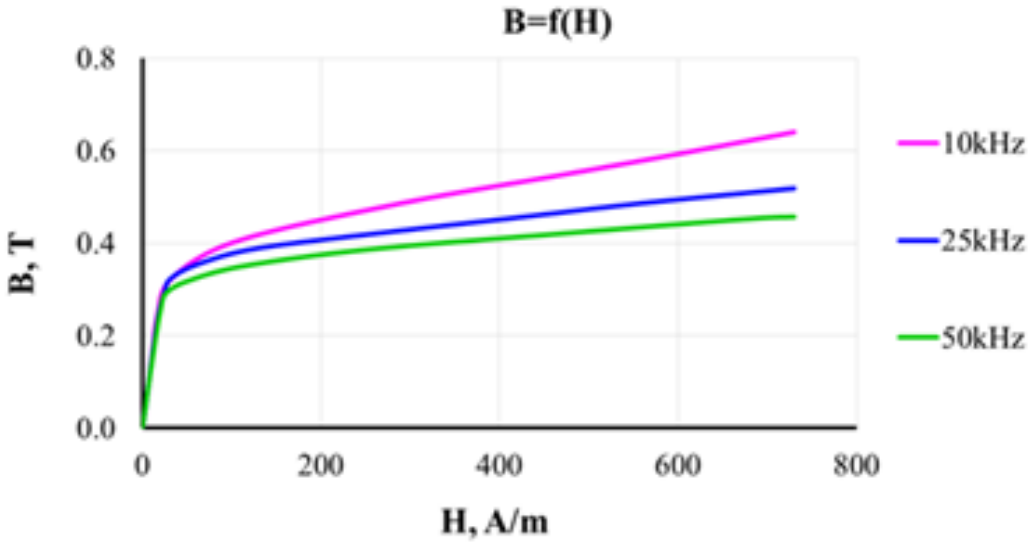
От фиг.10 се вижда, че токът е дефазиран от захранващото и индуктираното напрежение, като неговата амплитуда се увеличава пропорционално на напрежението и достига до амплитудна стойност 0.078 A.

Зависимостта на изменението на загубите в ядрото от времето са показани на фиг.11. Амплитудната стойност на загубите в ядрото е P=715 mW при интензитет на полето H=122 A/m и индукция B=0.413 T.



Фиг.11. Зависимост на амплитудните стойности на загубите в ядрото от времето при квазистационарния модел.

На фиг.12 е показана кривата на намагнитване, която е измерена при три различни честоти: 10 kHz, 25 kHz и 50 kHz на ферит **R16/9.6/6.3**. Стойностите на кривата на намагнитване са получени от измервателна система [5-6], специално разработена за измерване на магнитните характеристики на тороидални феритни материали.



Фиг.12. Крива на намагнитване за изследвания ферит R16/9.6/6.3 при амплитудни стойности на индукцията и интензитета при квазистационарния модел

От фиг.12 се вижда, че индукцията на насищане намалява с увеличаване на честотата поради увеличаването на хистерезисните загуби и загубите от вихрови токове.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тази статия е извършено компютърно моделиране на феритен материал с тороидална форма, като геометрията на изследвания ферит е направена с програмата SolidWorks. Получените резултати са: за разпределението на векторите на магнитния интензитет в ядрото на изследвания ферит, за разпределението на магнитната индукция по повърхността на ядрото на феритния материал, за разпределението на токовата плътност по повърхността на намотката на тороидалния ферит. Също така в статията са посочени резултати за изменението на индуктираното напрежение и тока във времето и резултати за зависимостта на загубите във феритното ядро от времето. Оценката на хомогенността на полето на ферита е реализирана с помощта на програма Ansys Maxwell 16.0 при магнитостатичен и квазистационарен модели на изследвания феритен образец, имащ тороидална форма.

От получените резултати при магнитостатичния модел следва, че разпределението на магнитната индукция, магнитния интензитет, токовата плътност зависят от геометрията и размерите на ферита, захранващите ток и напрежение към проводника и други.

Решението на квазистационарния модел показва, че намагнитващият ток е пропорционален на захранващото напрежение, като токът е дефазиран спрямо напрежението на ъгъл, равен на 90°.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Sørsdahl T., ***Magnetic design for high temperature, high frequency SiC power electronics***, Norwegian University of Science and Technology - Trondheim, Department of Electric Power Engineering, July 2013, p.22.

[2] М. А. Розенблат, ***Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники***, Наука, Москва, 1974, стр. 768.

[3] Ячев И., Маринова И., ***Числени методи и моделиране на вериги и полета - I част***, Издателство на Технически университет – София, 2011, сс.9-37.

[4] Методиев С., Тодорова М., Матеев В., Маринова И., ***Система за експериментално изследване на характеристиките на магнитни материали при висока честота***, VI Научна Конференция, 15-17 септември, Созопол, България, 2014, сс.361-368.

[5] Тодорова М., Методиев С., Маринова И., Матеев В., ***Измерване на характеристиките на магнитни материали при висока честота***, VI Научна Конференция, 15-17 септември, Созопол, България, 2014 година, сс.369-376.

Автори: Валентин Матеев, гл. ас. д-р инж., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vmateev@tu-sofia.bg*; Мигленна Тодорова, маг. инж., докторант, катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *miglenna_todorova@abv.bg*; Илиана Маринова, проф. дтн инж., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *iliana@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Никола Трифонов

АЛГОРИТЪМ ЗА ТЯГОВИ ИЗЧИСЛЕНИЯ ПРИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЛАКОВ ПОДВИЖЕН СЪСТАВ

Иван Ангелов, Петър Матов, Николай Матанов

Резюме: *Представен е алгоритъм за тягови изчисления на скорост, път, време и мощност при движение на влак с електрически локомотив. След съставяне на графика за движение на влаковете може да се получат резултати за среден ток, средноквадратичен ток, моментна и средноквадратична мощност на захранващите фидери. На базата на получените резултати може да се избира мощността на тяговите трансформатори или да се определя минималното напрежение на токоприемника при движение по участъка.*

Ключови думи: *тягови изчисления, мощност, тягов трансформатор*

ALGORITHM FOR TRACTION CALCULATIONS AT ELECTRICAL TRAIN ROLLING STOCK

Ivan Angelov, Peter Matov, Nikolay Matanov

Abstract: *Presented is an algorithm traction calculation at speed, distance, time and power of traveling on a train with electric locomotive. After drawing up the schedule of train, we get results for average current, rms current, momentary power and rms power at power feeders. Based on the results it can choose the power of traction transformers or U_{min} on the pantograph.*

Keywords: *traction calculations, power, traction transformer*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При изграждане на нови електрифицирани железопътни линии трябва да се определят параметрите на тяговата мрежа и на захранващите я тягови подстанции. Изходните данни нужни за пресмятане на тяговата мрежа се получават след извършване на тягови изчисления за съответните участъци от трасето. Тяговите изчисления обхващат решаването на уравнението за движение на транспортното средство при различните режими по време на движение. Един от прегледните, но груб и неточен, методи е графичното построяване на зависимостите между скоростта и изминатият път V[S], скоростта и времето V[t]. След използване на V[S] и V[t] и електро-тяговата характеристика на транспортното средство може да се построи зависимостта между тока на токоприемника и времето I[t] или то-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ка и пътя I[S]. От получената токова характеристика може да се определя разхода на енергия, натоварването на енергийните съоръжения и други.
Уравнението на движение позволява да се получат зависимостите между действащите сили, изминатият път скоростта и времето:

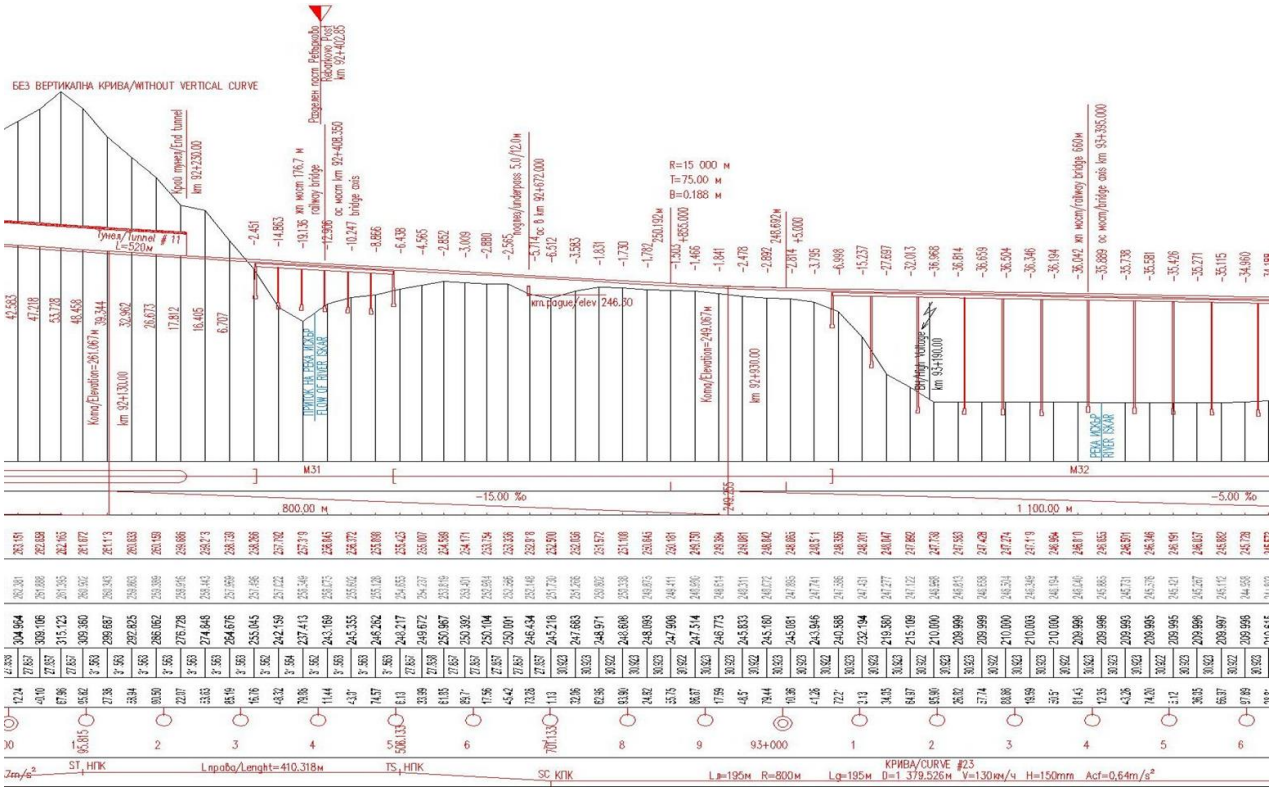
$$F - W - B = (1+\gamma) m \frac{dV}{dt} \qquad (1.1)$$

където F - теглителна сила, W - съпротивление на движение, B - спирачна сила, $1+\gamma$ - инерционен коефициент на въртящите се маси, m - маса на състава, V - скорост и t - време.
В този си вид то свързва всички сили, влияещи на процеса на движение. Ако в (1.1) отсъства спирачната сила B ще имаме процес на теглене, ако отсъства теглителната F – режим на спиране.
На практика построяването на кривите на движение се свежда до решаване на уравнение (1.1). Това решаване може да се извърши с помощта на математически програми след съставяне на алгоритъм и програма за решаване на задачата. В разглежданият материал е използвана работна среда с *GNU* лиценз (свободна за използване) [4] а програмата за тягови изчисления е с работно име „TracSiMa Suite”.

2. ИЗХОДНИ ДАННИ И ТЯГОВИ ИЗЧИСЛЕНИЯ

- Профил на трасето: съдържа надморски височини, наклоните, радиусите на кривите, дължините на правите и криви участъци и др. Извадка от реален профил на участък е показана на фиг.1;
- Разположение на гари или спирки по трасето със съответния километраж;
- Секционирането на контактната мрежа. От тук се определят дължините на тяговите рамена и захранващите фидери;
- Ограничения в скоростите за отделните участъци;
- Разписание на влаковете;
- Параметри на влаковете пътуващи по участъка – вид на локомотива (локомотивите), тегло на състава, скорост на движение и други;
- Електрически параметри на тяговата мрежа, захранващите фидери и тяговите трансформатори;
- Други – според исканите резултати.

От чертежа на вертикалния профил се подготвят изходните данни на програмата за тягови изчисления. За всеки отделен наклон на пътя се записва начален и краен километраж, големина на наклона, дължина на участъка, кота на началото и максималната скорост на движение. Нанасят се местата на гарите (спирките) и за проверка на отчетените стойности се изчисляват получените наклони. Ако има разминаване в стойностите на отчетения от чертежа наклон и пресметнатия чрез данните се търси грешката. Част от данни за профила са показани на фиг.2.
Така подготвените и въведени в програмата данни се използват за пресмятане на съпротивлението на движение, спирачната задача и съответно текущата скорост на състава.



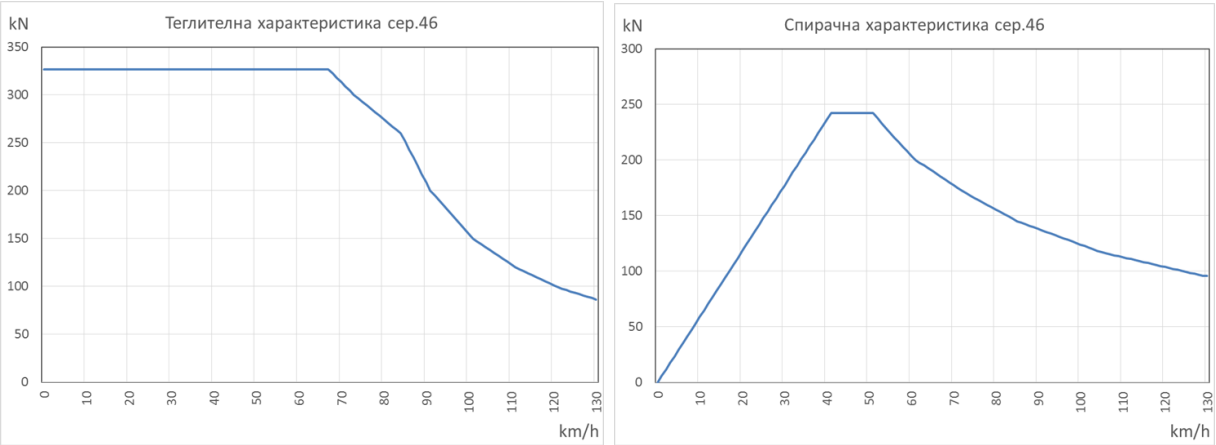
Фиг.1. *Примерен профил на участък от железопътно трасе*

Реалните теглителна и спирачна характеристики на локомотива са заложени в програмата за тягови пресмятания и са показани на фиг.3.

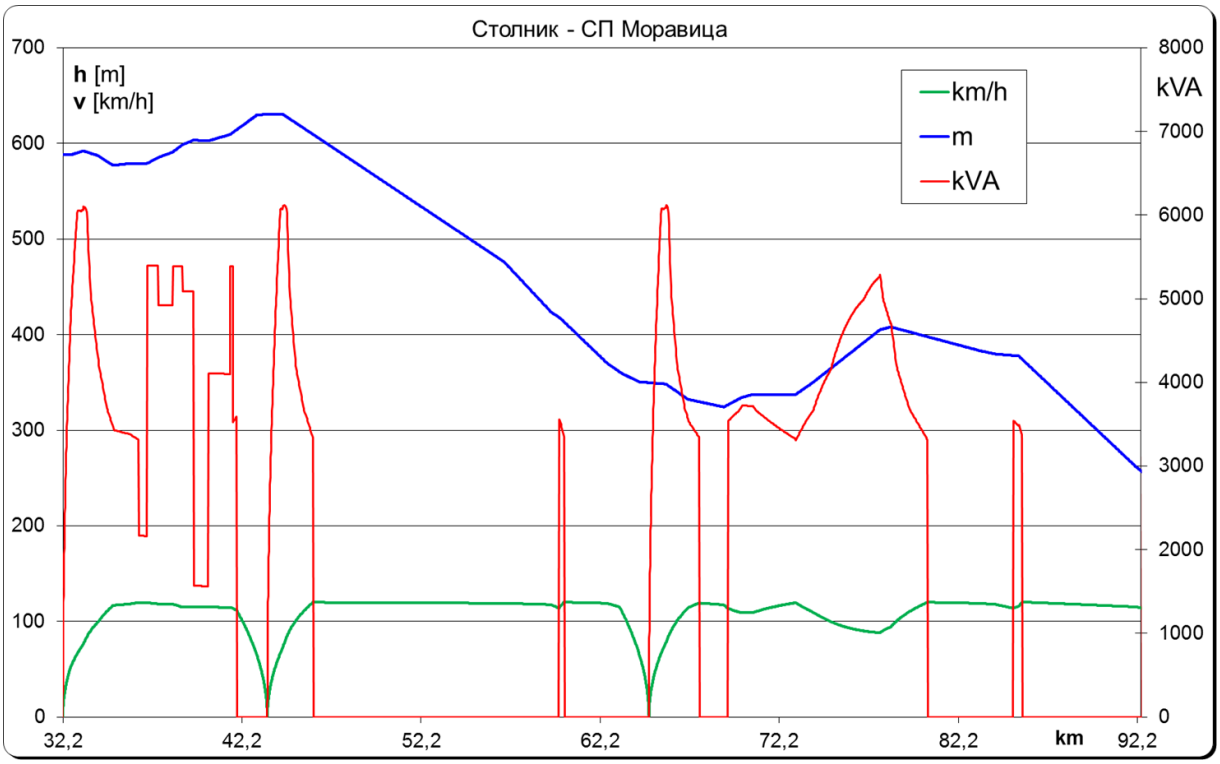
начало	край	наклони изчислени	наклони отчетени	дължина	макс. скорост	кота начало	ос приемно здание	гара/спирка
km	km	‰	‰	km	km/h	m	km	-
28,1950	32,1950	0,000	0,00	4,0000	120	588,000	28,195	старт
32,1950	32,6240	0,000	0,00	0,4290	120	588,000	32,195	г. Столник
32,6240	33,3220	6,000	6,00	0,6980	120	588,000		
33,3220	34,1300	-6,000	-6,00	0,8080	120	592,188		
34,1300	35,0000	-12,000	-12,00	0,8700	120	587,340		
35,0000	35,8800	2,000	2,00	0,8800	120	576,900		
35,8800	36,8500	0,000	0,00	0,9700	120	578,660		
36,8500	37,5000	10,000	10,00	0,6500	120	578,660		
37,5000	38,3000	7,000	7,00	0,8000	120	585,160		
38,3000	38,8500	14,000	14,00	0,5500	120	590,760		
38,8500	39,4630	8,000	8,00	0,6130	120	598,460		
39,4630	40,3000	-1,000	-1,00	0,8370	120	603,364		
40,3000	41,5000	5,500	5,50	1,2000	120	602,527		
41,5000	43,0050	13,589	13,59	1,5050	120	609,127		
43,0050	43,7000	1,499	1,50	0,6950	120	629,578	43,616	г. Осоица
43,7000	44,4600	0,000	0,00	0,7600	120	630,620		
44,4600	56,8200	-12,500	-12,50	12,3600	120	630,620		
56,8200	59,4500	-20,000	-20,00	2,6300	120	476,121		
59,4500	59,9500	-12,500	-12,50	0,5000	120	423,521		
59,9500	62,6000	-18,000	-18,00	2,6500	120	417,271		
62,6000	63,4000	-13,000	-13,00	0,8000	120	369,571		
63,4000	64,3800	-9,000	-9,00	0,9800	120	359,171		
64,3800	65,8600	-1,500	-1,50	1,4800	120	350,351	64,924	г. Ботевград
65,8600	67,0800	-13,000	-13,00	1,2200	120	348,131		

Фиг.2. *Данни за вертикалния профил на ЖП участък*

Въз основа на въведените данни за профила на трасето, теглото на влака и характеристиките на локомотива се изчисляват необходимите резултати. Изчисленията се правят за всяка секунда от време-пътуването през участъка. Казано по друг начин - уравнението за движение се интегрира през една секунда.
Резултати от пътуване на един влак по даден участък в посока „отиване“ са показани на фиг.4. Вижда се надморската височина (профила) - *h*, скоростта на движение - *v* и мощността на токоприемника на локомотива в *kVA*.



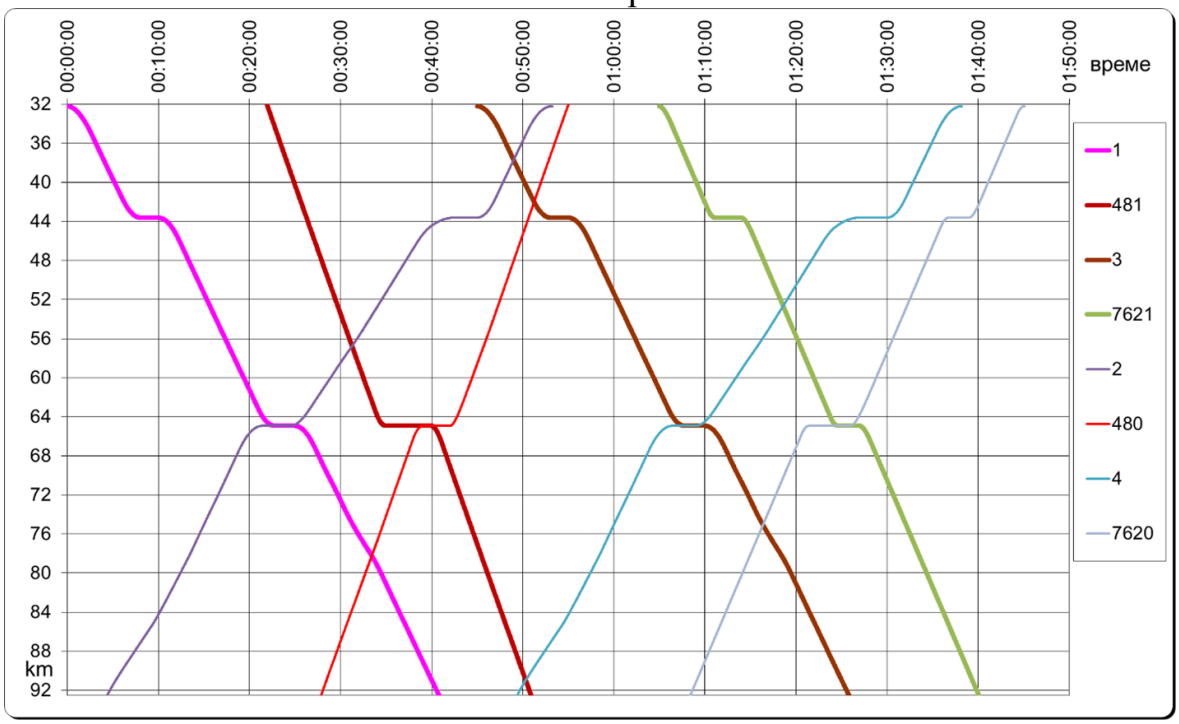
Фиг.3. *Теглителна и спирачна характеристики на локомотив серия 46*



Фиг.4. *Резултати от тягови изчисления за влак в едната посока*

Показаните до тук тягови изчисления се извършват за всеки влак, пътуващ в участъка, като се пресмята и за двете посоки на движение – *„отиване“* и *„връщане“*. От тук вече имаме точното времепътуване на влаковете както и техните мощности през интервали от една секунда.

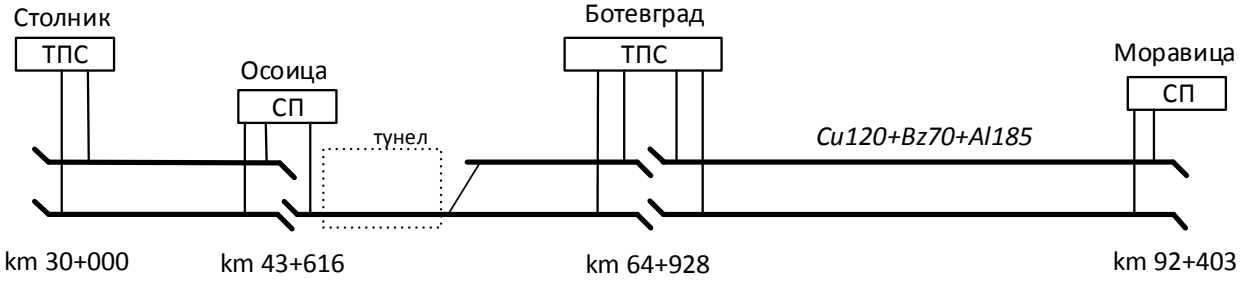
На този етап от тяговите изчисления имаме необходимите данни за да се състави графика на движение на влаковете (*ГДВ*). Всеки влак се разполага по разстояние и време според *ГДВ*. При спиране в гара се задава и престоя до отпътуване на влака. В гарите, където е необходимо, се осигурява разминаване на разнопосочно движещи се влакове. Резултат от изпълнението на графика на движение на влаковете за разглеждания участък е показан на фиг.5. Имаме две двойки товарни влакове, една двойка бързи влакове и една двойка мотрисни влакове показани със съответните им номера.



Фиг.5. *График за движение на влаковете в разглеждания участък*

3. ЕЛЕКТРОТЯГОВИ ИЗЧИСЛЕНИЯ ЗА УЧАСТЪКА НА ТЯГОВА ПОДСТАНЦИЯ

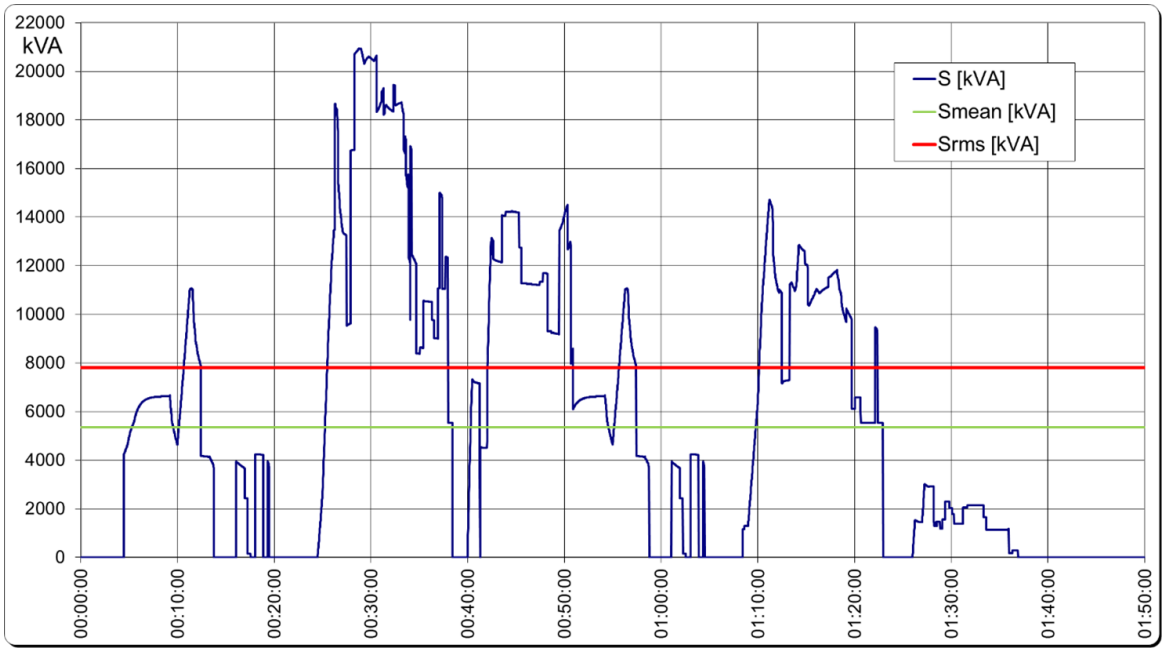
Почти целият участък показан на фиг.5. се захранва от една тягова подстанция. Схемата на секциониране и захранване за разглежданият участък от трасето е показана на Фиг.6. Частта от km 43+616 до km 92+403 ще се захранва от тягова подстанция „Ботевград“. Трасето в подстанционната зона е двупътно с изключение на тунел в единия край на зоната. Подстанцията ще има четири извода.



Фиг.6. *Секциониране на контактната мрежа Столник – СП Моравица*

При изпълняване на ГДВ показан на фиг.5 за подстанционна зона на ТПС „Ботевград“ се пресмятат мощностите за движение на влаковете. Моментната мощност *S[kVA]* е за всички влакове в разглежданата част от ГДВ. Другите две са:

средна мощност $S_{mean}[kVA]$ и средноквадратична мощност $S_{rms}[kVA]$ за времевия интервал от ГДВ. При уточнена конфигурация на тяговата мрежа може да се определи специфичния импеданс на същата. След като е известен импеданса на КМ и са пресметнати мощностите може да се определи средноизползваемото напрежение за влак и съответно минималното напрежение на токоприемника. За „водещ“ влак се избира състав пътуващ по време на пиковете на моментната мощност.



Фиг.7. *Мощности за тягови цели в зоната на ТПС „Ботевград“*

4. ИЗВОДИ

Разгледаният по-горе алгоритъм за извършване на тягови пресмятания и програмата за изчисления са добра основа за бъдещо подобряване на разработеният софтуер „TracSiMa Suite”. Може да се добавят характеристики на други видове електрически транспортни средства, както и да се подобряват резултатите от програмата.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я., *Теория локомотивной тяги: учебник для вузов железнодорожного транспорта*, Москва 2005, ISBN: 5-89035-265-2
[2] И.П. Исаева, *Теория електрической тяги*. Москва Транспорт 1995
[3] С.И. Осипов, С.С. Осипов, *Основы тяги поездов*, Москва 2000.
[4] GNU Octave - *https://www.gnu.org/software/octave/*

Автори: Иван Колев Ангелов, гл. ас. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически факултет, Технически университет-София, E-mail address: *ivanang@tu-sofia.bg*; Николай Стефанов Матанов, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически факултет, Технически университет-София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*; Петър Иванов Матов, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически факултет, Технически университет-София, E-mail address: *matov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Стоян Стоянов

АНАЛИЗИ НА ТЯГОВ ТОК ПРИ ЛОКОМОТИВИ С АСИНХРОННИ ТЯГОВИ ДВИГАТЕЛИ

Иван Ангелов, Петър Матов

Резюме: *Представени са записи на тягов ток, на извод в тягова подстанция, и напрежението на шините. Записите са направени при движение на различни модели локомотиви по участъка захранван от наблюдаваният извод. На тяговия ток в различните случаи са направени анализи на хармоничния състав.*
Ключови думи: *локомотив, тягов ток, хармоници, трансформатор*

ANALYSIS OF TRACTION CURRENT IN LOCOMOTIVES WITH ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS

Ivan Angelov, Peter Matov

Abstract: *Presented are records of traction current by output in traction substation and voltage on the bus. The recordings were made in the movement of various models of locomotives. The traction current in different cases are made analysis of harmonious composition.*
Keywords: *locomotive, traction current, harmonics, transformer*

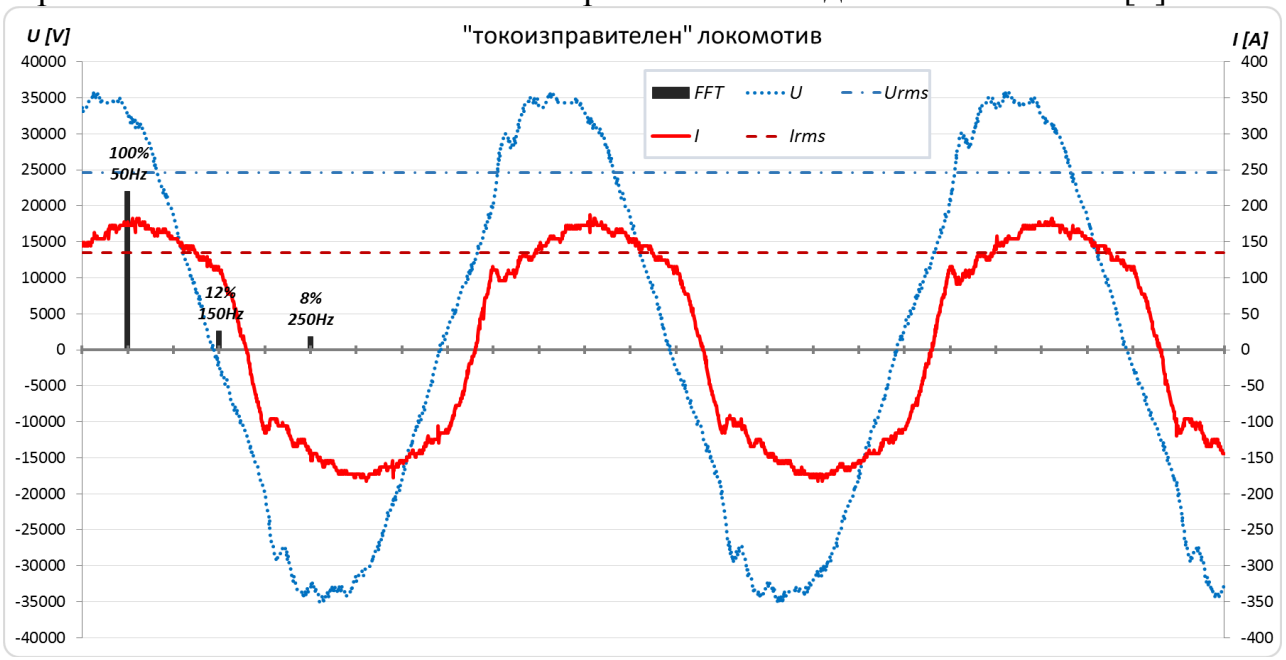
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Преди няколко години у нас основно се използваха променливотокови токоизправителни локомотиви. За повишаване на селективността на защитата в тяговите подстанции се използва наличието на нечетни хармоници в тяговият ток [5]. При токоизправителните локомотиви най – силно изразен е трети хармоник в тока. Запис на тягов ток от токоизправителен локомотив, на шините в ТПС, е показан на фиг.1. От няколко години по ЖП трасетата се движат локомотиви с асинхронни тягови двигатели и честотни преобразуватели. Входните им преобразуватели почти не изкривяват тока и го поддържат близък до синусоида. При липса на трети хармоник в тяговия ток се влошава селективността на използваните до сега защити. Налага се подмяната им с цифрови импедансни защити [6]. В някои от по-старите генерации локомотиви с асинхронни тягови двигатели се използват преобразуватели на базата на GTO тиристори. Другите преобразуватели са на базата на IGBT транзистори, което позволява по-високи честоти на преобразуване. Записите на ток и напрежение са извършвани с цифров осцилоскоп във вторичните вериги на измервателните трансформатори в тягова подстанция (ТПС) „Вакарел“. Изпитванията на двата локомотива са правени в един и същи участък захранван от извод „Елин Пелин 2“. Напреженовият трансформатор (НТ) на шините в ТПС е с преводно отношение *35/0.1kV*. Токовият тран-

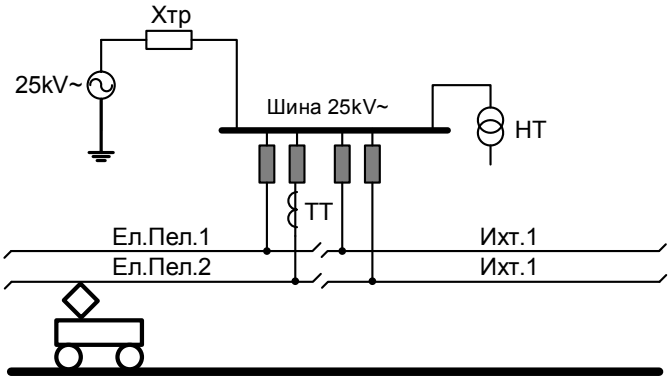
© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

сформатор (ТТ) на извод „Ел.Пел.2“ е с преводно отношение *600/5A*. Схема на захранването и местата на измервателните трансформатори са показани на фиг.2. Измервателните трансформатори могат да внесат различни грешки в измерваните величини. Някои такива грешки са изследвани и описани в [2].



Фиг.1. Ток и напрежение при токоизправителен локомотив



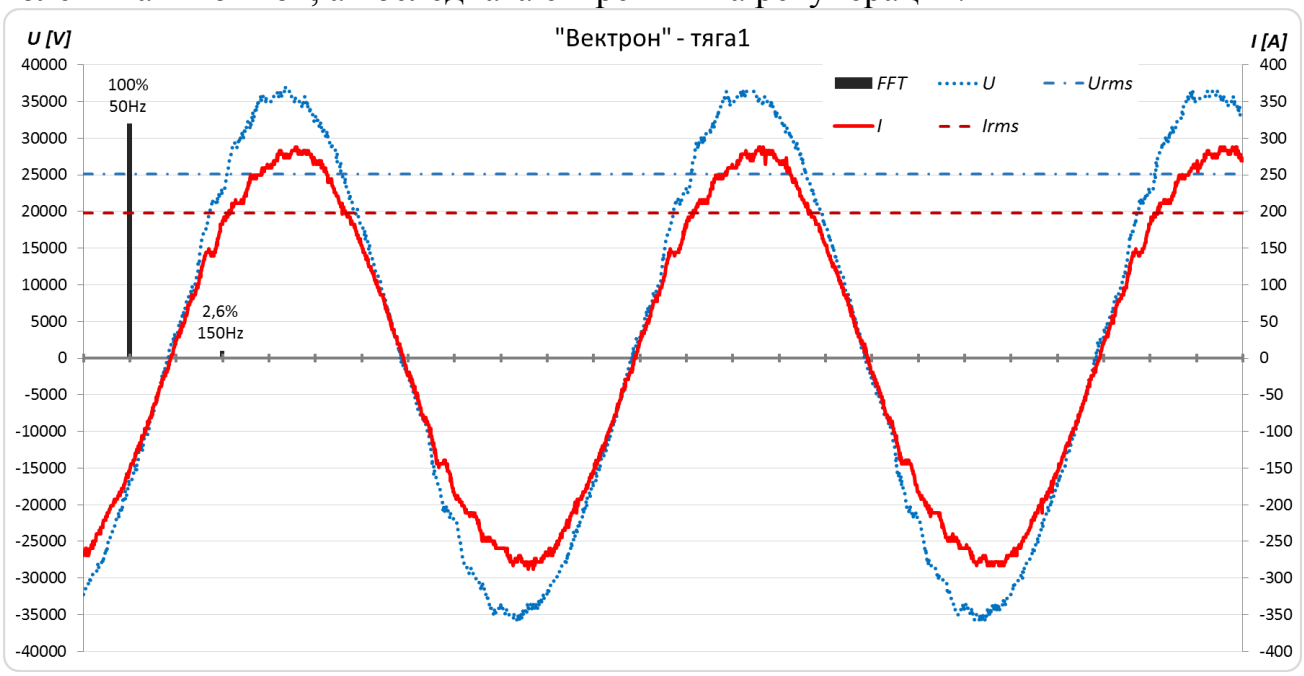
Фиг.2. Схема на захранване и мерене

При измерване на несинусоидални величини може да се използват специализирани преобразуватели за измерване на ток [1]. В настоящата работа се пренебрегват разгледаните по-горе грешки и се измерват практически достъпните величини на вторичните намотки при заводски измервателни трансформатори със стандартни измервателни и регистриращи уреди.

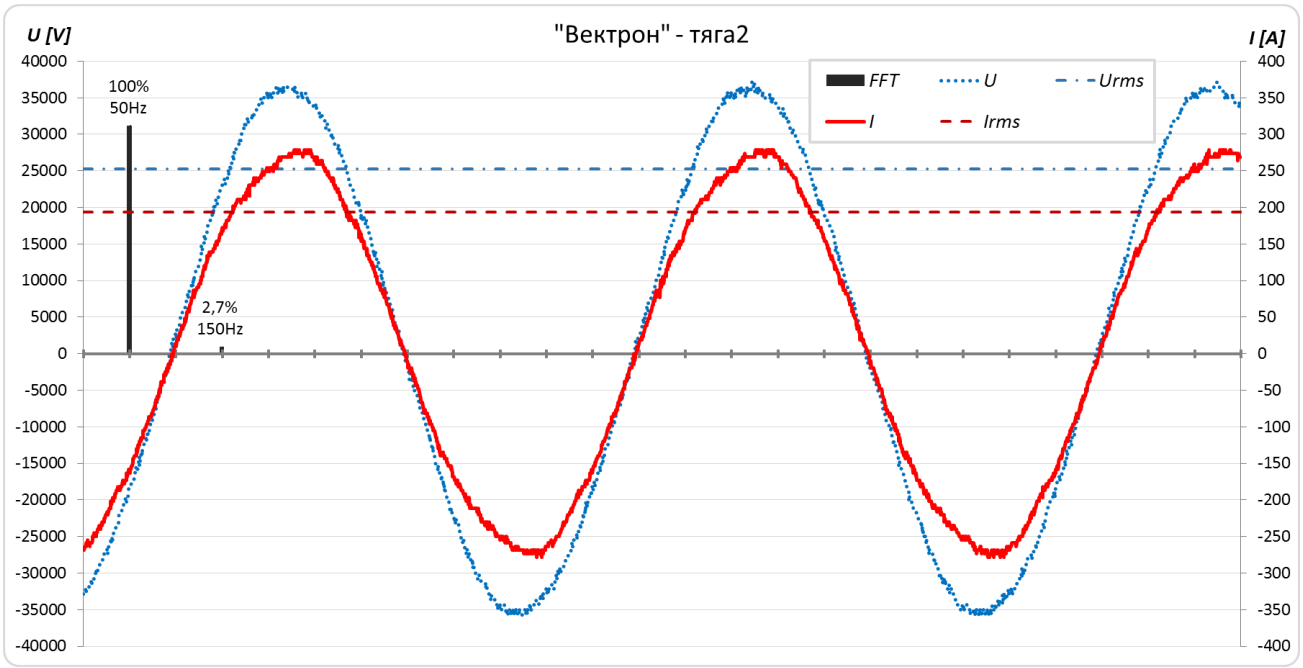
2. ЗАПИСИ НА ТЯГОВ ТОК ОТ ПРОБНО ПЪТУВАНЕ НА ЛОКОМОТИВ SIEMENS “Vectron”

През месец април 2015 година бяха направени утвърждаващи тестове с електрически локомотив Siemens Vectron. Целта е да се потвърди възможността на локомотива да вози товари по целия транспортен коридор от Европа до Азия. Локомотивът е двусистемен, за променлив и постоянен ток, производство на Siemens, тип: Vectron MS, мощност 6.4MW и е произведен 2013 година. За пробите е използван товар с тегло *1600t* натоварен на 13 вагона. За придвижване на състава между тестовите пътувания отзад е прикачен помощен локомотив.

Като резултати са показани три осцилограми. Първите две са при различен по големина тягов ток, а последната е в режим на рекуперация.



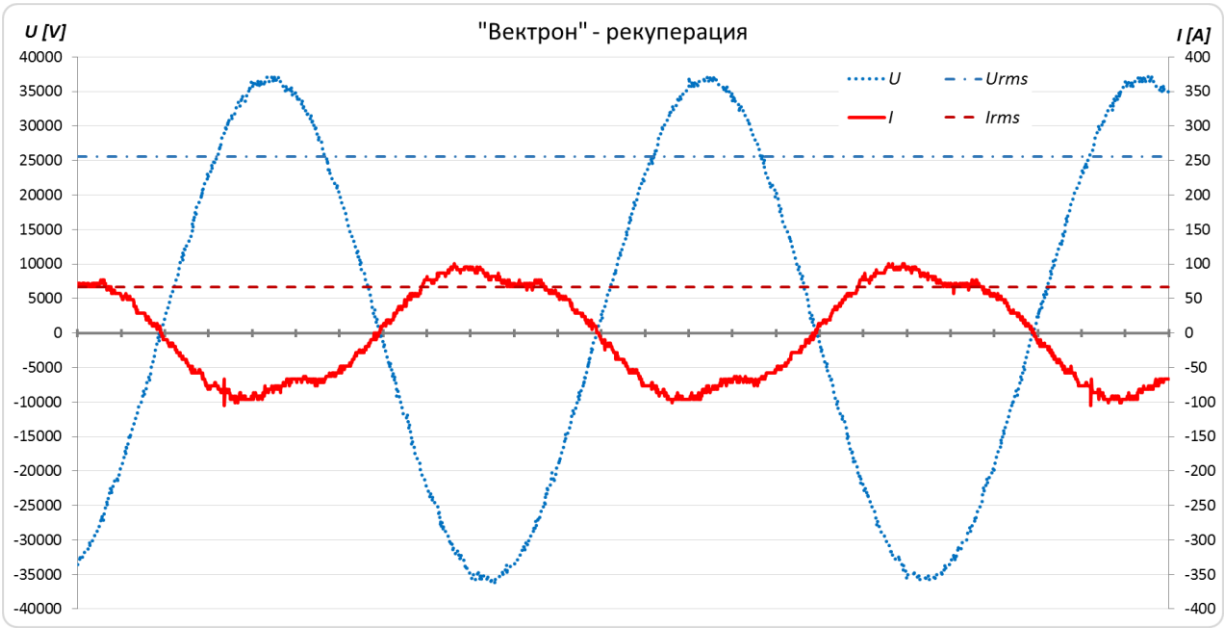
Фиг.3. В режим тяга и хармоничен анализ на тока Vectron-1



Фиг.4. В режим тяга и хармоничен анализ на тока Vectron-2

Показаните на фиг.3 и фиг.4 резултати са при мощност около 5MW. Забелязва се леко изкривяване във формата на тока около максимума. Дефазиране спрямо напрежението няма или е пренебрежимо малко. От направения хармоничен анализ на тока се вижда наличие основно на първи хармоник и между 2 и 3 процента трети хармоник.

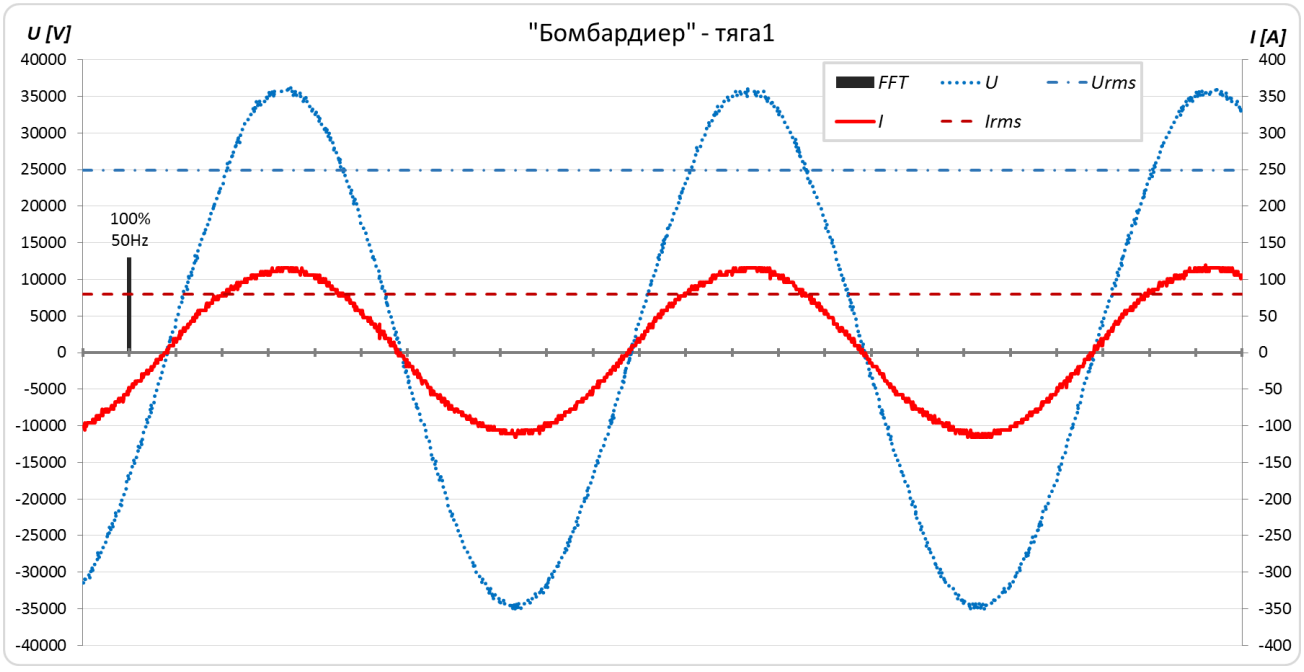
Повече за информация на фиг.5 е показан запис от работата в режим на рекуперация на енергия при спиране на локомотива. Мощността при рекуперация в този интервал е около 1,75MW. И тук се забелязва изкривяване на тока спрямо синусоидалната форма.



Фиг.5. В режим на рекуперация - Vectron

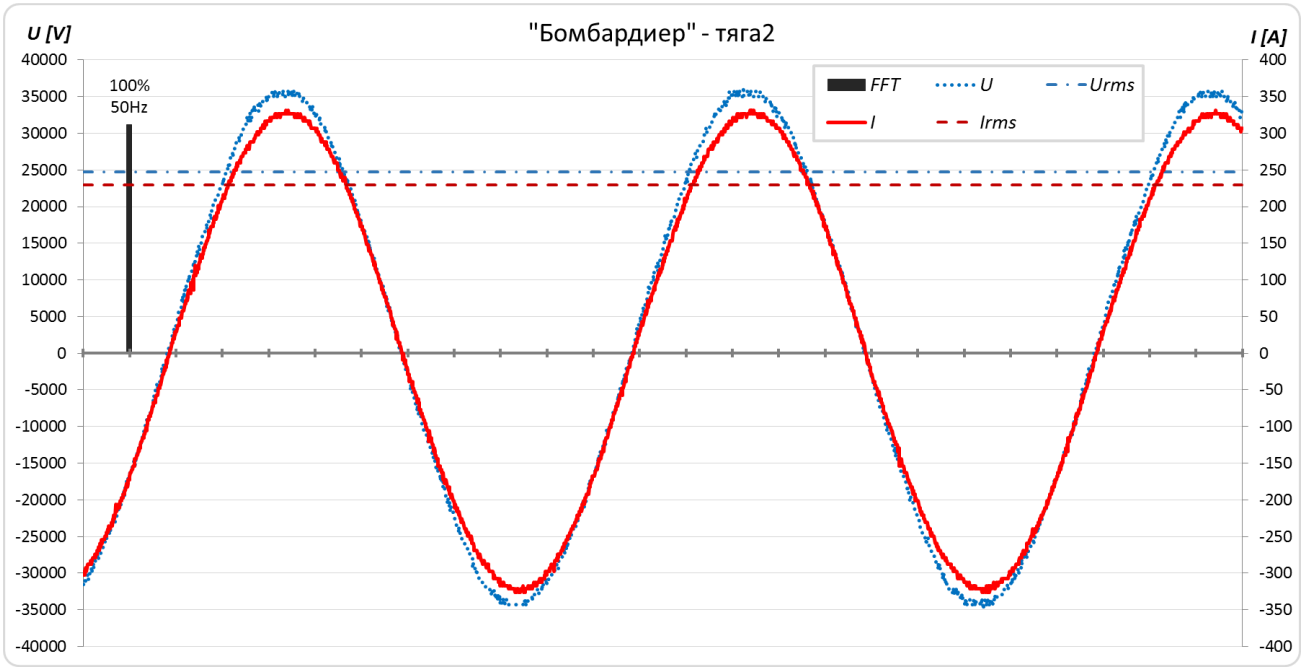
3. ЗАПИСИ НА ТЯГОВ ТОК ОТ ПРОБНО ПЪТУВАНЕ НА ЛОКОМОТИВ BOMBARDIER "TRAXX"

През месец септември 2015 година бяха направени утвърждаващи тестове с електрически локомотив Bombardier TRAXX. Целта е да се потвърди възможността на локомотива да вози товари по целия транспортен коридор от Европа до Азия. Локомотивът е двусистемен, за променлив ток 15kV плюс 25kV, производство на Bombardier, тип: TRAXX AC, мощност 5.6MW и е произведен ноември 2013 година. За пробите е използван товар с тегло *1100t*. За придвижване на състава между тестовите пътувания отзад е прикачен помощен локомотив DB Schenker class 86.



Фиг.6. В режим тяга и хармоничен анализ на тока Bombardier-1

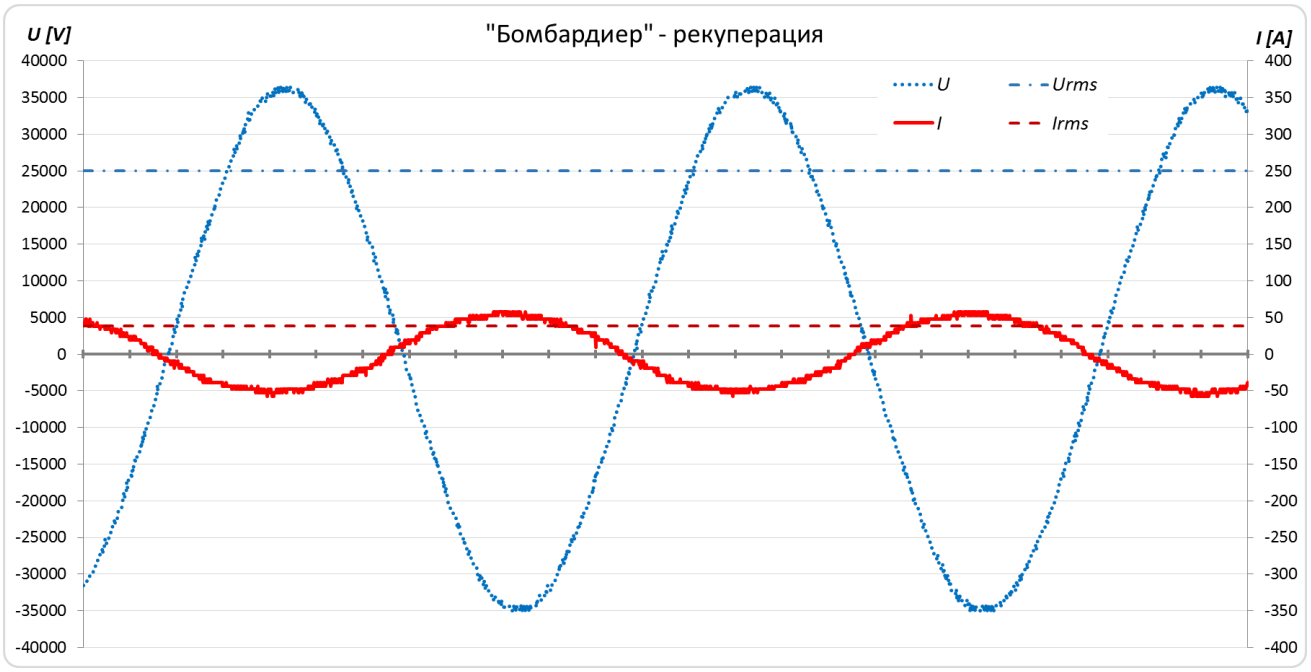
Резултатите показани на фиг.6 са в режим на тяга и мощност около 2MW. Забелязва се почти пълна синусоидална форма на тока с много малки изкривявания. При хармоничният анализ се отчита само първи хармоник в тока.



Фиг.7. В режим тяга и хармоничен анализ на тока Bombardier-2

Вторият резултат, показан на фиг.7, е при мощност около 5,7MW. Тук тока пак е почти синусоидален без дефазиране спрямо напрежението. Хармоничният анализ показва наличие само на първи хармоник.

Резултати при работа в режим на рекуперация са показани на фиг.8. Мощността в интервала на заснемане е около 1,1MW. Тока също е синусоидален и с много малко дефазиране спрямо напрежението - леко изпреварва.



Фиг.8. В режим на рекуперация - Bombardier

4. ИЗВОДИ

От направените записи, измервания и анализи може да се направят някои изводи и заключения:

- основният извод е, че производителите и на двата локомотива са направили качествени и добре работещи силови преобразуватели. Входните преобразуватели работят при висок фактор на мощността и с много малки изкривявания в тока;
- инженерите от фирма Bombardier са се справили малко по-добре със електромагнитната съвместимост на техният преобразувател;
- преобразувателят на Siemens Vectron работи много добре, но може да бъде подобрен алгоритъма за управление на тока.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Георгиев В., Н. Матанов, А. Пачаманов. *Преобразувател на ток за анализ на хармоници*. I-ва Балканска младежка конференция по осветление, 15-16 юни 2000, Варна, България, сборник доклади, стр. 131-134

[2] Пламен Ризов, Станимир Вичев, *Съотношения между напреженията при к.с. в първичните намотки на напреженови трансформатори*, V Научна конференция ЕФ 2013, Созопол, 2.09.-05.09.2013 г, стр. 255-262, ISSN 1311-0829

[3] *www.bombardier.com* - информация за локомотивите изградени на базата на унифицирана платформа „TRAXX”

[4] *www.siemens.com* - информация за локомотивите на Siemens и в частност за модел „Vectron”

[5] Матов П., М. Ганов, *Резултати от изпитвания на релейни защити на двупътни ЖП участъци*. сп. Железопътен транспорт, 05/1994г., стр.9-11

[6] Ангелов И.К. *Алгоритъм на работа на импедансно реле за тягови мрежи 25kV*. Годишник на Техническия Университет - София, том 60, книга 2, 2010 г., страница 199-203

Автори: Иван Колев Ангелов, гл. ас. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *ivanang@tu-sofia.bg*;; Петър Иванов Матов, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *matov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Стоян Стоянов

МАРКОВСКИ МОДЕЛИ ЗА ОЦЕНКА НА НАДЕЖДНОСТТА ПРИ РАЗЛИЧНИ СТРАТЕГИИ ЗА РЕЗЕРВИРАНЕ

Валентин Колев, Васил Шуманов

***Резюме**: В статията се изчислява надеждността на русловите водноелектрическа централа от ВЕЦ „Своге” в зависимост от избраната стратегия за възстановяване на аварирал силов трансформатор. Възстановяването включва времето за доставка и извършване на ремонта. Критерият за оптимален вариант на резервиране представлява загубите от непроизведена енергия.*
***Ключови думи:** марковски модели, надеждност, стратегии за резервиране*

MARKOV MODELS FOR RELIABILITY EVALUATION WITH DIFFERENT RESERVATION STRATEGIES

Valentin Kolev, Vassil Shumanov

***Abstract**: In this article is a reliability calculation of “VezSvoge” run of the river hydropower plants according to chosen strategy for main transformer failure recovery. The recovery includes time for delivery and reparation. The criterion for optimal redundancy is the cost of non-generated power.*
***Key words:** Markov models, reliability, reservation strategies*

ВЪВЕДЕНИЕ

Структурната и функционалната надеждност на ЕЕС, надеждността на елементите от електрическите системи, надеждността на захранването на консуматорите и др. се разглеждат в редица статии и учебници [2], [3], [4], [5].

Библиографията по въпросите свързани с надеждността на ЕЕС е огромна [1]. Създадени са различни стандарти, с което се регулирани надеждностните параметри и индекси при оценка на надеждността, обслужването (ремонта) и готовността на елементите и ЕЕС като цяло [6-14]. При оценка на структурната надеждност се разглеждат и въпроси свързани с резервирането на схемни решения за захранване на консуматори или резервирането на мощности и др. Не се третират въпросите за оценка на надеждността на обектите (централи, подстанции и др.) от гледна точка на времето за доставка и времето за извършване на ремонтите.

Целта на тази статия е да даде оценка на надеждността на МВЕЦ^{те} от Каскада Среден Искър (ВЕЦ ″Своге”) в зависимост от избраната стратегия за резервиране на силовите трансформатори.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Възможността за намаляване на загубите от непроизведена енергия при авария на трансформатор може да се търси в сравнението на различните варианти на стратегии за резервиране.
Изследват се следните варианти за резервиране.
1. Отсъства резервен трансформатор и възстановяването на работата на централата става след закупуване на нов трансформатор или след ремонт на авариралия трансформатор със същите параметри като авариралия.
2. Има резервен трансформатор, който се използва до възстановяване на авариралия.

Дадените в стратегии за резервиране могат да бъдат оценени чрез използване на марковски вериги. В следващите таблици (табл.1; табл.2) е дадена информация за експлоатацията и аварийността на трансформаторите от ВЕЦ ″Своге″

Табл.1

МВЕЦ	Година на въвеждане в експлоатация	Период до 2015 [год.]	Период на работа до авария [год.]	Аварии	Интензивност на преход за всеки трансформатор [год$^{-1}$]
Лакатник	Юни 2008	6,58	6	юни 2014	0,1519757
Свражен	Май 2009	5,667	1	май 2010	0,176402
Церово	Април 2012	2,75			
Прокопаник	Юни 2013	1,58			
Оплетня	Декември 2013	1,083			
		17,66	7	2 аварии	

Табл.2

	Продължителност в години -dT	Стойност	Интензивност на преход [год$^{-1}$]
Изработката и доставка на сух трансформатор	0,333 (4месеца)	300000 euro	3
Ремонт на сух трансформатор	0,167 (2месеца)	30000 euro	6
Изработката и доставка на маслен трансформатор	0,25 (3месеца)	80000 euro	4
маслен трансформатор		60000 лв.	
Възстановяване на силов трансформатор	0,00247(1 денонощие)		365

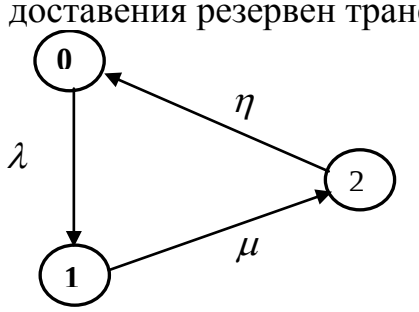
➢ СТРАТЕГИЯ 1

➢ Отсъства резервен трансформатор и възстановяването на работата на МВЕЦ става след закупуване на нов трансформатор или ремонт на авариралия трансформатор

Моделът на този начин на резервиране е показан на фиг.1.

1. Състояние „0” – всичките пет МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” работят.
2. Състояние „1” – четири МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” работят, една не работи поради авария на силовия трансформатор и липса на резервен трансформатор.

3. Състояние „2” – – четири МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” работят, една МВЕЦ не работи поради авария на силовия трансформатор, който не е заменен от доставения резервен трансформатор,.



Фиг.1.

Трансформаторите на всяка от петте МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” могат да се резервират. Допуска се ,че едновременна авария на трансформатори от различни МВЕЦ са малко вероятни, т.е. такива събития не са взаимно зависими. Статистическият материал за някои от МВЕЦ е малък поради скорошното им пускане в експлоатация. В този случай се приема, че интензивността за авария на новоизведените трансформатори е равна на средната стойност на по-дълго експлоатираните досега. От табл.1 е видно че интензивността за авария на МВЕЦ „Лакатник” е 0,1519757, а за МВЕЦ „Свражен” - 0,176402. Средната интензивност е равна на 0,164218. Така сумарната стойност на преход от състояние „1” в „2” на всичките работещи трансформатори от ВЕЦ „Своге” е 0,828142. Интензивностите на преход за състояния „0”, „1” и „2” са съответно:

$$\begin{aligned} &\lambda = \mathbf{0},8321\mathbf{09}\mathbf{0}\left(\text{год}^{-1}\right); \\ &\mu = \mathbf{4}\,(\text{год}^{-1}); \\ &\eta = \mathbf{365}\ (\text{год}^{-1}). \end{aligned} \tag{1}$$

Уравнението описващо Марковската верига е следното:

$$\begin{vmatrix} -\lambda & \lambda & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mu & \mu \\ \eta & & -\eta \end{vmatrix} \cdot \left| \mathrm{P_0} \quad \mathrm{P_1} \quad \mathrm{P_2} \right| = \begin{vmatrix} \frac{d\mathrm{P_0}}{dt} \\ \frac{d\mathrm{P_1}}{dt} \\ \frac{d\mathrm{P_2}}{dt} \end{vmatrix} \tag{2.a}$$

и гранични условия:

$$\mathrm{P_0} = \mathbf{1};\ \mathrm{P_1} = \mathrm{P_2} = \mathbf{0}. \tag{2.b}$$

Определяне на установените вероятностни състояния става като се реши системата уравнения:

$$\begin{cases} -\lambda \cdot \mathrm{P_0} + \eta \cdot \mathrm{P_2} = \mathbf{0} \\ \lambda \cdot \mathrm{P_0} - \mu \cdot \mathrm{P_1} = \mathbf{0} \\ \mathrm{P_0} + \mathrm{P_1} + \mathrm{P_2} = \mathbf{1} \end{cases} \tag{3}$$

Решението на системата в общ вид е:

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0;$$

$$P_2 = \frac{\lambda}{\eta} P_0; \qquad (4)$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda}{\eta}}.$$

При интезивности на преход дадени с равенства (1) отговарящи съответно на доставка на трансформатор за 3 месеца и време за замяна на повредения с нов – 24 часа, то вероятностите на състоянията от модела на фиг.1 са съответно:

$$P_0 = 0{,}828142266;$$

$$P_1 = 0{,}169995; \qquad (5)$$

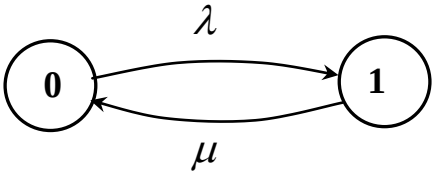
$$P_2 = 0{,}001862956.$$

Аварийните състояния са „1” и „2”. Вероятността за авария на силов трансформатори от ВЕЦ „Своге”

$$P_A = P_1 + P_2 = 0{,}171858. \qquad (6)$$

За да се определи вероятността (готовността) за работа на всички трансформатори от ВЕЦ „Своге” в зависимост от продължителността на ремонт на един трансформатор от 1 до 4 месеца е построена графика показана на фиг.3. Построената графика се отнася за установените вероятностни състояния.

Вероятността за работа на трансформаторите от ВЕЦ „Своге” е не само функция на продължителността на ремонтите, но и на времето, т.е. $P_0 = f(t, \mu)$. Като се има предвид ,че и двете състояния „1” и „2” са аварийни, тогава те могат да се обединят и моделът на състоянията се опростява. Той добива следния вид.



Фиг.2.

Диференциалното уравнение описващо Марковската верига е:

$$-\lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_1 = \frac{dP_0}{dt};$$

$$\lambda \cdot P_0 - \mu \cdot P_1 = \frac{dP_1}{dt}; \qquad (7)$$

$$P_0(0) = 1; \quad P_1(0) = 0.$$

Решението на тази система диференциални уравнения е:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)\cdot t};$$

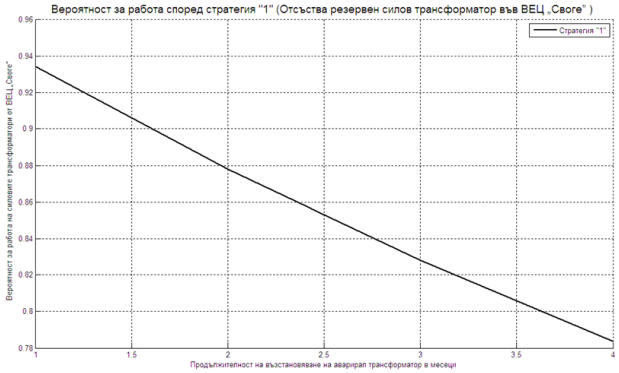
$$P_{3a}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)\cdot t}. \qquad (8)$$

На база на тези решения могат да се изчислят вероятностите за работа на трансформаторите от ВЕЦ „Своге” като функция на продължителността на ремонтите (интензивността на възстановяване) и времето за оценка при съществуващата статистическа интензивност за аварии табл.3. На фиг.4, фиг.1.5 и фиг.6 са показани съответно графиките на:

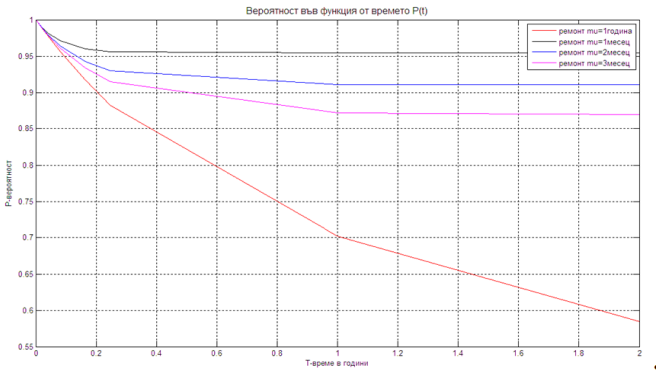
-вероятностите за работа във функция от времето (състояние „0”) $P_0 = f(t)$;

-вероятностите за работа във функция от интензивността на възстановяване (продължителността на ремонтите) $P_0 = f(\mu)$;

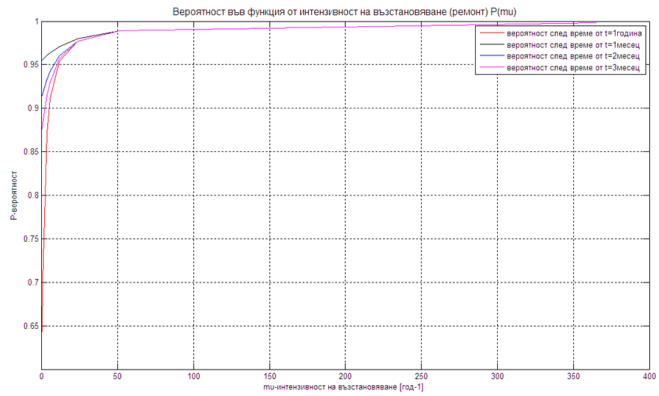
-вероятностите за работа във функция от времето за оценка, на интензивността на възстановяване (продължителността на ремонтите) при съществуващата статистическа интензивност за аварии $P_0 = f(t, \mu)$.



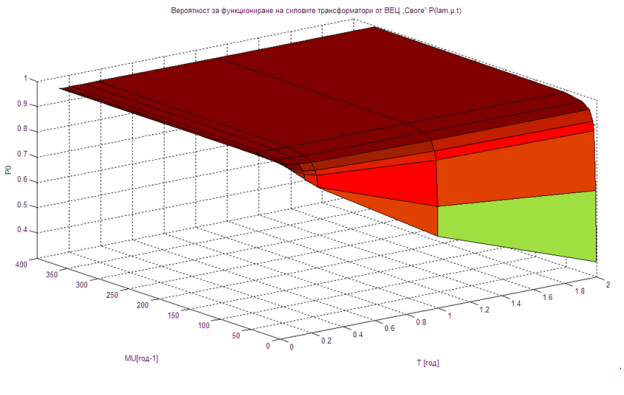
Фиг.3.



Фиг.4.



Фиг.5.



Фиг.6.

Табл.3

Таблица на вероятността за работа на всички трансформатори от ВЕЦ „Своге”- $P_0 = F(\mu, t)$ във функция на интензивността на възстановяване (ремонт) (μ) и времето (t) при определена (статистическа) интензивност на откази (λ)

		интензивността на възстановяване (ремонт) (μ) в [год$^{-1}$]							
Време в години		365	52	24	12	6	4	1	0,5
	1	**0,999019856**	**0,998555124**	**0,998499662**	**0,998475018**	**0,998462492**	**0,998458287**	**0,998451949**	**0,99845089**
	7	**0,998451452**	**0,993141709**	**0,991316761**	**0,990323549**	**0,989768415**	**0,989573854**	**0,989272616**	**0,989221284**
	15	**0,99845007**	**0,990410125**	**0,985203604**	**0,981610018**	**0,979344214**	**0,978504531**	**0,977156666**	**0,976921128**
	30	**0,998450069**	**0,989321382**	**0,979829958**	**0,970640079**	**0,963569228**	**0,960683006**	**0,955740106**	**0,954836572**
	60	**0,998450069**	**0,989183158**	**0,977150809**	**0,960113738**	**0,942196309**	**0,933533921**	**0,91677992**	**0,913449617**
	90	**0,998450069**	**0,989181361**	**0,976792078**	**0,956300473**	**0,929538279**	**0,914638679**	**0,882388159**	**0,875466497**
	365	**0,998450069**	**0,989181338**	**0,976736549**	**0,954119758**	**0,910932264**	**0,871725035**	**0,702023547**	**0,642571805**
	730	**0,998450069**	**0,989181338**	**0,976736549**	**0,954119511**	**0,910742008**	**0,869709623**	**0,584838465**	**0,360297488**

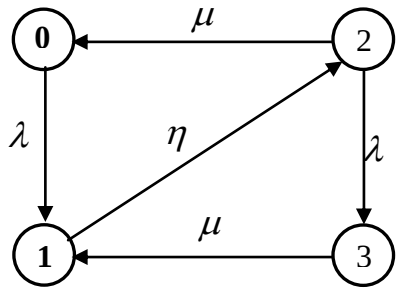
➢ СТРАТЕГИЯ 2

➢ Има резервен трансформатор, който се използва до възстановяване на авариралия

Моделът на този начин на резервиране е показан на Фиг. 1.7.

a) Състояние „0” – всичките пет МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” работят, има и резервен трансформатор.
b) Състояние „1” – четири МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” работят, една МВЕЦ не работи поради авария на силовия трансформатор, а резервния трансформатор не е монтиран.
c) Състояние „2” – петте МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” работят, няма резервен трансформатор.
d) Състояние „3” – четири МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” работят няма резервен трансформатор.

Работните състояния са съответно „0” и „2”. Аварийните състояния са „1” и „3”.



Фиг.7.

Уравнението описващо Марковската верига е следното:

$$\begin{vmatrix} -\lambda & \lambda & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\eta & \eta & \mathbf{0} \\ \mu & \mathbf{0} & -(\lambda+\mu) & \lambda \\ \mathbf{0} & \mu & \mathbf{0} & -\mu \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} P_{\mathbf{0}} & P_{\mathbf{1}} & P_{\mathbf{2}} & P_{\mathbf{3}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{dP_{\mathbf{0}}}{dt} \\ \frac{dP_{\mathbf{1}}}{dt} \\ \frac{dP_{\mathbf{2}}}{dt} \\ \frac{dP_{\mathbf{3}}}{dt} \end{vmatrix} \tag{9.a}$$

и гранични условия:

$$P_{\mathbf{0}} = \mathbf{1};\ P_{\mathbf{1}} = P_{\mathbf{2}} = P_{\mathbf{3}} = \mathbf{0}. \tag{9.b}$$

Определяне на установените вероятностни състояния става като се реши системата уравнения:

$$\begin{cases} -\lambda \cdot P_{\mathbf{0}} + \eta \cdot P_{\mathbf{2}} = \mathbf{0} \\ \eta \cdot P_{\mathbf{1}} - (\lambda+\mu) \cdot P_{\mathbf{2}} = \mathbf{0} \\ \lambda \cdot P_{\mathbf{2}} - \mu \cdot P_{\mathbf{3}} = \mathbf{0} \\ P_{\mathbf{0}} + P_{\mathbf{1}} + P_{\mathbf{2}} + P_{\mathbf{3}} = \mathbf{1} \end{cases} \tag{10}$$

Решението на системата в общ вид е:

$$
\begin{aligned}
P_0 &= \frac{1}{1+\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)\cdot\left(1+\frac{\lambda+\mu}{\eta}+\frac{\lambda}{\mu}\right)};\\
P_1 &= \frac{\lambda\cdot(\lambda+\mu)}{\eta\cdot\mu}P_0;\\
P_2 &= \frac{\lambda}{\mu}\cdot P_0;\\
P_3 &= \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2\cdot P_0
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

При интензивности на преход дадени с равенства (1) вероятностите на състоянията са съответно:

$$
\begin{aligned}
P_0 &= \mathbf{0},799922802;\\
P_1 &= \mathbf{0},\mathbf{00}2168859;\\
P_2 &= \mathbf{0},16420215\mathbf{3};\\
P_3 &= \mathbf{0},\mathbf{0}337\mathbf{0}6187
\end{aligned}
\qquad (12)
$$

Вероятността за работа се определя от сумата на състояния „0” и „2”, а вероятността за авария се определя от сумата на състояния „0” и „2”, т.е.:

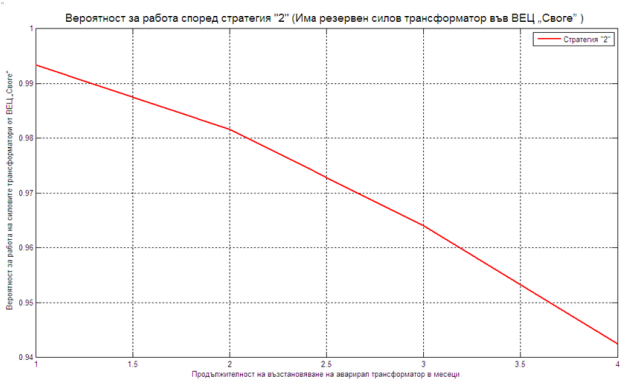
$$
\begin{aligned}
P_{\text{раб.}} &= P_0 + P_2 = \mathbf{0},964124955\\
P_{\text{авар.}} &= P_1 + P_3 = \mathbf{0},\mathbf{0}3587504\mathbf{5}
\end{aligned}
\qquad (13)
$$

За да се определи вероятността (готовността) за работа на всички трансформатори от ВЕЦ „Своге” в зависимост от продължителността на ремонт на един трансформатор от 1 до 4 месеца е построена графика показана на фиг.8. Построената графика се отнася за установените вероятностни състояния.

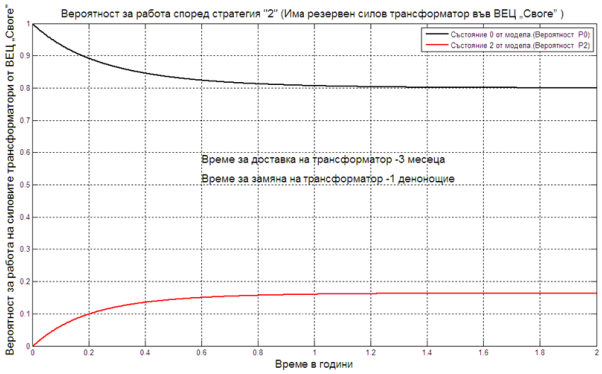
Вероятността за работа на трансформаторите от ВЕЦ „Своге” е не само функция на продължителността на ремонтите (доставка и замяна на аварирал трансформатор) , но и на времето, т.е. $P_0 = f(t,\mu,\eta)$.

За да се намерят времезависимите вероятности е необходимо да се реши системата диференциални уравнения (1.9а). На следващите фигури са изчислени времезависимите вероятности на състоянията „0”, „1”, „2”, „3” за модела от фиг.7.

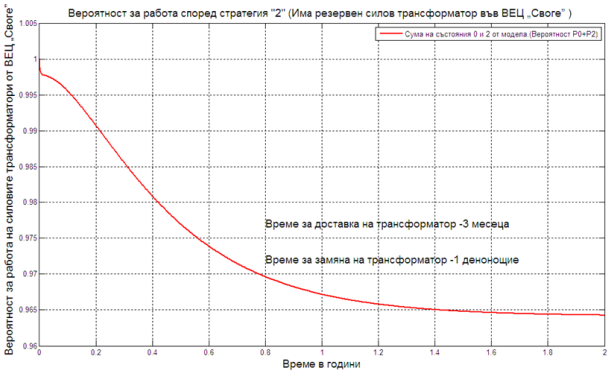
На фиг.9 са дадени вероятностите на работните състояния „0”и „2”; на - фиг.10 - вероятността на сумарното работно състояние („0”плюс „2”); на фиг.11 са дадени вероятностите на аварийни състояния „1”и „3”; на - фиг.12 - вероятността на сумарното аварийно състояние („1”плюс „3”) при статистически определената интензивност на авария 0,828142, време за доставка на нов трансформатор за 3 месеца и времето за замяна на аварирал трансформатор от 24 часа.



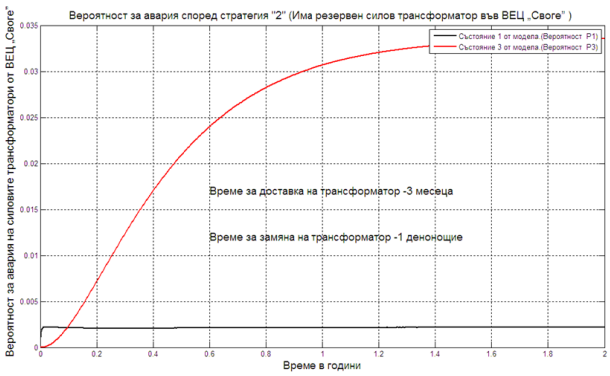
Фиг.8.



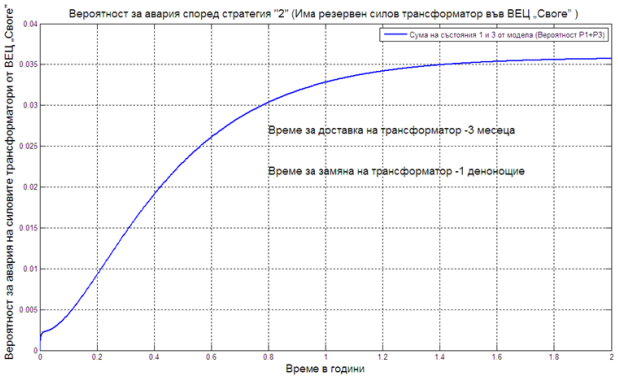
Фиг.9.



Фиг.10.



Фиг.11.



Фиг.12.

ИЗВОДИ

➢ Сравнителен анализ на стратегиите за резервиране

1. Сравнявайки установените вероятностни състояния при еднакви интензивности на авария и възстановяване (доставка и замяна на повредения трансформатор) се вижда, че:

   - Вероятността за работа при стратегия „1” е 0,828142266 и съответно за авария 0,171858.
   - Вероятността за работа при стратегия „2” е 0,964124955 и съответно за авария 0,035875045.

2. Разликите между вероятностите за работа на трансформаторите от ВЕЦ „Своге” е в полза на стратегия „2” (наличие на резервен трансформатор) и е равна на 0,135982689.

3. Средно статистическото време без авария на трансформатор за стратегия „1” е 1,218 години, а за стратегия „2” - 1,425.

4. Разликите между средно статистическото време без авария на трансформатор за стратегия „2” и стратегия „1” е 75,71 дни за ВЕЦ „Своге”.

5. При средна произведена енергия за ден от МВЕЦ на ВЕЦ „Своге” за 12000 лева, статистическите загуби от непроизведена енергия ще са 908 508,24 лева. Тези загуби са получени при условие, че доставката на нов трансформатор е 3 месеца, а включването му - 24 часа (1 денонощие) при използване на стратегия 1. Това са пределните срокове за доставка и замяна на повредения трансформатор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schilling M.T., R. Billinton, M. Groetaers dos Santos. Bibliography on Power Systems Probabilistic Security Analysis 1968-2008, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume 10, Issue 3 2009 Article 1
2. Billinton R., R.N. Allan Reliability evaluation of engineering system, Plenum press. New York and London 1983-4
3. Руденко Ю.Н., М. Б. Чельцов. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах, Новосибирск, 1974.
4. Малчев К.М. Надеждност в електроенергетиката. С. ТУ-София 2010.
5. Фокин Ю.А., В.А. Туфанов Оценка надежности систем электроснабжения М., Энергоиздат, 1981.
6. IEC Standard 271 – List of basic terms, definition and related mathematics for reliability.
7. IEC Standard 300 – Reliability and maintainability management.
8. IEC Standard 362 – Guide for collection of reliability, availability and maintainability. date from field performance of electronic items.
9. IEC Standard 605 – Equipment reliability testing.
10. IEC Standard 812 – Analysis techniques for system reliability-Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA).
11. IEC Standard 863 – Presentation of reliability, maintainability and availability predictions.
12. IEC Standard 1014 – Programs for reliability growth.
13. IEEE Std. 493 and IEEE Std. 500 (Institute of Electrical and Electronic Engineers) -1980 and 1984.

14. EPRI document 3593 – Electrical Power Research Institute, Hannaman, Spurgin, 1984.

Автори*:* Валентин Колев, доц. д-р, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vkolev@tu-sofia.bg*; Васил Шуманов, маг. инж, докторант, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vassil.shumanov@pvbgroup.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Светлана Цветкова

ОЦЕНКА НА НАДЕЖДНОСТТА И ИНТЕРВАЛИТЕ НА ОСНОВНИТЕ РЕМОНТИ НА ТРАНСФОРМАТОРИТЕ ОТ РУСЛОВИТЕ ВОДНОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЦЕНТРАЛИ ОТ ВЕЦ „СВОГЕ”

Валентин Колев, Васил Шуманов

***Резюме**: В статията се изчислява надеждността на русловите водноелектрически централи от ВЕЦ „Своге” на база на статистическата информация за аварийността на силовите трансформатори. Определя се оптималният срок за извършване на основни ремонти на трансформаторите, като се съпоставят разходите при извършване на аварийните и текущите ремонти.*
***Ключови думи:** оценка на надеждността, интервали на основните ремонти на ВЕЦ „Своге”*

RELIABILITY VALUATION AND OVERHAUL INTERVAL OF “VEZ SVOGE” RUN OF THE RIVER HYDROPOWER PLANT TRANSFORMERS

Valentin Kolev, Vassil Shumanov

***Abstract:** This article present a reliability calculation of “VezSvoge” run of the river hydropower plantp, based on main transformers failures statistical information. The optimum period for transformers overhaul is evaluated comparing expenses during the failure and routine repairs.*
***Keywords:** reliability valuation, overhaul interval of “Vez Svoge” run*

ВЪВЕДЕНИЕ

Водноелектрическите централи са сложни съоръжения при които изграждащите я елементи са скъпи. По тази причина те са ремонтно пригодни, т.е. възстановими. Възстановяване на работоспособността на тези елементи се осигурява чрез извършване на различни възстановителни мероприятия известни като планови ремонти. Има редица статии в които се изследва влиянието на ремонтите на машините и съоръженията върху надеждността на електрическите централи [1,2,3]. Предлагат се вероятностни модели и програми за оценка на това влияние [4].

В зависимост от особеностите на функциониране на електрическите централи и от мястото им при покриване на товара се правят планове на ремонтите на агрегатите от ЕЕС [5].

Предлаганата статия има за цел да оцени надеждността на инсталираните в МВЕЦ[те] от Каскада Среден Искър (ВЕЦ ″Своге″) трансформатори, като се из-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ползва статистическата информация за аварийността на тези съоръжения. ВЕЦ ″Своге″ е съставена от пет малки ВЕЦ – *МВЕЦ „Церово”, МВЕЦ „Лакатник” МВЕЦ „Свражен”, МВЕЦ „Прокопаник” и МВЕЦ „Оплетня”*.
В табл.1 и табл.2 е дадена информация за експлоатацията и аварийността на трансформаторите от ВЕЦ ″Своге″

Табл.1

МВЕЦ	Година на въвеждане в експлоатация	Период до 2015 [год.]	Период на работа до авария [год.]	Аварии	Интензивност на преход за всеки трансформатор [год$^{-1}$]
Лакатник	Юни 2008	6,58	6	юни 2014	0,1519757
Свражен	Май 2009	5,667	1	май 2010	0,176402
Церово	Април 2012	2,75			
Прокопаник	Юни 2013	1,58			
Оплетня	Декември 2013	1,083			
ОБЩО		17,66	7	2 аварии	

Табл. 2

	Продължителност в години -dT	Стойност	Интензивност на преход [год$^{-1}$]
Изработката и доставка на сух трансформатор	0,333(4месеца)	300000 euro	3
Ремонт на сух трансформатор	0,167(2месеца)	30000 euro	6
Изработката и доставка на маслен трансформатор	0,25(3месеца)	80000 euro	4
маслен трансформатор		60000 лв.	
Възстановяване на силов трансформатор	0,00247(1 денонощие)		365

1. ОЦЕНКА НА НАДЕЖДНОСТТА НА РАБОТА НА ТРАНСФОРМАТОРИТЕ ОТ ВЕЦ „Своге”

Оценката е направена за следните варианти на резервиране.
1. Отсъства резервен трансформатор и възстановяването на работата на централата става след закупуване на нов трансформатор или след ремонт на авариралия трансформатор със същите параметри като авариралия.
2. Има резервен трансформатор, който се използва до възстановяване на авариралия.

В табл.1 и табл.2 е дадена необходимата информация за извършване на изчисленията.

1.1. ОСРЕДНЕНА ОЦЕНКА НА НАДЕЖДНОСТТА НА РАБОТА ЗА ВСИЧКИ ТРАНСФОРМАТОРИ ОТ МВЕЦ$^{-те}$ ОТ ВЕЦ „Своге”

За определяне на надеждността на работа на трансформаторите в МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” е необходимо да се знае следната информация:

1. Брой на авариралите трансформатори $\mathbf{n_0 = 2}$.
2. Брой на всички трансформатори $\mathbf{n = 5}$.

3. Период на експлоатация на всички трансформатори в МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” $T = \mathbf{17,66}$ год. - табл.1
4. Времето за доставка и замяна на трансформатор е дадено в Табл. 2, като за вариант 1 dT=0,333год$^{-1}$, а за вариант 2 - dT=0,167год$^{-1}$.
   a) изчисляване на интензивността на авария на трансформаторите от МВЕЦ на ВЕЦ „Своге”.

$$\lambda = \frac{n_0}{(n - n_0)\cdot T} = \mathbf{0,0}3775\left(\text{год}^{-1}\right) \quad (1)$$

   b) честота на авариите на трансформаторите за година

$$\omega = \frac{n_0}{n \cdot T} = \mathbf{0,0}2265\ \left(\text{год}^{-1}\right) \quad (2)$$

   c) времето за възстановяване на аварирал трансформатор е дадено в табл. 2. (dt) (от 2 до 4 месеца).
   d) вероятност за авария на трансформатор

Времето за възстановяване на аварирал трансформатор съществено се влияе от стратегиите за начина на резервиране. Така например може да се използват следните варианти на възстановяване на авариралите трансформатори.

1. Отсъства резервен трансформатор и възстановяването на работата на централата става след закупуване на нов трансформатор или след ремонт на авариралия трансформатор със същите параметри като авариралия.

2. Има резервен трансформатор, който се използва до възстановяване на авариралия.

Като се има предвид, че времето за възстановяване при различните варианти на резервиране е различно, то и вероятността за авария ще бъде различна. Така например:

за вариант„1”

$$P_A = \omega \cdot dT = \mathbf{0,02265.0,33} = \mathbf{0,00}7542 \quad (3.a)$$

за вариант „2” то е:

$$P_A = \omega \cdot dT = \mathbf{0,02265.0,167} = \mathbf{0,00}3783 \quad (3.b)$$

   e) Вероятност за безотказна работа:

за вариант „1”

$$P_R = \mathbf{1} - P_A = \mathbf{1 - 0,00}7542 = \mathbf{0},992458 \quad (4.a)$$

за вариант „2”

$$P_R = \mathbf{1} - P_A = \mathbf{1 - 0,00}3783 = \mathbf{0},996217 \quad (4.b)$$

   f) Коефициент на готовност

за вариант „1”

$$K_г = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1} + P_A} = \mathbf{0},992514 \quad (5.a)$$

за вариант „2”

$$K_г = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1} + P_A} = \mathbf{0},996232 \quad (5.b)$$

   g) Коефициент на неготовност (принудително прекъсване)

за вариант „1”

$$К_{п} = \frac{P_A}{1+P_A} = 1 - К_{г} = 0,007486 \quad (6.a)$$

за вариант „2”

$$К_{п} = \frac{P_A}{1+P_A} = 1 - К_{г} = 0,003768 \quad (6.b)$$

1.2. ОЦЕНКА НА НАДЕЖДНОСТТА НА РАБОТА ЗА АВАРИРАЛИТЕ ТРАНСФОРМАТОРИ ОТ МВЕЦ-те От ВЕЦ „Своге”

Аварии на трансформатори са станали в МВЕЦ „Лакатник” и МВЕЦ „Свражен”, Тези трансформатори са сухи, докато трансформаторите на другите МВЕЦ са масло напълнени. Ако се приеме ,че времето до авария на авариралите трансформатори е разпределено по експоненциален закон, то могат да се определят следните надеждностни показатели от статистическите данни на табл. 1.

- **Средна стойност на времето до възникване на авария**

$$\mathbf{T_{ср.}} = \frac{\mathbf{T_{лакат.}} + \mathbf{T_{свраж.}}}{2} = \frac{6+1}{2} = 3,5 \text{ год.} \quad (7)$$

- **Честота на авариите на трансформаторите за година**

$$\omega = \frac{1}{T_{ср}} = \frac{1}{3,5} = 0,2856 \text{ год}^{-1} \quad (8)$$

- **Вероятност за авария на трансформатор**

за вариант„1”

$$P_A = \omega \cdot dT = 0,2856.0,33 = 0,0951048 \quad (9.a)$$

за вариант „2” то е:

$$P_A = \omega \cdot dT = 0,2856.0,167 = 0,0476952 \quad (9.b)$$

- **Вероятност за безотказна работа:**

за вариант „1”

$$P_R = 1 - P_A = 1 - 0,0951048 = 0,9048952 \quad (10.a)$$

за вариант „2”

$$P_R = 1 - P_A = 1 - 0,047695 = 0,9523487 \quad (10.b)$$

- **Коефициент на готовност**

за вариант „1”

$$К_{г} = \frac{1}{1+P_A} = 0,913154613 \quad (11.a)$$

за вариант „2”

$$К_{г} = \frac{1}{1+P_A} = 0,954476073 \quad (11.b)$$

- **Коефициент на неготовност (принудително прекъсване)**

за вариант „1”

$$К_{п} = \frac{P_A}{1+P_A} = 1 - К_{г} = 0,086845387 \quad (12.a)$$

за вариант „2”

$$К_{п} = \frac{P_A}{1 + P_A} = 1 - К_{г} = 0,045523927 \quad (12.b)$$

2. ОЦЕНКА НА ОПТИМАЛНИЯ ПЕРИОД НА ПЛАНОВ РЕМОНТ НА ТРАНСФОРМАТОРИТЕ ОТ ВЕЦ „Своге" НА БАЗА НА ОЦЕНКА НА НАДЕЖДНОСТТА И НА МИНИМАЛНИТЕ РАЗХОДИ ЗА РЕМОНТ

- **Идеално възстановяване (ремонт)**

При замяната на аварирал трансформатор с нов и времето за възстановяване е малко в сравнение с продължителността на работа, то тогава може да се приеме, че възстановяването (ремонтът) е идеален. Периодът през който е събирана информация за аварийността на всички трансформатори от МВЕЦ на ВЕЦ „Своге" е 17,66 години. През този период са станали 2 (две) аварии съпроводени със замяната на трансформаторите с нови. Ако се приеме, че плътността на разпределение е равномерна, то за конкретния случай, тя е следната:

$$f_{\tau}(t) = \frac{1}{\tau} = \frac{2}{17,66} = \frac{1}{8,83} = 0,113250 \text{ год}^{-1} \quad (13)$$

където $\tau = 8,83$

Функцията на разпределение за безотказна работа се определя с израза:

$$F_R(t) = \int_t^{\infty} f_{\tau}(t)dt = \frac{1}{8,83}\int_t^{8,83} dt = 1 - \frac{1}{8,83}\cdot t = 1 - 0,11325 \cdot t \quad (14)$$

Интензивността на отказ е:

$$\lambda(t) = \frac{f_{\tau}(t)}{F_R(t)} = \frac{1}{8,83 - t} \quad (15)$$

Интензивността на отказ (авария) в моментите t=0 и t=1 год. е както следва:

$$\lambda(0) = \frac{1}{8,83} = 0,113250;$$
$$\lambda(1) = \frac{1}{7,83} = 0,127714; \quad (16)$$

Вероятността за безотказна работа в момента t=1 година, е:

$$F_R(1) = 1 - 0,11325 = 0,886750 \quad (17)$$

Средната интензивност за авария за интервал от Ti =1 година,е:

$$\lambda_{ср.}(t) = \frac{1}{T_i}\int_0^{T_i} \lambda(t) = \int_0^1 \frac{dt}{8,83 - t} =$$
$$= \ln(8,83 - t)\Big|_0^1 = \ln\frac{8,83}{7,83} = 0,120193 \text{ год}^{-1} \quad (18)$$

Средно време за безотказна работа е:

$$T_{ср.} = \frac{1}{\lambda_{ср.}} = 8,32 \text{ год.} \quad (19)$$

Математическото очакване (средната стойност) на функция с равномерно разпределение на аварийните откази, чиято плътност на разпределение е дадена с формула (7), е:

$$m = \frac{0 + 8,83}{2} = 4,415 \text{ год.} \quad (20)$$

Средната стойност на потока на аварийните откази (честотата на идеалния авариен ремонт) при липса на планови ремонти е:

$$\omega(t) = f_a = \frac{1}{m} = \frac{1}{\mathbf{4,415}} = \mathbf{0},2265 \text{ год}^{-1} \tag{21}$$

Средната стойност на потока на авариите е:

$$\omega_{ср.}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) = \frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) = \frac{1}{8,83} \cdot \exp\left(\frac{t}{8,83}\right) \tag{22}$$

където: $f_k(t) = \frac{1}{8,83} \frac{1}{(k-1)!} \left(\frac{t}{8,83}\right)^{k-1}$

Честотата на идеалния авариен ремонт през интервалите за извършване на идеален планов ремонт се определя с израза:

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{1}{t_{пл.рем.}} \int_0^{t_{пл.рем.}} \omega_{ср.}(t)dt = \frac{1}{t_{пл.рем.}} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \left[\exp\left(\frac{t_{пл.рем.}}{\tau}\right) - 1\right] = \\ &= \frac{1}{t_{пл.рем.}} \cdot \frac{1}{8,83} \cdot \left[\exp\left(\frac{t_{пл.рем.}}{8,83}\right) - 1\right] \end{aligned} \tag{23}$$

При извършване на планов ремонт всяка година, т.е. $t_{пл.рем.} = 1$, то за средната стойност на потока на авариите и за честотата на идеалния авариен ремонт се получава:

$$\begin{aligned} &\omega_{ср.}(1) = \mathbf{0},1268 \text{ год}^{-1} \\ &f_{a,пл.рем.} = \mathbf{0,119912} \text{ год}^{-1} \end{aligned} \tag{24.a}$$

Без планови идеални ремонти тези стойности са:

$$f_a = \mathbf{0},2265 \text{ год}^{-1} \tag{24.b}$$

За да се определи оптималния срок за идеален планов ремонт е необходимо разходите за идеален авариен и планов ремонти да са минимални, т.е.:

$$C = C_a \cdot f_a + C_{пл.} \cdot f_{пл.} \tag{25}$$

където:

$$f_{пл.} = \frac{1}{t_{пл.рем}} \tag{25.a}$$

C_a - цената на авариен ремонт; $C_{пл.}$ - цената на планов ремонт. Замествайки в (25) честотите на идеалните аварийни и планови ремонти (23) и (24a) се получава израза:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{C}{C_a} = \frac{1}{t_{пл.рем.}} \int_0^{t_{пл.рем.}} \omega_{ср.}(t) + \frac{C_{пл.}}{C_a} \cdot \frac{1}{t_{пл.рем}} = \\ &= \frac{1}{t_{пл.рем}} \left[\int_0^{t_{пл.рем.}} \omega_{ср.}(t) + \frac{C_{пл.}}{C_a}\right] \end{aligned} \tag{26.a}$$

$$C_0 \cdot t_{пл.рем} = \int_0^{t_{пл.рем.}} \omega_{ср.}(t) + \frac{C_{пл.}}{C_a} \tag{26.b}$$

След диференциране на (26b) и приравняване на нула се получава:

$$C_{\mathbf{0}} = \omega_{\text{ср.}}\left(t_{\text{пл.рем.}}\right) + \mathbf{0} \tag{27.a}$$

$$\frac{\mathbf{1}}{t_{\text{пл.рем.}}}\left[\int_{\mathbf{0}}^{t_{\text{пл.рем.}}} \omega_{\text{ср.}}(t) + \frac{C_{\text{пл.}}}{C_a}\right] = \omega_{\text{ср.}}\left(t_{\text{пл.рем.}}\right) \tag{27.b}$$

$$\int_{\mathbf{0}}^{t_{\text{пл.рем.}}} \omega_{\text{ср.}}(t) + \frac{C_{\text{пл.}}}{C_a} = t_{\text{пл.рем.}} \cdot \omega_{\text{ср.}}\left(t_{\text{пл.рем.}}\right) \tag{27.c}$$

При $\omega_{\text{ср.}}(t) = \frac{\mathbf{1}}{8{,}83} \cdot \exp\left(\frac{t}{8{,}83}\right)$ и отношение цената на плановите към аварийните ремонти 0,05 (1:20), оптималният временен интервал на планови ремонти се определя от равенството:

$$\int_{\mathbf{0}}^{t_{\text{пл.рем.}}} \frac{\mathbf{1}}{8{,}83} \cdot \exp\left(\frac{t}{8{,}83}\right) + \mathbf{0{,}05} = \frac{t_{\text{пл.рем.}}}{8{,}83} \cdot \exp\left(\frac{t_{\text{пл.рем.}}}{8{,}83}\right) \tag{28.a}$$

$$\exp\left(\frac{t_{\text{пл.рем.}}}{8{,}83}\right) - \mathbf{0{,}95} = \frac{t_{\text{пл.рем.}}}{8{,}83} \cdot \exp\left(\frac{t_{\text{пл.рем.}}}{8{,}83}\right) \tag{28.b}$$

$$\exp\left(\frac{t_{\text{пл.рем.}}}{8{,}83}\right)\left[\mathbf{8{,}83} - t_{\text{пл.рем.}}\right] = 8{,}3885 \tag{28.c}$$

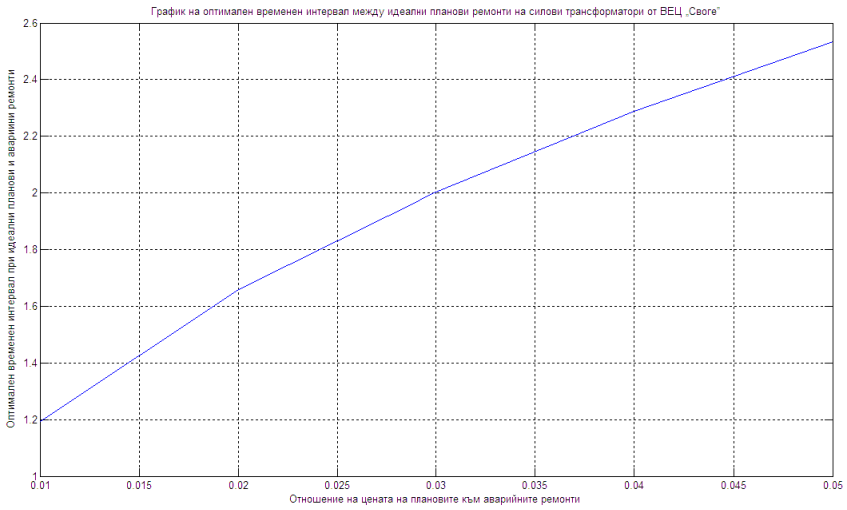
За оптимален временен интервал на планови ремонти при отношение цената на плановите към аварийните ремонти:

0,05 (1:20) за оптималния планов ремонт $\mathbf{t_{пл.рем.}}$ **= 2,5346** год.

0,02 (1:50) - $\mathbf{t_{пл.рем.}}$ **= 1,6580** год.

0,01 (1:100) - $\mathbf{t_{пл.рем.}}$ **= 1,1934** год**.**

Графично оптималният временен интервал на планови ремонти е представен на фиг.1.



Фиг.1.

3. ИЗВОДИ

1. Изчислени са коефициентите на готовност определящи при приетия подход на резервиране вероятността МВЕЦ от ВЕЦ „Своге” да работят. Вижда се, че времето на възстановяване съществено влияе на надеждността на работата, а времето през което централата не работи и не произвежда енергия значително намалява.
2. При малко аварии на дадено съоръжение е невъзможно да се определи закона на разпределение на времето за безотказна работа. Като е прието, че аварийността на силовите трансформатори имат равномерно разпределение, а това за тези съоръжения може да се предположи, тъй като с времето изолацията старее и интензивностите на откази нараства, бяха определени оптималните интервали за извършване на планови ремонти. За оптимални периоди се приемат тези при които средствата за авариен и планов ремонт се изравняват.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith A.M. Reliability-Centered Maintenance. McGraw-Hill, Inc., New York,1993
2. Moubray J. Reliability-Centered Maintenance. Industrial Press Inc., New York,1992
3. Loehlein A. T. Maintenance is one key to diesel generator set reliability, Power topic #7004 | Technical information from Cummins Power Generation
4. Endrenyi J., G.J.Anders, A.M. Leite da Silva Probabilistic evaluation of the effect of maintenance on Reliability – an application, IEEE Trans. On Power Systems No.2, May 1988.
5. Руденко Ю.Н., М. Б. Чельцов. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах, Новосибирск, 1974.

Автори*:* Валентин Колев, доц. д-р, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vkolev@tu-sofia.bg*; Васил Шуманов, маг. инж, докторант, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vassil.shumanov@pvbgroup.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Светлана Цветкова

СЪБИРАНЕ И ОБРАБОТКА НА ИНФОРМАЦИЯ ЗА НАДЕЖДНОСТТА НА ФУНКЦИОНИРАНЕ НА РУСЛОВИТЕ ВОДНОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЦЕНТРАЛИ ОТ ВЕЦ „СВОГЕ”

Васил Шуманов

***Резюме**: В статията са описани основните етапи свързани със събирането и обработването на статистическата информация, необходима за оценка на надеждността на руслова водноелектрическа централа. За обработка на събраната информация за интервалите на работа и авария на различното оборудване от централите на ВЕЦ „Своге” са използвани програмните пакети MatLab и Excel.*
***Ключови думи:** оценка на надеждността на ВЕЦ „Своге”*

COLLECTING AND PROCESSING OF AN INFORMATION ABOUT THE OPERATION RELIABILITY OF “VEZ Svoge” RUN OF THE RIVER HYDROPOWER PLANT

Vassil Shumanov

***Abstract:** In this article are described main steps of collecting and processing of necessary statistical information for reliability valuation of run of the hiver hydropower plant. Processing of collected information for work and failure intervals of different equipment of “Vez Svoge” power plants is maybe by software packages MatLab and MS Excel.*
***Keywords:** Estimation of reliability of “VEZ Svoge”*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Във всички предприятия в които се произвеждат технически сложни продукти за които се изисква качество и надеждност са внедрени системи при които се оценява жизнения цикъл на изделието. Това са предприятия от космическата, военната, автомобилната и др. индустрии, в които са въведени (Система за събиране и обработка на информацията за качеството и надеждността) използващи CALS-технология [1], [2].

Оценяването на ефективността за поддържане на качество на електроснабдяването на консуматорите е най-важната задача за електрическите компании участващи в дерегулирания пазар. За постигане на тези цели се използват различни механизми, като стандарти, глоби и др. които се дискутират в [3], [4] и др. Регулиращите механизми включват оценяване на качеството и надеждното захран-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ване на консуматорите, характеризиращо се с броя и продължителността на прекъсването. Системата за събиране на информация за оценка на надеждността в Норвегия е FASIT (Fault And Supply Interruption information Tool) в [5], [6], [7].

Съществуват стандарти и указания за събиране на статистическа информация за надеждността на оборудването [8] и статистика за прекъсванията [9]. В изготвяните доклади за оценка на качеството и надеждността на електроснабдяването на консуматорите се използват надеждностни показатели, като - SAIFI, CAIFI, SAIDI, CTAIDI и CAIDI. При оценка на надеждността на производството на енергия и оценка на надеждността на мощностите се прилагат други стандартизирани показатели и т.н. В статия [10] са дадени стъпките, които са необходими при оценка на надеждността на руслови водноелектрически централи.

В предлаганата статия са показани стъпките за събиране и обработка на статистическата информация на МВЕЦ-те от Каскада Среден Искър (ВЕЦ ″Своге″). ВЕЦ ″Своге″ е съставена от пет малки ВЕЦ – *МВЕЦ „Церово”, МВЕЦ „Лакатник” МВЕЦ „Свражен”, МВЕЦ „Прокопаник” и МВЕЦ „Оплетня”.*

Събирането, обработката и анализа на статистическата информация включва:

- Събиране на информацията за аварийността на оборудването в подходяща форма.
- Формиране на рангова статистика;
- Хипотези за законите за разпределение и определяне на функцията на разпределение Cumulative Distribution Function (probability) (CDF); функцията на плътността на разпределение Probability Density Function (PDF) .
- Определяне на параметрите на законите на разпределение (средни стойности, интензивност на отказите и др.
- Проверка на хипотезата на закона на разпределение със статистическите данни.

При обработка на събраната информация за интервалите на работа и авария на различното оборудване от централите на ВЕЦ „Своге” са използвани програмните пакети MatLab и Excel.

2. ЕТАПИ НА ОБРАБОТКА НА СТАТИСТИЧЕСКИТЕ ДАННИ ЗА АВАРИЙНОСТТА НА МВЕЦ-те ОТ ВЕЦ „Своге”

Етап 1.1

- Класификация на авариите с цел изграждане на надеждностен модел на МВЕЦ.

Класификацията е дадена в табл.1.

Табл.1

Класификация на авариите	
Електрическата част на централата	
1.a	Системата за управление на цялата централа
1.b	Силов трансформатор
1.c	Апаратура средно напрежение (прекъсвачи, разединители, кабели и др.)
1.d	Електро генератор
1.e	Възбудителната система
1. f	Собствени нужди (трансформатор с.н., табла с.н., кабели н.н. и др.)
Хидротехническата част на централата	
2.a	Турбина (клапан, турбинни лагери, работното колело)
2.b	Системата за управление на турбината (направляващ апарат, маслонапорна система и др.)
2.c	Затворни съоръжения (затвори, саваци и др.)
2.d	Мултипликатор
Външни фактори	
3.a	Електропровод за връзка с електрическата мрежа
3.b	Метеорологична обстановка (поройни дъждове ,сняг и др.)
Ремонти	
4.a	Капитални (основни) планови ремонти
4.b	Текущи планови ремонти

Етап 1.2

- Информация за прекъсвания на нормалната работата на МВЕЦ.

Етап 1.3

- Филтриране (сортиране) на авариите в зависимост от кода - Exel (Data(Filter→AutoFilrer).

Етап 1.4

Определяне на продължителността (в часове) на дадено състояние съгласно класификацията от табл.1.

В табл.2 са дадени извършените в Етап 1.2 и Етап 1.3 действия и са показани част от изчислените продължителности (MU [h]) на състояние 3.а, т.е. продължителността на аварията на връзката с електрическата система (Network disconnection) за МВЕЦ „Свражен” за 2010 год.

Табл.2

МВЕЦ „Свражен”-2010 год					
STOP	**START**	**CODE**	**REASON**	**ACTION**	**MU [h]**
04.1.2010 11:21	04.1.2010 11:54	3a	Network disconnection	manual start	0,5500
17.1.2010 01:35	17.1.2010 02:40	3a	Network disconnection	manual start	1,0833
18.2.2010 05:10	18.2.2010 06:33	3a	Network disconnection	manual start	1,3833
25.2.2010 10:17	25.2.2010 10:47	3a	Network disconnection	Change of the filter of the gear box and F02 of the oil system	0,5000
09.3.2010 12:46	09.3.2010 13:07	3a	Network disconnection	manual start	0,3500
13.3.2010 07:27	13.3.2010 08:30	3a	Network disconnection	manual start	1,0500

Етап 1.5

- Определяне на основни параметри на статистическата информация използвани при оценка на надеждността.

A. Период на експлоатация на МВЕЦ в часове [h].

$\mathbf{T}$ [h].

B. Продължителност на ремонти (капитални и планови) в часове [h].

$$\mathbf{T_{рем.}}$$

C. Продължителност на всички аварийни състояния в часове [h].

$$\mathbf{T_{ав.}} = \sum_{i=1}^{m} \mathbf{T_{i,ав.}}$$

D. Продължителност на неработни състояния (ремонт и авария - прекъсване на електропроизводството) в часове [h].

$$\mathbf{T_{прек.ел..}} = \mathbf{T_{рем.}} + \mathbf{T_{ав.}}$$

E. Продължителност на работа в часове [h].

$$\mathbf{T_{раб}} = \mathbf{T} - \mathbf{T_{прек.ел}}.$$

F. Брой на попадане в едно от аварийните състояния (според класификация - табл.1).

$$\mathbf{n_{ав.}}$$

G. Продължителност на дадено аварийно състояние в часове [h].

$$\mathbf{T_{i,ав.}}$$

H. Средна продължителност на ремонтите в часове [h].

$$\bar{\mathbf{T}}_{\mathbf{рем.}} = \frac{\mathbf{T_{рем.}}}{\mathbf{n_{рем.}}}$$

I. Средна продължителност в дадено аварийно състояние в часове [h].

$$\bar{\mathbf{T}}_{\mathbf{i,ав.}} = \frac{\mathbf{T_{i,,ав}}}{\mathbf{n_i}}$$

J. Общо време за намиране извън дадено аварийно състояние в часове [h].

$$\mathbf{T_{i-out,ав.}} = \mathbf{T} - \mathbf{T_{i,ав.}}$$

K. Средна продължителност извън дадено аварийно състояние в часове [h].

$$\bar{\mathbf{T}}_{\mathbf{i-out,ав.}} = \frac{\mathbf{T_{i-out,ав.}}}{\mathbf{n_i}}$$

L. Средна продължителност в работа извън дадено аварийно състояние в часове [h].

$$\bar{\mathbf{T}}_{\mathbf{i,раб}} = \frac{\mathbf{T_{раб}}}{\mathbf{n_i}}$$

Като пример в табл.3 е показана обобщената статистика за аварийните състояния на МВЕЦ *„Свражен”* за периода 2009-2014 година

A. Периодът на експлоатация в часове [h] е 5 години и 7месеца.

$\mathbf{T = 49680}$ [h]

B. Продължителност на ремонти (капитални и планови) в часове [h].

$\mathbf{T_{рем.} = 292,2}$ [h].

C. Продължителност на всички аварийни състояния в часове [h]

$\mathbf{T_{ав.} = 2339,6}$ [h]

E. Продължителност на работа в часове [h].

$\mathbf{T_{раб} = 47048,2}$ [h].

Табл.3

Състояние	Брой на попадане в състоянието	Сумарно време в състоянието в часове [h]	Средна продължителност на присъствие в състоянието в [h]	Сумарно време извън състоянието в часове [h]	Средна продължителност на времето извън състоянието в [h]	Средна продължителност на работа извън дадено аварийно състояние в часове [h]
	F	**G**	**I**	**J**	**K**	**L**
1a	8	17,63	2,20	49662,37	6207,80	5878,822
1b	6	621,85	103,64	49058,15	8176,36	7737,726
1c	1	3,13	3,13	49676,87	49676,87	47045,07
1d	3	29,85	9,95	49650,15	16550,05	15672,78
1e	2	54,17	27,09	49625,83	24812,92	23497,02
1f	3	6,18	2,06	49673,82	16557,94	15680,67
2a	2	568,13	284,07	49111,87	24555,94	23240,04
2b	23	413,42	17,97	49266,58	2142,03	2027,599
2c	1	0,08	0,08	49679,92	49679,92	47048,12
2d	3	13,5	4,50	49666,50	16555,50	15678,23
3a	391	407,77	1,043	49272,23	126,02	119,29
3b	4	203,88	50,97	49476,12	12369,03	11711,08
4a	1	241,33	241,33	49438,67	49438,67	46806,87
4b	7	50,87	7,27	49629,13	7089,88	6713,91
	455					

3. АНАЛИЗ НА СТАТИСТИЧЕСКАТА ИНФОРМАЦИЯ ЗА АВАРИЙНОСТТА

Етап 2.1

- Формиране на рангова статистика.

Етап 2.2

- Параметрите на статистическата извадка и емпирическа функция на разпределение

От данните на временните интервали за аварии се определят следните параметри (средна стойност, медиана, функция на разпределение). Тези параметри се определят в програмна среда на MatLab, като се използва функцията за определяне на емпиричната функция за разпределение **cdfplot**.

Етап 2.3

- Закони за разпределение и определяне на параметрите им

Законите за разпределение и определяне на параметрите им става като се използва програмната среда на MatLab (Statistics Toolbox) - функция **dfittool** .

Етап 2.4

- Закони за разпределение и определяне на параметрите чрез използване на вероятностната диаграма на експоненциалното разпределение.

Вероятностните диаграми дават възможност за оценка на съгласуването на статистическия материал и избраното разпределение.

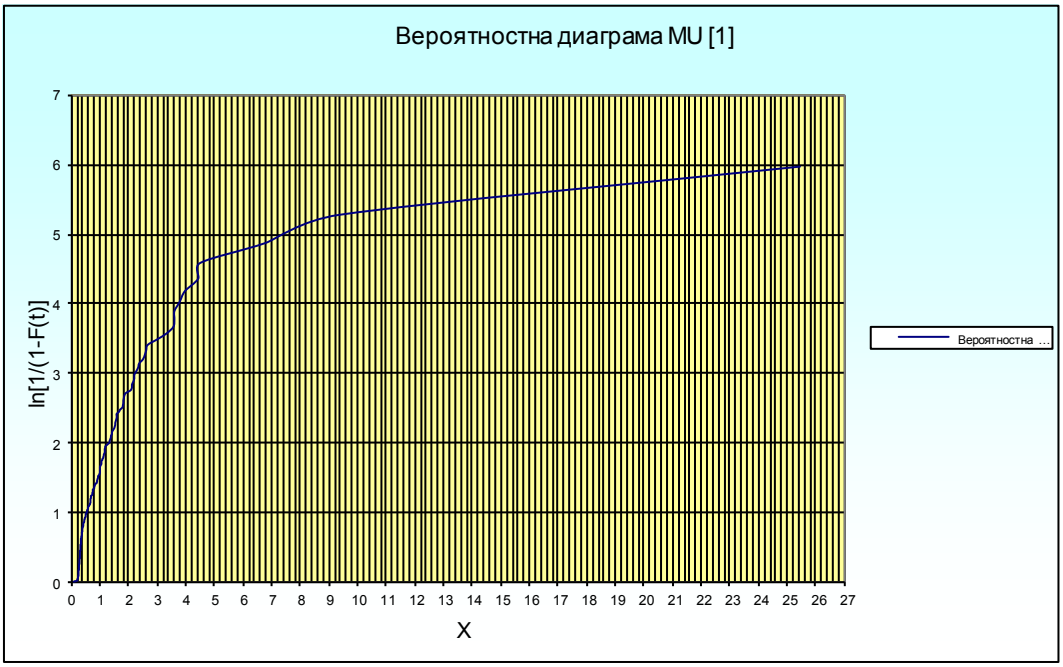
Ако се трансформира функцията на разпределение във вид, удовлетворяващ уравнението на права линия, т.е. $\mathbf{y = a.t + b}$, то може да се определи кое разпределение най-добре се съгласува със статистическия материал.

За експоненциално разпределение представено във вида $e^{\lambda.t} = \frac{1}{1 - F_\tau(t)}$ след логаритмуване се получава $ln\left[\frac{1}{1 - F_\tau(t)}\right] = \lambda.t$. Това уравнение съвпада с уравнението на права линия, като $\mathbf{y = ln\left[\frac{N+1}{N+1-i}\right]}$, а $\mathbf{a = \lambda}$.

Ако се положи $\mathbf{t = \frac{1}{\lambda}}$, ординатата приема стойност 1, т.е.:

$$ln\left[\frac{1}{1 - F_\tau(\lambda)}\right] = \lambda.\frac{1}{\lambda} = 1; \quad \frac{1}{1 - F_\tau(\lambda)} = e = 2{,}7273$$

На фиг.1 е показана вероятностната диаграма на експоненциалното разпределение на времето за намиране в състояние 1 от МВЕЦ *„Свражен”*. От тази диаграма е определен параметъра μ(x), който е 0,2459.

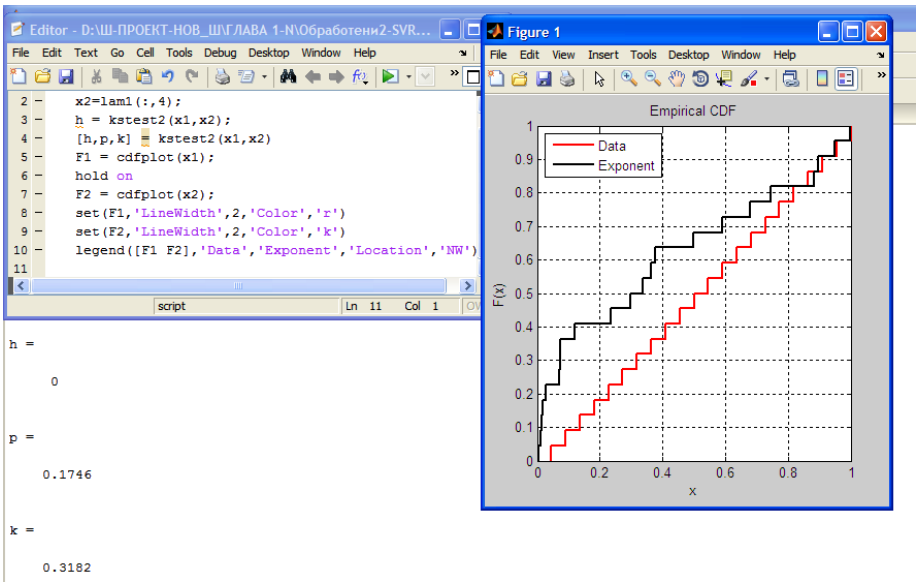


Фиг.1.

Етап 2.5

- Проверка на хипотезата на закона на разпределение със статистическите данни.

Проверката на хипотезите за съгласуване на статистическия закон на разпределение с избран закон на разпределение се извърши с помощта на критерия на Колмогоров-Смирнов. За целта се използва програмната среда на MatLab - функция **h = kstest2(x1,x2).** Нулева хипотеза е когато **x1** и **x2** имат едно и също разпределение, т.е. индикаторът е **h=0.** При индикатора **h=1**, нулевата хипотеза се отхвърля при 5% ниво на значимост. Нивото на значимост се дава с параметъра **k**. На фиг.2 са дадени програмата за проверка на хипотезата за експоненциално разпределение по критерия на Колмогоров-Смирнов и сравняваните функции на разпределение (преход от работно състояние в състояние 1).



Фиг.2.

Етап 2.7

- Интензивности на преход между състоянията

За определяне на установените (пределните) вероятностни при използване на Марковски модел за оценка на надеждността е необходимо да бъдат определени интензивностите на преход между състоянията.

Според теоремата на Колмогоров пределните вероятности в Марковска верига не се влияят съществено от функцията на разпределение на времето за намиране в даденото състояние и може да бъде прието, че разпределението е експоненциално. По този начин интензивността на преход е равна $\mu = 1/m_{cp.}$, където $m_{cp.}$ е средната стойност на статистическата извадка на времето за присъствие в даденото състояние.

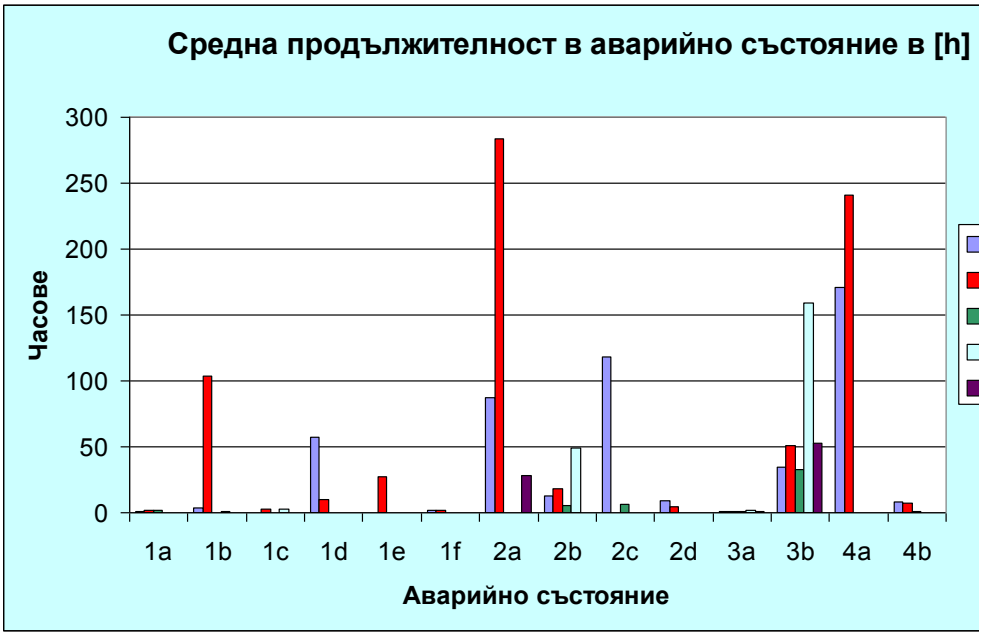
Изчислените характеристики за различните състояния в които се намира МВЕЦ „Свражен” са дадени в табл.4 за всички състояния съгласно табл.1 за периода 2009-2014 година

Табл.4

Състояние	Брой на попадане в състоянието	Средна продължителност на присъствие в състоянието в [h]	**Интензивност на преход от аварийно състояние**	Средна продължителност на времето извън състоянието в [h]	**Интензивност на преход от начално състояние „0”**	Средна продължителност на работа извън дадено аварийно състояние в часове [h]	**Интензивност на преход от работно състояние**
i	**n**	**I**	**μ_i**	**K**	**λ_0**	**L**	**$\lambda_{раб.}$**
1a	8	2,204	0,4536862	6207,80	0,000729781	5878,821	0,000170102
1b	6	103,642	0,0096486	8176,36	0,001286471	7737,726	0,000129237
1c	1	3,133	0,3191489	49676,87	0,000020129	47045,070	0,000021256
1d	3	9,950	0,1005025	16550,05	0,000125272	15672,78	0,000063805
1e	2	27,083	0,0369231	24812,92	0,000063315	23497,02	0,000042559
1f	3	2,061	0,4851752	16557,94	0,000095416	15680,67	0,000063773
2a	2	284,067	0,0035203	24555,94	0,003179650	23240,03	0,000043029
2b	23	17,975	0,0556339	2142,03	0,000659486	2027,599	0,000493194
2c	1	0,083	12,0	49679,92	0,000020129	47048,12	0,000021255
29	3	4,500	0,2222222	16555,50	0,011768860	15678,23	0,000063783
3a	391	1,043	0,9588817	126,02	0,008208541	119,29	0,008383283
3b	4	50,970	0,0196194	12369,03	0,000103172	9368,865	0,000106737
4a	1	241,333	0,0041436	49438,67	0,000020129	46806,87	0,000021364
4b	7	7,267	0,1376147	7089,88	0,000267608	6713,905	0,000148945
	455						

4. ОБОБЩЕНА СТАТИСТИКА ЗА АВАРИЙНИТЕ СЪСТОЯНИЯ НА МВЕЦ От ВЕЦ „Своге”

В табл.5 и фиг.3 са дадени определени статистически величини от МВЕЦ-те от ВЕЦ „Своге”



Фиг.3.

Табл.5

	***МВЕЦ „Лакатник”* за 2008-2015 година**			***МВЕЦ „Сражен”* за 2009-2015 година**			***МВЕЦ „Церово”* за 2012-2015 година**			***МВЕЦ „Прокопаник”* за 2013-2015 година**			***МВЕЦ „Оплетня”* за 2013-2015 година**		
Състояние	Брой на попадане в състоянието	Средна продължителност на присъствие в състоянието в [h]	Средна продължителност на времето извън състоянието в [h]	Брой на попадане в състоянието	Средна продължителност на присъствие в състоянието в [h]	Средна продължителност на времето извън състоянието в [h]	Брой на попадане в състоянието	Средна продължителност на присъствие в състоянието в [h]	Средна продължителност на времето извън състоянието в [h]	Брой на попадане в състоянието	Средна продължителност на присъствие в състоянието в [h]	Средна продължителност на времето извън състоянието в [h]	Брой на попадане в състоянието	Средна продължителност на присъствие в състоянието в [h]	Средна продължителност на времето извън състоянието в [h]
1a	**12**	1,18	4736,65	**8**	2,204	6207,80	**6**	1,41	3873,41	**0**	0	0	**0**	0	0
1b	**6**	3,87	9471,79	**6**	103,642	8176,36	**0**	0	0	**1**	0,82	13301,18	**0**	0	0
1c	**0**	0,00	0,00	**1**	3,133	49676,87	**0**	0	0	**1**	2,83	13299,17	**0**	0	0
1d	**5**	57,31	11313,49	**3**	9,950	16550,05	**0**	0	0	**0**	0	0	**0**	0	0
1e	**3**	0,36	18950,97	**2**	27,083	24812,92	**0**	0	0	**0**	0	0	**0**	0	0
1f	**2**	2,23	28424,77	**3**	2,061	16557,94	**0**	0	0	**0**	0	0	**0**	0	0
2a	**5**	87,72	11283,08	**2**	284,067	24555,94	**0**	0	0	**0**	0	0	**1**	28,00	9092,00
2b	**28**	12,87	2017,63	**23**	17,975	2142,03	**9**	5,16	2578,06	**7**	49,05	1851,24	**0**	0	0
2c	**4**	118,32	14095,18	**1**	0,083	49679,92	**4**	6,40	5805,84	**0**	0	0	**0**	0	0
2d	**1**	9,02	56844,98	**3**	4,500	16555,50	**0**	0	0	**0**	0	0	**0**	0	0
3a	**405**	1,15	139,23	**391**	1,043	125,69	**58**	0,81	399,62	**66**	2,15	199,76	**48**	0,86	9078,52
3b	**15**	34,68	3755,58	**4**	50,970	12369,03	**4**	32,83	5773,40	**4**	158,72	3172,78	**2**	52,48	9015,03
4a	**3**	170,97	18780,36	**1**	241,333	49438,67	**0**	0	0	**0**	0	0	**0**	0	0
4b	**4**	8,33	14205,17	**7**	7,267	7089,88	**5**	0,51	4644,48	**0**	0	0	**0**	0	0

5. ИЗВОДИ

1. Направена е класификация на причините за спиране на производството на електрическа енергия в русловите водноелектрически централи. Спиране може да се дължи на аварии на оборудването в самата централа, като– авари в електрическата и хидравлическата й част; планови ремонти или на външни фактори, като прекъсване на електропровода по който се изнася електрическата енергия или усложнена метрологична обстановка. Вътре във всяка от тези четири основни групи водещи до спиране на производството са формирани и подгрупи.
2. На база на статистическите извадки за продължителността на времето за намиране в състояние, водещо до прекъсване на производствения процес са формирани рангови статистики, като са определени основните параметри, като (средни стойности, средно квадратични отклонения, медиани и др.).

3. Извършена е проверка за съгласуване на статистическите данни с експоненциалното разпределение по критерия на Колмогоров-Смирнов. При 95% доверителен интервал се оказва, че някои от извадките не се подчиняват на този закон на разпределение.
4. Определени са интензивностите на преход между състоянията, позволяващи да се определят пределните вероятностни състояния.
5. Цялата обработка на статистическата информация се извърши като се използват програмни пакети от програмните среди на MatLab и Excel.

Литература:

1. A.S.Shalumov, Nikishkin S.I., Noskov V.N. Vvedenie v CALS-tekhnologii [Introduction to CALS-technology],Kovrov, 2002.
2. *http://www.cals.ru/policy/ CALS-технологии в России*
3. CEER, 2001, "Quality of electricity supply: Initial benchmarking on actual levels, standards and regulatory strategies", *http://www.energy-regulators.eu*
4. T. Solver, 2005, *Reliability in performance-based regulation*, Royal Institute of Technology, Sweden, Lic. thesis, ISBN 91-7178-136-6.
5. G.Kjolle, Heggset J, Sagen K. FASIT – a tool for collection, calculation and reporting of reliability data, C I R E D, 20th International Conference on Electricity Distribution; Prague, 8-11 June 2009
6. J. Heggset, P. Langseth, K. Larsen, M. Lossius, B. T. Hjartsjø, T. Dyrhaug, 1999, "Fault and interruption statistics: Experiences, utilitarian values, new requirements" in *Proc. CIRED 1999*
7. J. Heggset, G. H. Kjølle, 2000, "Experiences with the FASIT reliability data collection system", *Proc. 2000 IEEE/PES WM Singapore*, Jan. 2000, Paper no 543
8. J. Heggset, J. S Christensen, S. Jansson, K. Kivikko, A. Heieren, R. K. Mork, 2005, "Common guidelines for reliability data collection in Scandinavia", *Proc. CIRED 2005*
9. .Nordel, "Fault statistics", *http://www.nordel.org*
10. В. Колев, Шуманов В Оценка на надеждността на руслови водноелектрически централи, Конференция ЕФ 2014, Созопол

Автори: Васил Шуманов, маг. инж, докторант, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vassil.shumanov@pvbgroup.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Светлана Цветкова

ЗАЩИТИ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ЦЕНТРАЛИ

Нели Харизанова, Димитър Богданов

Резюме: *В представеният доклад са разгледани различните функции за защита от възможни повреди прилагани във фотоволтаичните електроцентрали (ФвЕЦ). Разгледани са основните принципи на работа на системите за защита и тяхната работа при различни условия. С увеличаването на броя и инсталираната мощност на ФвЕЦ изучаването на методите за тяхната защита придобива все по-голямо значение.*
Ключови думи: *Фотоволтаични (ФВ) панели, защити, интелигентни електронни устройства, инвертори, максималнотокова защита*

PROTECTIONS FOR PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

Nelly Harizanova, Dimitar Bogdanov

Abstract: *In the report are presented various methods for protection of photovoltaic power plants (PVPPs) of possible faults, related to their operation. The basic principles of their operation and their implementation in the PVPPs under various conditions is outlined. With the increase of the installed capacity and number of photovoltaics, the studies on the methods for their protection become very important.*
Keywords: *PV modules, relay protection systems, intelligent electronic devices, photovoltaic inverters, overcurrent protection system*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните 50 години фотоволтаичните панели се развиват в устойчива и адаптивна технология. През последните 10 години инсталациите за търговско производство на електрическа енергия от слънчева енергия придобиха голяма популярност. Най-голямата фотоволтаична централа “Solar star” в света е завършена през юни 2015 г. и е разположена близо до Rosamond, Калифорния, САЩ. Централата е с инсталирана мощност 579 MW, разположена е на площ от 13 кв.км. и използва 1.7 милиона соларни панели. Най-голямата ФвЕЦ на Балканите се намира в с. Караджалово, област Пловдив, България и е с инсталирана мощност 60.4 MW. Енергията, която централата произвежда на годишна база е над 75 000 MWh. Натрупаните данни от експлоатация на ФвЕЦ показват, че те са с добра степен на прогнозируемост по отношение на производството на електрическа енергия. Метеорологичните явления влияят на производителността, но като цяло ФвЕЦ в България се вписват добре в покриването на дневните товари и по-конкретно на завишените товари за климатизация през лятото [1,2,3]. Повишаването на мощността на ФвЕЦ, на делът им в общото производство на

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

електрическа енергия и търсенето на фотоволтаични системи увеличава необходимостта от ефективна защита на съоръженията от повреди и недопустими режими. Фотоволтаичните (ФВ) системи, както и всички електрически захранващи системи, трябва да имат подходяща защита от свръхтокове, пренапрежения и недопустими режими на работа.

Фиг.1. Схема на ФвЕЦ с малка мощност (до около 30 kWp)

С утвърждаване на тенденциите за ограничаване на енергията произвеждана от изкопаеми горива и стремежът за ограничаване на тяхното въздействие върху околната среда, акцентът пада върху възобновяемата енергия, което е довело до увеличаване на размера на ФвЕЦ от 1 400 MWp през 2000 г. до около 117 GWp през 2014 г. [4]. Този бърз растеж на фотоволтаичните инсталации поставя предизвикателства пред инвеститори, проектанти, производители, регулаторни институции и оператори на разпределителните и преносната мрежа, дължащи се на специалните изисквания, свързани с ФвЕЦ.

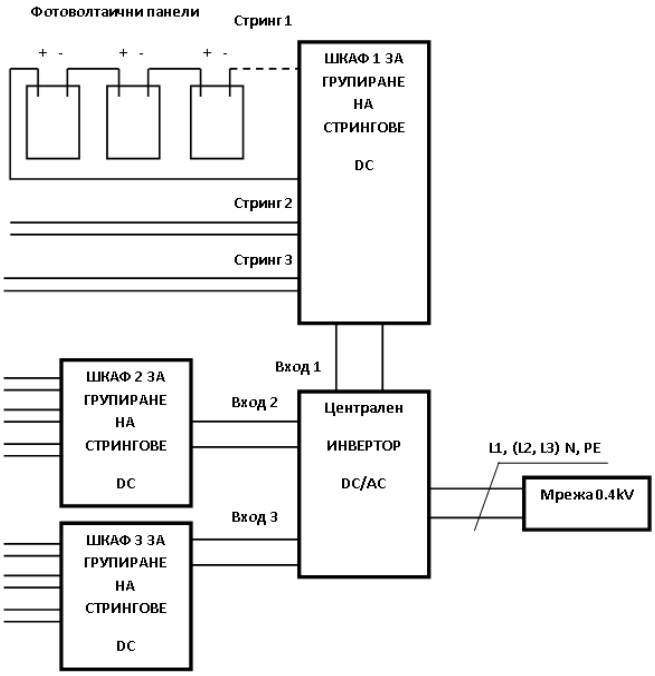
2. ОБЩ ПРЕГЛЕД НА СТРУКТУРАТА НА ФВЕЦ

Типичната структура на ФвЕЦ е следната:

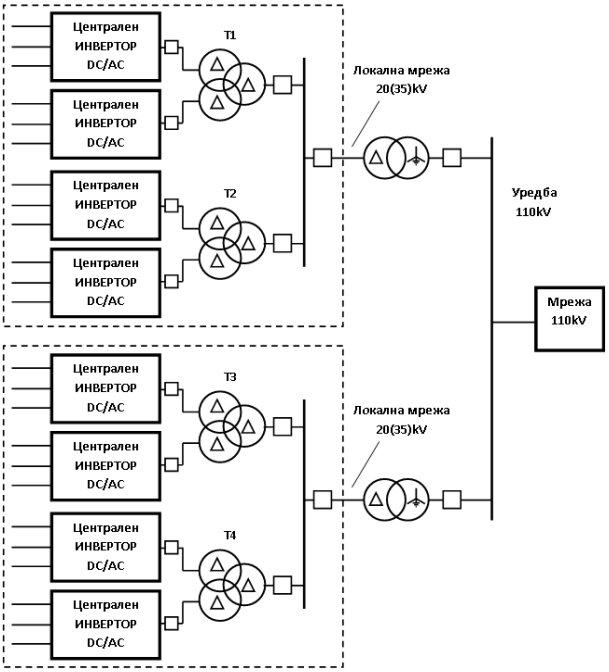
- Определен брой отделни ФВ клетки са комбинирани в един панел;
- Определен брой последователно свързани ФВ панели образуват стринг;
- Определен брой паралелно свързани стрингове образуват масив;
- Стринговете от един масив се свързват към централен инвертор;
- Няколко централни инвертора (типично 2) се свързват към отделни намотки на повишаващ трансформатор от инверторно на средно напрежение (СрН) (20-35 kV);
- Един или повече тр-ри се групират към кабелна линия (фидер) са СрН;
- Фидерите СрН се свързват към групиращи секции;
- Групиращите секции се свързват към повишаващи трансформатор СрН/ВН и произведената енергия се изнася към мрежа ВН на ЕЕС.

Най-широко използваните соларни панели са съставени от поли-кристални силициеви клетки. Специфичният за панелите ток на късо съединение (ISC) характеристиките, посочени от производителите, следва да се използват за избор на подходящи комутационни защитни апарати.

В табл.1 са представени параметри за няколко вида монокристални (monocrystalline) и поликристални (multicrystalline) ФВ панели [5]. Данните представени в табл.1 са на един от водещите производители, параметрите на панелите на други производители са съпоставими (не е предмет на настоящата статия да се прави сравнение между различните производители).



Фиг.2. Схема на ФвЕЦ с мощност до около 500 kWp – присъединявани към мрежа НН и с мощност до около 5 MWp присъединявани към мрежа СрН през повишаващ трансформатор



Фиг.3. Схема на ФвЕЦ с голяма мощност (типично над 10 MWp)

Таблица 1

	P max (STC) W	I mpp / Isc (STC)	P max (STC)	I mpp / Isc (STC)
PANDA 48 Cell	225	1.054	164.1	1.062
40mm SERIES	215	1.068	156.8	1.077
Monocrystalline	205	1.082	149.5	1.090
PANDA 60 Cell	280	1.060	204.2	1.073
SERIES 2	270	1.066	196.9	1.079
Monocrystalline	260	1.070	189.7	1.083
YGE 48 Cell	210	1.067	153.2	1.078
40mm SERIES	200	1.072	149.5	1.083
Multicrystalline	190	1.077	138.6	1.089
YGE 60 Cell	270	1.053	196.9	1.063
SERIES 2	260	1.058	189.7	1.070
Multicrystalline	250	1.063	182.4	1.075

Стойностите посочвани от производителя е целесъобразно да бъдат проверявани, за да се потвърдят изходните токове и напрежения на панелите при обхвата на очакваните условия за планираната инсталация. Тези условия са повлияни от температурата на околната среда, ъгълът на падане на слънчевата светлина и количеството слънчева енергия, достигащи панела. Типично токът на к.с. на фотоволтаичните панели не надхвърля с 10% нормалния работен ток. Това води до някои особености, свързани с проектирането и експлоатацията на системите за защита на ФвЕЦ и тяхното управление.

3. НИВАТА НА ПРИЛАГАНЕ НА ЗАЩИТИ НА ФвЕЦ

- Ниво поле – защити на стринговете, кабелните връзки за постоянно напрежение (DC);
- Инвертори (защити на електронните преобразуватели и блокове);
- Повишаващи трансформатори (от изходно променливо напрежение на инвертора на средно напрежение СрН);
- Мрежа СрН за групиране на инверторните модули;
- Повишаващи трансформатори (СрН / Високо Напрежение /ВН/ за изнасяне на електрическата енергия към ЕЕС/;
- Уредба ВН на ФвЕЦ;
- Системи за защита свързани с частта от ЕЕС, към която е присъединена ФвЕЦ.

Защита на стринговете

Нивата на т.к.с. на ФВ панелите са незначително по-големи от работните токове – с около 10%. Защитата на отделните стрингове заработва при к.с. в присъединителните кабели от „върнатия“ по кабела пълен ток на групата стрингове. Защитата на DC ниво се изпълнява както с автоматични предпазители, така и със стопяеми предпазители. Характерните стойности за тока на к.с. на няколко типа панели са представени в табл.1.

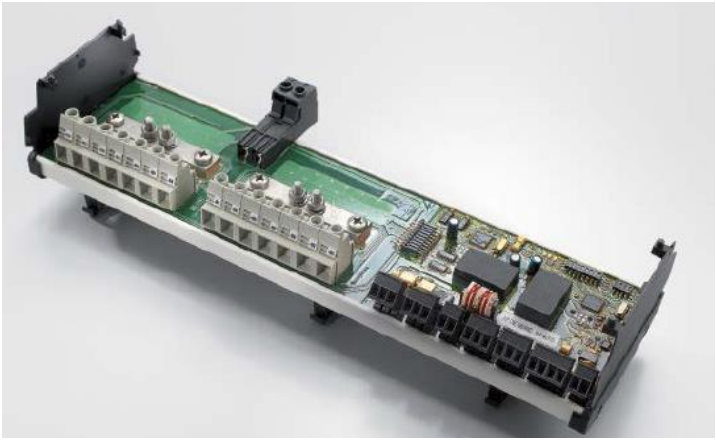
Фиг. 4. Кутия за групиране на ФВ модули с монтирана защита от пренапрежения и модул за следене на тока в стринговете.

На фиг.4 е представена примерната конструкция на кутия за групиране на стрингове с монтирана защита от пренапрежения и модул за следене на тока в стринговете. Защитата от свръхток на стринговете е изпълнена със стопяеми предпазители, защитата на събирателни шини (+) и (-) и изхода – с автоматичен прекъсвач. В представения тип кутия за групиране защитата от повишени напрежения на събирателни шини (+) и (-) е разположена правилно в долния десен ъгъл. Изводът за заземяване на този блок трябва да бъде с подходящо сечение и да е с минимална дължина в кутията, за да се избегнат индуцирани пренапрежения в други елементи, максимално отдалечен от изводите (+) и (-) на кутията.

Приложение на електрическите защити на ФвЕЦ за следене на работните параметри и технологична защита

При ФвЕЦ, когато са монтирани модули за следене на тока на отделните стрингове експлоатацията се улеснява. Инвестицията за специалните електронни блокове (пример на фиг.5) се възстановява от намаленото време за разпознаване на повреди в отделните стрингове. При ФвЕЦ без следене на токовете в отделните стрингове, повреди в отделни стрингове се откриват обикновено със закъснение. Необходими са много обходи и огледи, което е нецелесъобразно за високотехнологични обекти разположени на голяма площ.

Следенето на тока в стринговете помага за откриване на повреди и разпознаване на недопустими технологични режими: • Прекъсване на стринг; • Намален ток на стринг спрямо останалите от група стрингове; • Повреда към земя (ако се използват допълнителни модули за контрол на изолацията на постояннотоковата система). При цялостно наблюдение на стойностите на токовете по нива: • Стринг (DC); • Вход инвертор (DC) /ниво входно инверторно напрежение до DC 1 kV/; • Изход инвертор (DC) /ниво изходно инверторно напрежение до AC 1 kV/; • Група инвертори (AC) /СрН напрежение до 35 kV/; • Уредба за изнасяне на енергията към мрежа ВН /110 kV/.



Фиг.5. Модул за наблюдение на отделните стрингове

Събирането, обработването и съхраняването на информация от модулите за наблюдение на стринговете може да се използва за различни цели. Съпоставката на токовете на отделните инвертори може да спомогне за разпознаване на повреди. Може да се постигне много точно текущо определяне на състоянието на целия обект, стойностите на произвежданата енергия, контрол на загубите в инсталацията, включително разпознаване на повреди. При съпоставка на данните за произвежданата енергия в комбинация с данни за слънчевата радиация може да се установи дали има тенденция за деградация на панелите/уредбите, засенчване и др. Натрупването на данни за продължителен интервал от време ще подобри експлоатацията на ФвЕЦ и ще има икономически ефект [8,9].

Защита на инверторите

Защитата на инверторите типично се изпълнява с високомощни стопяеми на инверторите предпазители за входовете за групиращи кабели за (+) и (-) от съответните полеви шкафове (кутии) за групиране на стрингове. При комбинация с устройства за наблюдение на нивото на изолация спрямо земя се постига защита

както от свръхтокове, така и защита от повреди към земя. Защитата на изходите обикновено е с автоматични прекъсвачи с функции за МТЗ с независимо и зависимо време (времезависима х-ка) и токова отсечка. Защитите на изходите на инверторите осигуряват защита и на съответната намотка НН на повишаващия трансформатор [6,7].

Защити на повишаващите трансформатори (изходно променливо напрежение на инвертора / средно напрежение СрН)

За различните схеми за групиране на инверторите се ползват различни конфигурации на схеми. Обикновено за едновременно групиране на изходите на инверторите и повишаване на напрежението се ползват трансформатори със схема на свързване "D/d/d". Това дава възможност да се работи дори при повреда в една точка (единично земно съединение) на повишено напрежение, ако неутралата на повишаващия трансформатор 20/110 kV на страна 20 kV е също изолирана. Това води до необходимостта изолацията на система 20 kV да издържа трайно повишаване на фазните напрежения на незасегнатите от повреда фази до линейно напрежение. За да бъде ограничена възможността за разрастване на повреди и ограничаване на пренапреженията за система СрН. За ФвЕЦ е целесъобразно заземяване на звездния център на страна 20 kV през резистор [12]. Резисторът в неутралата позволява осигуряването на чувствителна земна защита на ниво 20 kV. За защита се използват многофункционални цифрови защити (МЦЗ) тип IED (Intelligent Electronic Device - Интелигентно електронно устройство), които се използват едновременно за защита, управление, блокировки и телеметрия за съответните фидери. На фиг.6 е представена МЦЗ / IED REF 615 монтирана на панела за защита на фидер за групиране на инвертори на фотоволтаична инсталация в комбинация с модул за термична защита.

Фиг.6. IED REF 615 – монтирана на КРУ 20kV за ФвЕЦ + модул за температурен мониторинг

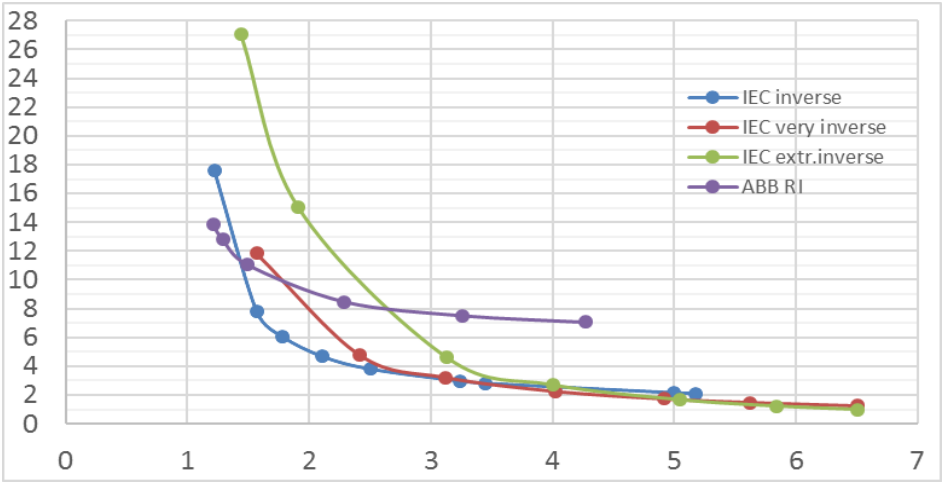
Препоръчвани типични функции: • Максималнотокова защита (Overcurrent); • Земна защита (Earth fault); • Несиметрия на фазите (Phase unbalance); • Термична (Thermal overload); • Отказ на прекъсвач (Breaker Failure) – задейства функция „Устройство за резервиране отказ на прекъсвач" УРОП; • Пускане на запис за смущение (Disturb. rec triggered); • Наблюдение на състоянието на прекъсвача (CB condition monitoring); • Повреда в изключвателната верига (Trip circuit failure); • Заработила дъгова защита (Arc detected).

В лабораторията „Релейна Защита" на ТУ-София във връзка с изпълнение на задачи по научно - изследователски проект в помощ на докторант /Договор

№ 152ПД0027-01/ „Изследване на нови типове елементи за релейна защита свързани с работата на възобновяеми източници на електрическа енергия” бяха проведени изпитания на REF 615 (МЦЗ за защита на линии) и RET 615 (МЦЗ за защита на трансформатори). Проверени бяха изследвания за проверка на времезависимите характеристики, използвани при защитите по термичен модел на повишаващи трансформатори и кабелни линии във фотоволтаични инсталации [17]:

$$t = \frac{K*a}{\left(\frac{I}{I_{ref}}\right)^{b} - 1}, \text{ s} \qquad (1)$$

където: t = време; a = константа; I = ток; I_{ref} = гранична настройка за тока; b = константа; K = настройка за множител на времето.



Фиг.7. Снети времезависими характеристики

За функциите бе установена грешка под 2% с теоретично изчислените стойности по отношение на стойности по ток и под 3% за времената на заработване. Посочените процентни отклонения не могат да бъда отнесени еднозначно като дължащи се на тестваните образци, тъй като тестовия прибор не е еталонен. Проведени бяха и опити за проверка на функциите на диференциалната защита (ДЗ) на повишаващите трансформатори. При настройката на ДЗ на повишаващи тр-ри 20/110 kV за ФвЕЦ, следва да се има предвид, че „приноса“ на ФвЕЦ е значително по-нисък спрямо класическите генератори. При определяне на наклона на характеристика за защита на тр-ра следва да се вземе предвид и разнотипността на токовите трансформатори (ТТ) на страна 20 kV и на страна 110 kV [16].

Таблица 2

Описание	**Description**	**a**	**b**
Нормално зависима	Standard Inverse	0.14	0.02
Силно зависима	Very Inverse	13.5	1
Екстремално зависима	Extremely inverse	80	2
Стандарт RI на АББ	ABB RI		
Фиксирано време	Define time	-	-

На фиг.8 е представена спирачна характеристика на RET 615. Диференциална защита със спирачна характеристика се използвана за защита на повишаващ трансформатор 20/110 kV при ФвЕЦ.

Фиг.8. Снета диференциална защита със спирачна характеристика

4. АНАЛИЗИ

Проблеми свързани с участието на ФвЕЦ в ЕЕС и баланса на енергия

При участие на ФвЕЦ в ЕЕС може да се разчита на ограничена „подкрепа“ от ФвЕЦ за овладяване на преходни режими. Технологично инверторните системи поради невъзможност да се отдаде повече от пълната им моментна работна мощност не могат да бъдат разглеждани като елементи на ЕЕС, които да осигурят функции за регулиране по отношение на честотата на мрежата. Поради приоритетното използване на слънчевата енергия първично, вторично и третично регулиране, свързано с ограничаване на възможността за отдаване на мощност към ЕЕС не е оправдано икономически. Ограниченията е възможно да бъдат наложени при аварийни ситуации в ЕЕС. Трансграничните смущения в ЕЕС на България, в резултат от авариите в ЕЕС на Република Турция през 2015 г. наложиха такива ограничения [13,14,15]. Възможно е при смущения в мрежата свързани с понижаване на напрежението инверторите да работят в режим на отдаване на реактивна (капацитивна) енергия, за да участват в регулирането на напрежението към възела на ЕЕС в който са присъединени. Условията за такава функция зависят от мощността на ФвЕЦ, типът на инверторите и импедансите с които е свързан съответният възел към ЕЕС, както и някои други фактори. В типичният случай инверторите „следват“ системата и при отклонения на стойностите на напрежението или честотата извън допустимия диапазон се отделят от ЕЕС.

Функциите, които имат по-мощните инвертори на някои производители /100-1000 kW/ позволяват разпознаване на смущения и максимално запазване на работните параметри, посредством функциите: • Ограничаване на активната мощност при повишена честота на мрежата (Active power limitation from grid over frequency); • Ограничаване на активната мощност при повишено напрежение на мрежата (Active power limitation from grid overvoltage); • Скорост на нарастване на активната мощност след повреда в мрежата (Active power ramp-up after a grid fault); • Функция за преминаване през интервали на понижено напрежение (Low voltage ride through (LVRT)).

Интегриране на системите за управление и защита на ФвЕЦ в обща система

Стандартът IEC 61850 дава възможност за интегриране на системите за управление и защита на ФвЕЦ в обща система за управление и защита, изпълняваща ролята и на SCADA система. Комуникацията на SCADA системата на ФвЕЦ с отделните инвертори и формирането на цялостна информационна система дава възможност за формиране на обща информационна база за обекта. Към настоящия момент това не е изпълнено на някои обекти. Пълната прозрачност на работата на обектите ще спомогне за ограничаване на злоупотреби и ще поощри изрядните производители.

Таблица 3

IEEE 1547		IEC 61727		VDE 0126-1-1	
Диапазон напрежение (%)	Време за изключване (s)	Диапазон напрежение (%)	Време за изключване (s)	Диапазон напрежение (%)	Време за изключване (s)
V < 50	0.16	V < 50	0.10	110 ≤ V < 85	0.2
50 ≤ V < 88	2.00	50 ≤ V < 85	2.00		
110 < V < 120	1.00	110 < V < 135	2.00		
V ≥ 120	0.16	V ≥ 135	0.05		

Допустимите стойности на отклонението на напрежението в точката на присъединяване към мрежата са представени в табл.3. Представените стойности са за измерените ефективни стойности на напрежението, като времето за отделяне (изключване) от системата е времето от разпознаване на съответната прагова стойност, до завършване на комутационната операция. След изключване на силовия прекъсвач на инвертора, системата за наблюдение на мрежата остава включена за да следи за възстановяване на нормалните режимни параметри на системата.

По отношение на честотата, в съответствие с основните стандарти, поведението на инверторите е обобщено в табл.4. При въвеждане в експлоатация е целесъобразно да се проверяват в допустим диапазон посредством полеви тестове характеристиките на системите. Данните от регистрацията на системите за защита следва да бъдат съпоставени със съответните първични сигнали, заснети с прибори за регистрация на параметрите на електрическата енергия. Поведението на защитите може да бъде моделирано и със софтуерни средства, но при наличието на конверторни преобразуватели е целесъобразно заснемане на сигналите за потвърждаване на очакваните като параметри входни сигнали и съответно правилното поведение на устройствата за защита [10,11].

Таблица 4

IEEE 1547		IEC 61727		VDE 0126-1-1	
Диапазон на честотата (%)	Време за изключване (s)	Диапазон на честотата (%)	Време за изключване (s)	Диапазон на честотата (%)	Време за изключване (s)
59.3<f< 60.5*	0.16	fn−1<f<fn+1	0.2	47.5 < f < 50.2	0.2

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системите за защита на ФвЕЦ са относително малка част в общия инвестиционния обем, но като роля с много важно значение за цялостното функциониране на съответния обект. От съществено значение при обекти изградени на база на оборудване от различни производители е да се провери пълното съответствие на съвместимостта на устройствата и системите, за да може устройствата за защита селективно, сигурно и с голямо бързодействие да подават съответните алармени сигнали и сигнали за изключване при възникване на смущения и повреди. Поради спецификата на ФвЕЦ и по-конкретно особеностите на инверторните системи е целесъобразно да бъде изградена единна SCADA система обхващаща всички нива на инсталацията. Опитът в България показва, че някои инвеститори направили „икономии“ в това отношение имат проблеми с управлението и проследимостта на производството на електрическа енергия. Инвестицията в някои по-сложни решения като надлъжна ДЗ (за защита на линия 110 kV за връзка към ЕЕС), модули за векторно измерване (PMU) за следене на фазовите ъгли в точките на присъединяване на ФвЕЦ и стриктното контролиране от страна на производителите на качеството на енергията – ограничаване на хармоничния състав, компенсиране на реактивната енергия ще доведат до ограничаване на затрудненията свързани с експлоатацията им, като ще доведат до положителен икономически ефект.

ЛИТЕРАТУРА

[1] US Department of energy, ***High-Performance with Solar Electric Reduced Peak Demand: Premier Homes***, 2013.

[2] Rancho Cordoba, CA Energy Renovations HVAC, ***A Guide for Contractors to Share with Homeowners. Energy efficiency and Renewable energy publications***. Vol. 14 US Department of energy, 2011.

[3] US Department of energy, ***Making the most of residential photovoltaic systems***, 2009.

[4] Wikipedia - https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics. ***Photovoltaics***, (01.2016)

[5] Yingli Solar site: http://www.yinglisolar.com/en/products/solar-modules/, ***PV panels data***, (01.2016).

[6] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, ***Grid converters for photovoltaic and wind power systems***, 2011, John Wiley & Sons, Ltd.

[7] Building and Construction Authority (BCA), Singapore. ***Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems***, ISBN: 978-981-08-4462-2.

[8] Wuxi Longmax Technology Co., Ltd. ***Longmax PV string management devices***.

[9] Weidmuller Pty Ltd. ***Transclinic Xi+ Installation Guide PV Array Performance Monitor with Modbus Interface. PV Clinics Installation Manual***, 21/07/11.

[10] Srete Nikolovksi, Vanja Papuga, Goran Knezevic, Kresimir Fekete, ***Relay Protection Coordination for Photovoltaic Power Plant Connected on Distribution Network***, 2014.

[11] Kimmo Kauhaniemi, Sampo Voima, ***Adaptive Relay Protection Concept for Smart Grids.*** Renewable Efficient Energy II Conference, Vaasa, Finland, 21-22 March 2012.

[12] John C. Wiles, Jr. Southwest Technology Development Institute, ***Photovoltaic System Grounding***, College of Engineering, New Mexico State University, 2012.

[13] Project Group Turkey, ***Report on Blackout in Turkey on 31st March 2015***. Final Version 1.0. TEIAS / ENTSO-E, 21 September 2015.

[14] ***Turkish power system & 31st march 2015 blackout***, SEERC Management Board Meeting 23st June 2015 Kyiv, Ukraine.

[15] Dr. Michael Weixelbraun Power System Stability, Assistant to the Management Board. Austrian Power Grid AG (APG), ***International Black Out Experience And Potential Power Grid Black Outs***, April 17th, 2015.

[16] Waldemar Rebizant, Tammam Hayder, Ludwig Schiel, ***Prediction of CT Saturation Period for Differential Relay***, Adaptation Purposes publications of Wroclaw University of Technology.

[17] http://www.abb.com/ (01.2016). ***ABB – IED Rex 615 – Наръчници за монтаж и експлоатация***.

Автори: Нели Харизанова Харизанова, маг. инж., докторант, катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *nelly.harizanova@gmail.com*. Димитър Христов Богданов, доц. д-р, катедра „Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *dbogdanov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Константин Малчев

МЕТОДИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ, КОНТРОЛ И ЗАЩИТА НА МАЛКИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРИ

Мартин Златков

Резюме: *Непостоянната скорост на вятъра предизвиква непрекъснато изменение на скоростта на въртене на пропелера на ветрогенератора. Това изисква стабилизация в тесни граници на изходящото напрежение на ветрогенератора. Този режим на работа стабилизира големината на зарядния ток на акумулаторните батерии, в които се съхранява произведената енергия. Това гарантира надеждната работа на всички устройства, свързани в нисковолтовата част на системата (инвертори, радиостанции, LED осветление и други консуматори).*
Ключови думи: *контролер, инвертори, ветрогенератори, вятърни турбини, енергия.*

METHODS FOR MANAGEMENT CONTROL AND PROTECTION OF SMALL WIND TURBINES

Martin Zlatkov

Summary: *A volatile wind speed causes a continuous variation of the speed of rotation of the propeller of the wind generator. This requires stabilization in a narrow range of output voltage of wind turbines. This mode stabilize the size of the charging current to the battery, which stores energy produced. This ensures reliable operation of all devices connected to low-voltage part of the system (inverters, radio stations, LED lighting and other consumers).*
Keywords: *controllers, inverters, wind, turbines, energy.*

ВЪВЕДЕНИЕ

При ветрогенераторите се използват различни компоненти и електронни схеми, с които се осъществява управление, контрол и защита на основните им режими на работа. Върху работата на генератора може да се въздейства:

- косвено - с реле регулатор се регулира възбудителният ток за поднамагнитване на котвената намотка и от там и мощността към товара;
- пряко - със силова електроника се управлява режима на натоварване на генератора и мощността към товара.

В настоящата разработка е обърнато внимание на възможностите за пряко въздействие върху режима на работа на ветрогенераторите.

В литературата и практиката се предлагат различни схемни решения, които се

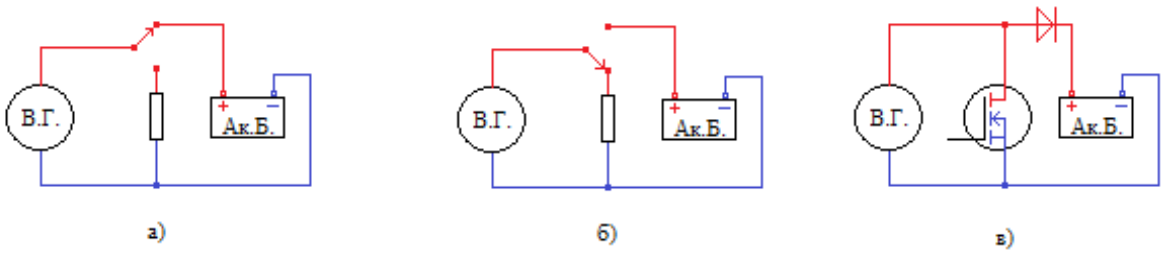
© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

характеризират със сложност и високи цени.
В тази връзка при разработката са поставени няколко основни задачи:
• Създаване на прости и надеждни схеми за управление и защита на ветрогенератора;
• Изпълнението им трябва да е реализирано с достъпни в търговската мрежа и евтини електронни компоненти;
Изпълнението на тези задачи ще направи малкият ветрогенератор сигурен, надежден и конкурентно способен на пазара и лесен за изработка.

1. ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ НА МАЛЪК ВЕТРОГЕНЕРАТОР

Генераторната машина е променливотокова. Основният магнитен поток при почти всички малки ветрогенератори се осъществява от перманентни (постоянни) магнити. Предимството е, че не се консумира допълнителна енергия за възбуждане (намагнитване), което повишава коефициента на полезно действие на устройството. Недостатъкът е, че основният режим на работа на ветрогенератора при производство на електрическа енергия не може да се регулира чрез котвената възбудителна намотка, защото липсва такава. Това налага използването на електронни регулатори (контролери), посредством които се контролира пълната мощност произвеждана от ветрогенератора.
При нормалната работа на ветрогенератора е необходимо при пълен заряд на акумулаторната батерия 14,8V, (виж фиг.1,а) зарядът да бъде преустановен, а произведена по-нататък енергия да бъде пренасочена към мощно товарно съпротивление, където да се разсее като топлина, (фиг1,б). Последното се налага за да бъде осъществена електромагнитна спирачка за защита на ветрогенератора от свръхобороти. При липса на такава защита ветрогенераторът може да се повреди сериозно или разруши при силен вятър.
Необходимо е също така електронната схема да контролира разряда на акумулатора и при определени условия (дълбочина на разряда), приблизително при 11,8V, контролерът да възстанови зареждането от ветрогенератора. Хистерезисът между тези две стойности на напрежението гарантира отсъствие на постоянна или честа комутация на схемата т.нар. „трептене”.

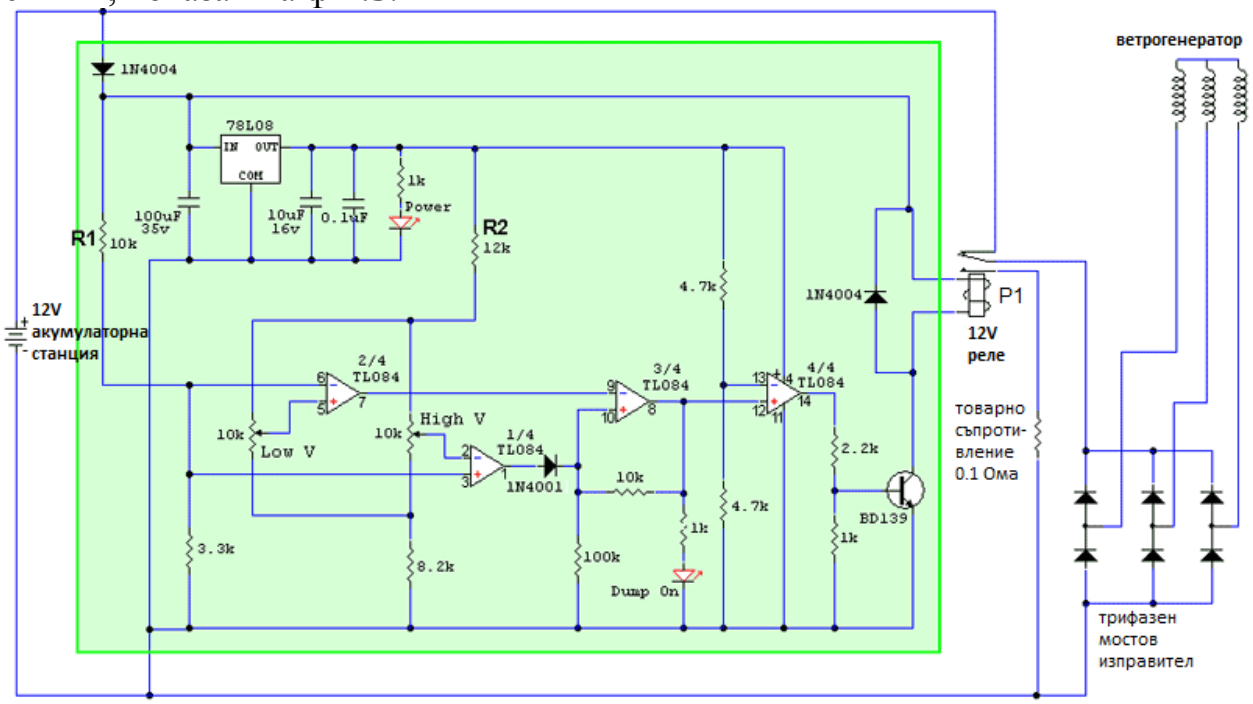


Фиг.1. Принцип на действие на контролер за ветрогенератор

2. КЛАСИЧЕСКА СХЕМА НА КОНТРОЛЕР ЗА ВЕТРОГЕНЕРАТОР

Функционална схема на контролер осъществяващ дефинираните по-горе функции е показан на фиг.2. Поради необходимостта от голяма прецизност при следенето на напрежението от ветрогенератора, за контрол на хистерезиса, между двата прага на превключване се използват операционни усилватели. Показаната

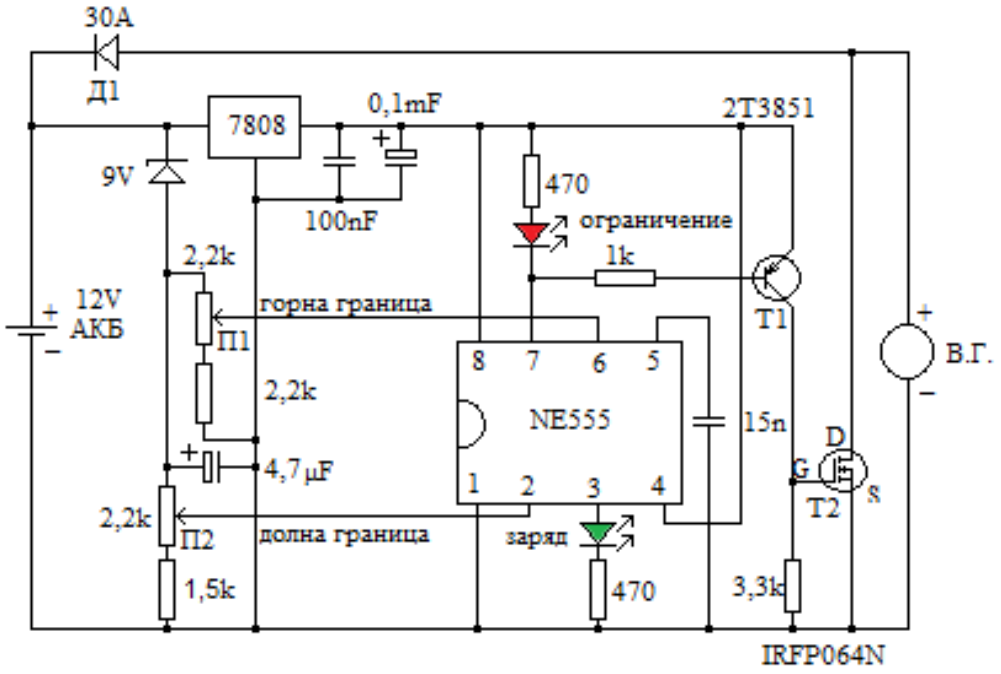
на фиг. 2 схема не е сложна, но тя допълнително може да бъде опростена, а също така механичният ключов елемент P1 да се замени с електронния ключов елемент T2, показан на фиг.3.



Фиг.2. Класическа схема на контролер за ветрогенератор

2.1. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ЗА СХЕМА НА КОНТРОЛЕР УПРАВЛЯВАЩ С ХИСТЕРЕЗИС НАТОВАРВАНЕТО НА МАЛЪК ВЕТРОГЕНЕРАТОР

На фиг.3 е показана схемата на контролер управляващ с хистерезис натоварването на малък ветрогенератор. Схемата е реализирана с интегрална схема NE555 и ключовият елемент T2. Показаната схема е проектирана, реализирана и работеща, като представлява едно иновативно техническо решение на подобен вид управление.

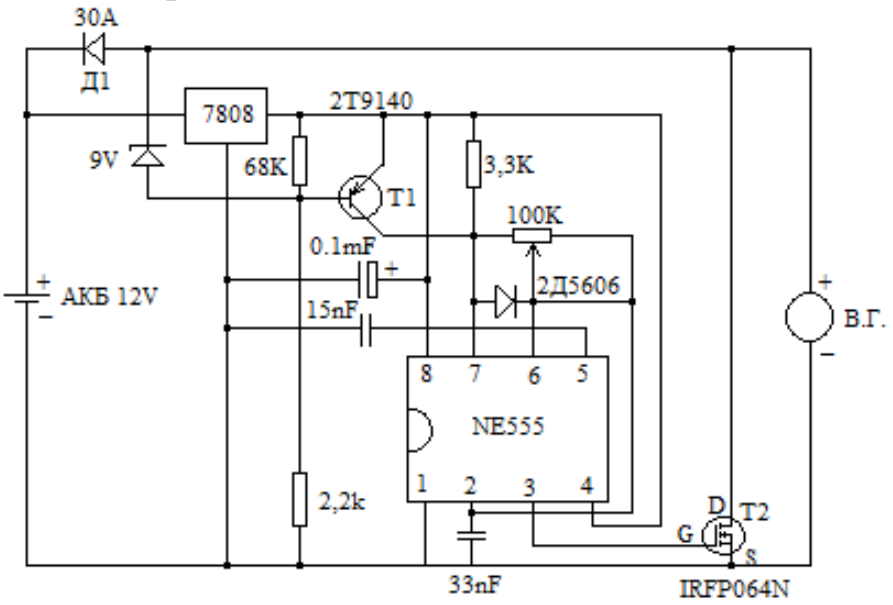


Фиг.3. Контролер за ветрогенератор с хистерезис

Тук праговите нива на хистерезиса също се определят от вградените в таймера 555 операционни усилватели, чиито входове са изведени на вградения входен делител. Стойностите му могат да бъдат променяни в известни граници от външните потенциометри П1 и П2 за настройка на праговите нива. Схемата реализира пълно електромагнитно спиране при много силен вятър. То се задейства при много силен вятър или напълно заредени акумулатори и се отменя, когато и двата определящи фактора липсват, т.е. когато вятърът отслабне и акумулатора е подготвен за заряд.

2.2. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ЗА СХЕМА НА ИМПУЛСЕН КОНТРОЛЕР ЗА ВЕТРОГЕНЕРАТОР

Схемата е показана на фиг.4.



Фиг.4. Импулсен контролер за ветрогенератор

Принципът на действие е следният. Произведеният от ветрогенератора ток протича през Д1 и зарежда АКБ. При пълен заряд, напрежението върху полюсите и е достигнало 14,7V. От този праг нагоре таймерът 555 започва да генерира импулси с малък коефициент на запълване. Тези импулси ще бъдат усилени от мощния MOSFET Т2, който свързва „накъсо” в импулсен режим електрическата верига на ветрогенератора. Д1 не позволява „окъсяване” на клемите на АКБ. Коефициентът на запълване на импулсите ще расте докато достигне максималната си стойност, която е при 15V. Принципно схемата работи като мощен ценеров диод, който не разрешава по-нататъшното повишаване на напрежението, или силов реле-регулатор, който разсейва като топлина в MOSFET транзистора всичката излишна енергия с цел да не се презарежда АКБ. Оказва се, че мощен MOSFET транзистор с малък охладител дори е по-евтин от мощно товарно съпротивление.

Трябва да се отбележи, че регулирането и в двете направления (натоварване на генератора и ограничаване на зарядния ток) се извършва само от един ключов елемент – транзистора Т2. Чрез него е възможно да се контролира натоварването на генератора, което представлява електромагнитна спирачка. Осъществява го

същия електронен блок без никаква промяна в схемата или свързването на силовите вериги. Дори и при липса на акумулатор в товарната верига напрежението на изхода на контралера ще остане стабилно, контролирано в тесни граници. По този начин при наличие на вятър ще може да бъде черпена „година" за употреба енергия. Няма да има опасност от аварии поради безконтролно развъртане на пропелера и генериране на високо напрежение, което може да повреди прикачената към системата апаратура.

2.3. ПРЕДИМСТВА НА ПРЕДЛОЖЕНИТЕ СХЕМНИ РЕШЕНИЯ

- липса на механичен ключов елемент – реле;
- плавно управление на режима на работа;
- по-висок коефициент на полезно действие;
- липса на голям брой мощни съпротивления, свързани в паралел, които освен това са скъпи, тежки и обемисти;
- ниска себестойност;
- малко тегло, компактност;
- плавно действие без удари.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ветрогенераторите могат да бъдат монтирани, както в извънградски, така и в градски райони, подкрепяйки концепцията за интензивно използване на възобновяеми енергийни източници. Има се в предвид монтиране на ветрогенераторни и соларни системи върху равни покривни конструкции и калкани на промишлени и жилищни сгради и други подходящи площадки.

Може да се твърди, че при възобновяемите енергийни източници, малките ветрогенератори са огледалната липсваща половина на соларните паркове. Това е и повод да бъде създаден нов печеливш отрасъл в родната индустрия.

Предложените иновативни решения ще подобрят качествата на малките ветрогенератори и по този начин ще ги направят перспективни и конкурентно способни на пазара.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Интернет
[2] Възобновяеми източници на енергия. Издателство на технически университет София, 1999 г.
[3] WIND ENERGY EXPLAINED - theory, design dnd application - second edition.
[4] Textbook_WIND ENERGY PROJECT ANALYSIS.

Автор: Мартин Димитров Златков, маг. инж., асистент, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков" – София, E-mail address: *dj_marti79@mail.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент:** гл. ас. д-р Тодор Йонов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИНХРОНЕН ГЕНЕРАТОР ЗА ВЕПС С РАЗЛИЧНИ DC-DC ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ

Захари Зарков, Людмил Стоянов, Иван Бачев, Владимир Лазаров

Резюме: *Целта на работата е да се разработят устойчиви модели на DC-DC преобразуватели за ветрогенератори в средата Matlab/Simulink. Симулирани са ветроенергийни преобразувателни системи (ВЕПС), включващи моделите на повишаващ и неинвертиращ понижаващо-повишаващ преобразувател. Изследвани са и паралелни преобразуватели с общо входно и изходно напрежение. Сравнена е работата на ВЕПС с всеки от разработените модели при едни и същи условия.*
Ключови думи: *ветроенергийни преобразувателни системи, ВЕПС, DC-DC преобразуватели*

STUDY OF SYNCHRONOUS GENERATOR FOR WECS WITH DIFFERENT TYPES OF DC-DC CONVERTERS

Zahari Zarkov, Ludmil Stoyanov, Ivan Bachev, Vladimir Lazarov

Abstract: *The purpose of the work is to develop stable models of DC-DC converters for wind generators in the Matlab/Simulink environment. Wind energy conversion system (WECS), using the models of boost and non-inverting buck-boost converters has been simulated. Interleaved converters with common input and output voltages have also been studied. The WECS' performances have been compared when using different converter under the same conditions.*
Keywords: *wind energy conversion systems, WECS, DC-DC converters, interleaved converters*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Ветроенергийните преобразувателни системи (ВЕПС) могат да бъдат разделени основно на два вида - ВЕПС с постоянна скорост на въртене на турбината и ВЕПС с променлива скорост. Настоящото изследване се концентрира върху ВЕПС с променлива скорост на въртене, тъй като такива системи могат да извлекат максималната мощност, която може да бъде произведена от вятърната турбина при различни скорости на вятъра [1], [2], [3], [4]. Съвременните ВЕПС с променлива скорост използват най-вече двойно-захранени асинхронни генератори (ДЗАГ) или синхронни генератори (СГ), като в последно време се увеличава приложението на синхронните генератори с постоянни магнити (СГПМ). Системите, разчитащи на СГПМ, са обект на повишен интерес поради многото

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

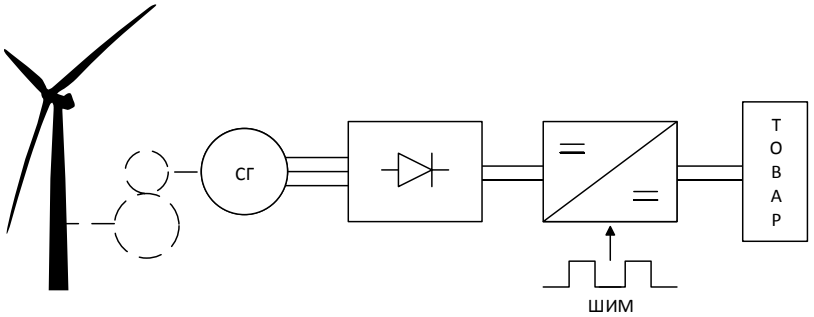
ISSN 1311-0829

свои предимства - опростено управление на системата, ниска цена за поддръжка поради липсата на четков апарат, премахване на нуждата от възбудителна система, което намалява масата и обема на системата и др. [5].

Целта на това изследване е да се разработят математически и компютърни модели на най-често срещаните във ВЕПС DC-DC преобразуватели в средата Matlab/Simulink.

2. ОПИСАНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНАТА СИСТЕМА

Поради стохастичния характер на вятъра във ВЕПС с променлива скорост, произведената електрическа енергия не винаги отговаря на изискванията на мрежата, в която се отдава, или на товара, който захранва. За да може да се изпълнят тези изисквания, променливото напрежение и честота се преобразуват с помощта на силови електронни преобразуватели. Използването на тези преобразуватели дава възможност за регулиране на системата и за увеличаване на нейната устойчивост. Настоящото изследване се концентрира върху системата турбина-генератор-преобразувател от страна на генератора, както е показано на фиг.1.



Фиг.1. *Блокова схема на изследваната ВЕПС*

В литературата са описани различни решения за преобразувателя от страната на генератора. Най-често срещаните възможности са използването на неуправляем диоден изправител, комбинацията от неуправляем диоден изправител и DC-DC преобразувател или използването на управляем изправител с ШИМ [6]. Използването само на неуправляем диоден изправител драстично намалява възможностите за регулиране на напрежението в системата. Именно заради това е избрана комбинацията от неуправляем диоден изправител и DC-DC преобразувател, която съчетава сравнително ниска цена с добра възможност за управление.

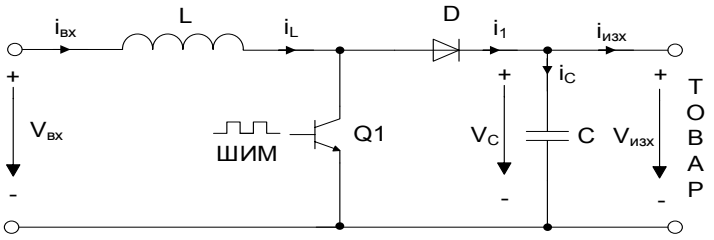
Тъй като основният акцент в тази работа е поставен върху DC-DC преобразувателите и не цели задълбочено изследване на моделите на СГПМ и вятърната турбина, за целта на изследването са използвани вече разработени модели за генератор и вятърна турбина. Моделът на вятърната турбина е представен в [7]. Моделите на изследваните DC-DC преобразуватели са представени по-долу.

3. МОДЕЛИРАНЕ НА DC-DC ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ

За целите на настоящото изследване, въз основа на представените в [8] уравнения, са разработени математически модели на най-разпространените на DC-DC преобразуватели, които могат да бъдат използвани във ВЕПС, като е изследвано поведението им в системата от фиг.1.

3.1. ПОВИШАВАЩ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ (BOOST CONVERTER)

Повишаващият преобразувател, както показва името му, се използва за повишаване на входното напрежение. На фиг.2 е показана схемата на повишаващ преобразувател.



Фиг.2. *Схема на повишаващ преобразувател.*

Действието на повишаващия преобразувател се описва със следните уравнения:
при отпушено състояние на транзистора Q_1

$$\begin{cases} \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{1}{L} V_{вх} \\ \dfrac{dV_{изх}}{dt} = \dfrac{1}{C}(-i_{изх}) \end{cases} \tag{1}$$

при запушено състояние на транзистора Q_1

$$\begin{cases} \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{1}{L}(V_{вх} - V_{изх}) \\ \dfrac{dV_{изх}}{dt} = \dfrac{1}{C}(i_L - i_{изх}) \end{cases} \tag{2}$$

Изходният ток се изчислява по следния начин:

$$i_{изх} = \frac{V_{изх}}{R_{тов}} \tag{3}$$

където $R_{тов}$ е еквивалентното входно съпротивление на товара. Токът, преминаващ през кондензатора C, се изразява така:

$$i_C = i_1 - i_{изх} \tag{4}$$

където

$$i_1 = 0\text{, при } Q_1 - \text{вкл.} \tag{5}$$

$$i_1 = i_L\text{, при } Q_1 - \text{изкл.} \tag{6}$$

Освен това от схемата е ясно, че:

$$i_{вх} = i_L \tag{7}$$

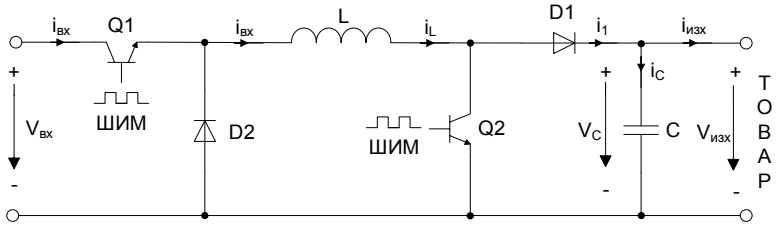
Зависимостта между входното и изходното напрежение на повишаващия преобразувател е следната:

$$V_{изх} = V_{вх}\left(\frac{1}{1-D}\right) \tag{8}$$

където D е коефициентът на запълване на импулсите на ШИМ.

3.2. НЕИНВЕРТИРАЩ ПОНИЖАВАЩО-ПОВИШАВАЩ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ (NON-INVERTING BUCK-BOOST CONVERTER)

Схемата на изследвания неинвертиращ понижаващо-повишаващ преобразувател е показана на фиг.3.



Фиг.3. *Схема на неинвертиращ понижаващо-повишаващ преобразувател.*

Уравненията, описващи действието на неинвертиращия понижаващо-повишаващ преобразувател, са:

при отпушено състояние на транзисторите Q_1 и Q_2:

$$\left| \begin{array}{l} \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{1}{L} V_{вх} \\ \dfrac{dV_{изх}}{dt} = \dfrac{1}{C}(-i_{изх}) \end{array} \right. \tag{9}$$

при отпушено състояние на транзистора Q_1 и запушено състояние на Q_2:

$$\left| \begin{array}{l} \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{1}{L}(V_{вх} - V_{изх}) \\ \dfrac{dV_{изх}}{dt} = \dfrac{1}{C}(i_L - i_{изх}) \end{array} \right. \tag{10}$$

при запушено състояние на транзисторите Q_1 и Q_2:

$$\left| \begin{array}{l} \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{1}{L}(-V_{изх}) \\ \dfrac{dV_{изх}}{dt} = \dfrac{1}{C}(i_L - i_{изх}) \end{array} \right. \tag{11}$$

Токът през кондензатора C на изхода на преобразувателя се изразява така:

$$i_C = i_1 - i_{изх} \tag{12}$$

където

$$i_1 = 0\text{, при } Q_1 - \text{вкл.}, Q_2 - \text{вкл.} \tag{13}$$

$$i_1 = i_L\text{, при } Q_1 - \text{вкл.}, Q_2 - \text{изкл.} \tag{14}$$

$$i_1 = i_L\text{, при } Q_1 - \text{изкл.}, Q_2 - \text{изкл.} \tag{15}$$

Освен това

$$i_{вх} = i_L\text{ , при } Q_1 - \text{вкл.} \tag{16}$$

$$i_{вх} = 0\text{ , при } Q_1 - \text{изкл.} \tag{17}$$

Зависимостта между входното и изходното напрежение на неинвертиращия понижаващо-повишаващ преобразувател се определя от израза:

$$V_{изх} = V_{вх}\left(\frac{D_1}{1-D_2}\right) \quad (18)$$

където D_1 е коефициентът на запълване на импулсите на ШИМ на транзистора Q_1, а D_2 - коефициентът на запълване на импулсите на ШИМ на транзистора Q_2.

Както е отбелязано в [9], коефициентът на запълване на управляващия сигнал на транзистора Q_2 винаги трябва да е по-малък от този на Q_1, за да се избегне окъсяването на бобината L през диода D_1. Също така транзисторът Q_2 трябва да получава управляващ сигнал за включване, само когато транзисторът Q_1 е включен.

3.3. ПАРАЛЕЛНИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ С ОБЩО ВХОДНО И ИЗХОДНО НАПРЕЖЕНИЕ (INTERLEAVED CONVERTERS)

Наред с разгледаните преобразуватели се използват и така наречените „паралелни преобразуватели“ с общо входно и изходно напрежение [10]. Те се състоят от два или повече еднакви преобразуватели, свързани паралелно. Използването на паралелни преобразуватели позволява прехвърлянето на по-голяма мощност и води до редуциране на пулсациите на токовете и напреженията в схемата и намаляването на размерите и броя на използваните пасивни елементи [11]. Това се постига и посредством управление на паралелните преобразуватели с дефазирани (interleaved) импулси. В това изследване е използвано именно такова управление на два паралелни преобразувателя, като импулсите са разместени на 1/2 от периода.

На фиг.4 е показана схема на разработения модел на паралелни повишаващи преобразуватели с общо входно и изходно напрежение, а на фиг.5 е схемата на паралелни неинвертиращи понижаващо-повишаващи преобразуватели. Уравненията, описващи принципа на работа на паралелно свързаните преобразуватели с общо входно и изходно напрежение, са същите като уравненията на повишаващия и неинвертиращия понижаващо-повишаващ преобразувател, като изразът за тока през кондензатора i_C е:

$$i_C = i_{1_2} - i_{изх} \quad (19)$$

Токът i_{1_2} е сумата от токовете на двата паралелно свързани преобразувателя и се изразява както следва:

а) за паралелно свързаните повишаващи преобразуватели:

$$i_{1_2} = i_1 + i_2, \quad \text{при } Q_1 - \text{изкл.}, Q_2 - \text{изкл.} \quad (20)$$

$$i_{1_2} = i_1, \quad \text{при } Q_1 - \text{изкл.}, Q_2 - \text{вкл.} \quad (21)$$

$$i_{1_2} = i_2, \quad \text{при } Q_1 - \text{вкл.}, Q_2 - \text{изкл.} \quad (22)$$

$$i_{1_2} = 0, \quad \text{при } Q_1 - \text{вкл.}, Q_2 - \text{вкл.} \quad (23)$$

б) за паралелно свързаните неинвертиращи понижаващо-повишаващи преобразуватели

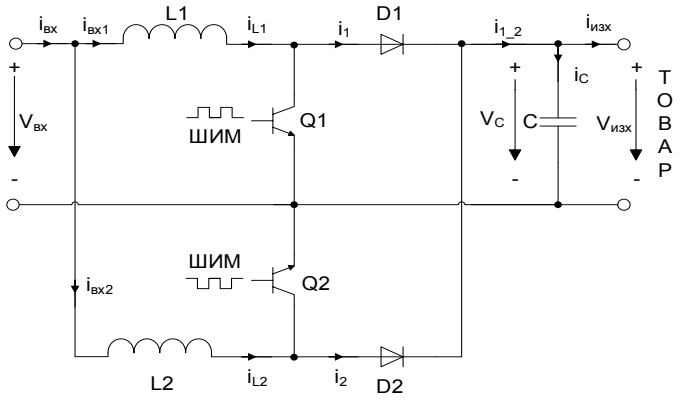
$$i_{1_2} = i_1, \quad \text{при } Q_1, Q_2 - \text{изкл.}, Q_3, Q4 - \text{вкл.} \quad (24)$$

$$i_{1_2} = i_1 + i_2, \quad \text{при } Q_1, Q_2, Q_4 - \text{изкл.}, Q_3 - \text{вкл.} \tag{25}$$

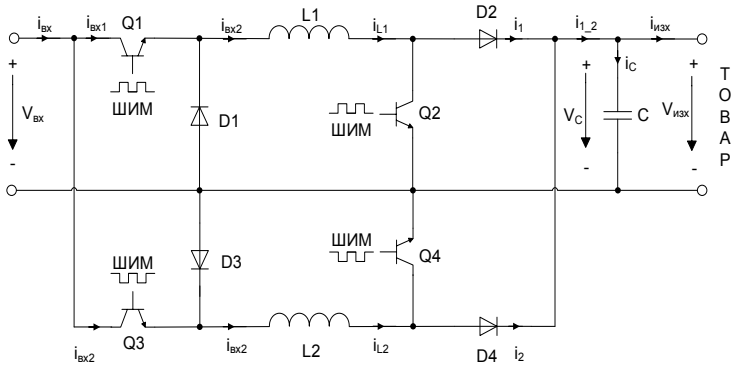
$$i_{1_2} = i_1 + i_2, \quad \text{при } Q_1 - \text{вкл.}, Q_2, Q_3, Q_4 - \text{изкл.} \tag{26}$$

$$i_{1_2} = i_2, \quad \text{при } Q_1, Q_2 - \text{вкл.}, Q_3, Q_4 - \text{изкл.} \tag{27}$$

Както беше отбелязано по-горе при неинвертиращия понижаващо-повишаващ преобразувател, транзисторите Q_2 и Q_4 трябва да се включват само при включени респективно Q_1 и Q_3.



Фиг.4. *Схема на паралелно свързани повишаващи преобразуватели с общо входно и изходно напрежение.*



Фиг.5. *Схема на паралелно свързани неинвертиращи понижаващо-повишаващи преобразуватели с общо входно и изходно напрежение.*

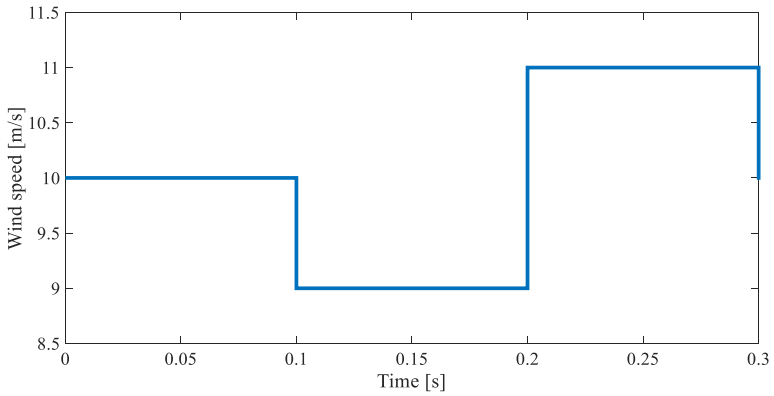
4. РЕЗУЛТАТИ ОТ СИМУЛАЦИИТЕ

С настоящото изследване се цели валидирането на математическите модели, представени до момента, и да се анализира поведението на системата от фиг.1. Системата е подложена на резки промени на скоростта на вятъра, каквито не могат да бъдат срещнати в реални условия, с цел да се провери устойчивостта на разработените модели.

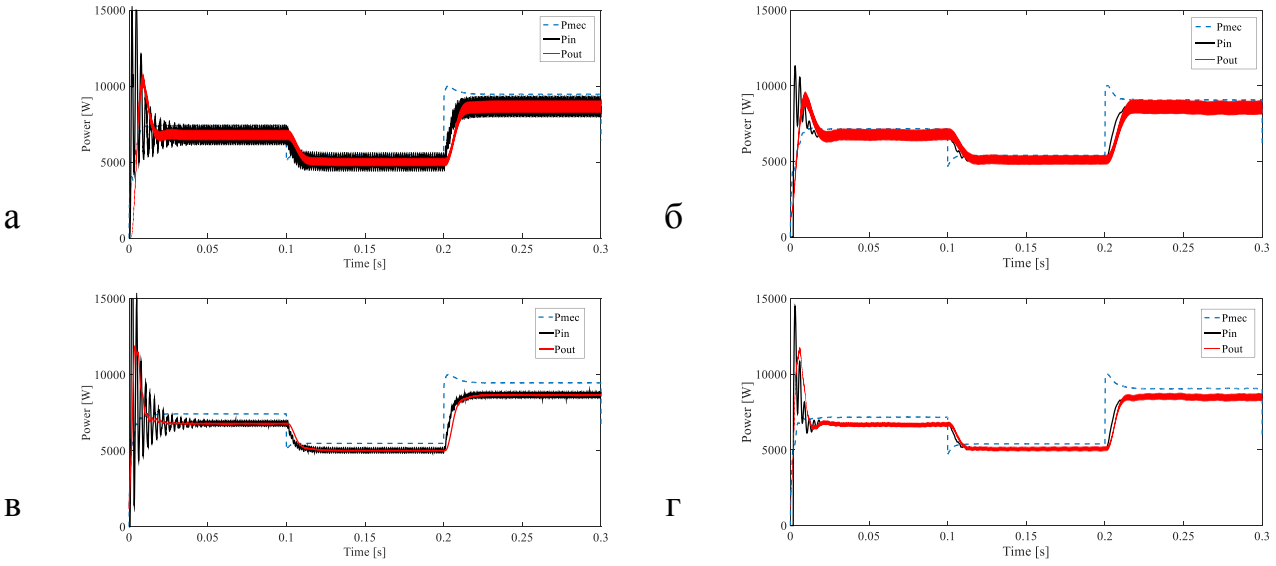
Проследена е работата на турбината и СГПМ при системите с различни DC-DC преобразуватели, както и е направено сравнение между поведението на различните топологии преобразуватели при коефициенти на запълване на импулсите на ШИМ, пресметнати така, че токът и напрежението на изхода на всеки преобразувател да са съизмерими.

Изследвано е влиянието на различните видове DC-DC преобразуватели върху тока, консумиран от източника (СГПМ и неуправляемия диоден изправител), както и влиянието на различните топологии върху тока през изходния кондензатор на преобразувателите.

На фиг.7 са представени мощностите на входа и на изхода на изследваните преобразуватели и механичната мощност на вятърната турбина, където ясно се вижда, че системата успява да следва рязко променящата се скорост на вятъра (фиг.6) без големи отклонения и с добра динамика.



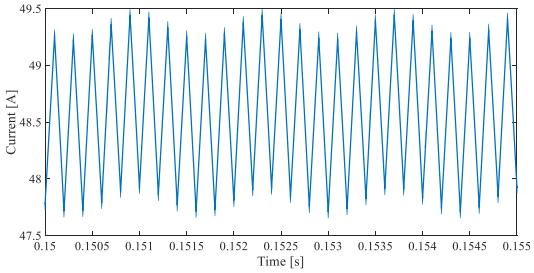
Фиг.6. *Профил на скоростта на вятъра.*



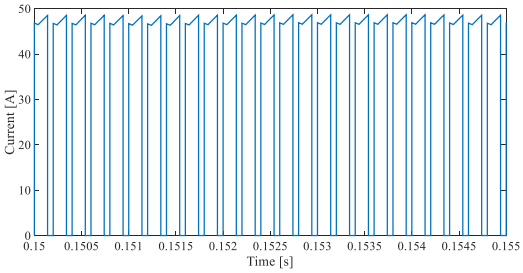
Фиг.7. *Механична мощност на вятърната турбина (прекъсната линия), входна (черно) и изходна (сиво) мощност на изследваните DC-DC преобразуватели:* ***а*** *– повишаващ;* ***б*** *– неинвертиращ понижаващо-повишаващ;* ***в*** *– паралелни повишаващи;* ***г*** *– паралелни неинвертиращи понижаващо-повишаващи.*

На фиг.8 са представени формите на входния ток на изследваните DC-DC преобразуватели, а на фиг.9 е показан токът, преминаващ през кондензаторите на изхода на всеки преобразувател.

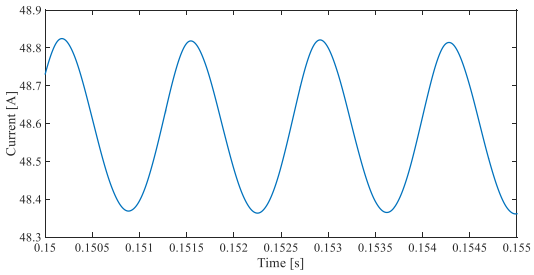
а



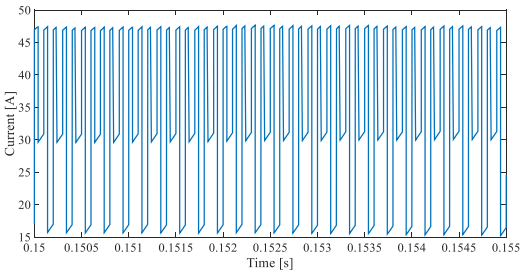
б



в

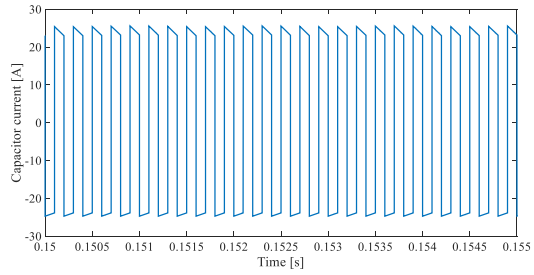


г

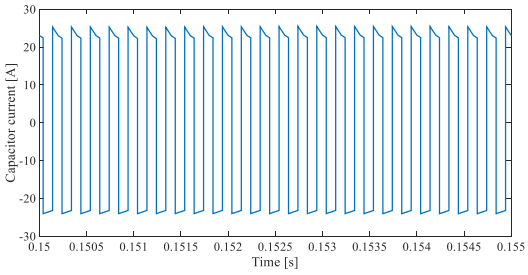


Фиг.8. *Пулсации на входния ток на изследваните DC-DC преобразуватели:* ***а*** *– повишаващ;* ***б*** *– неинвертиращ понижаващо-повишаващ;* ***в*** *– паралелни повишаващи;* ***г*** *– паралелни неинвертиращи понижаващо-повишаващи.*

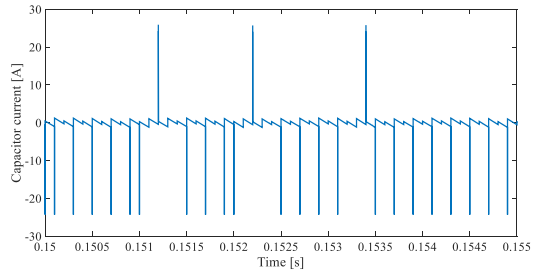
а



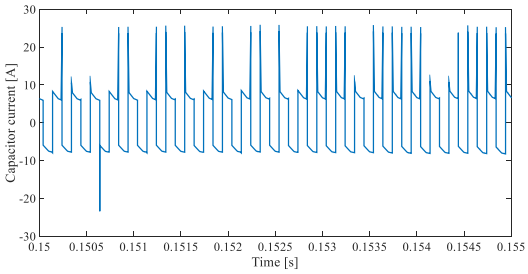
б



в



г



Фиг.9. *Ток през кондензаторите на изхода на изследваните DC-DC преобразуватели:* ***а*** *– повишаващ;* ***б*** *– неинвертиращ понижаващо-повишаващ;* ***в*** *– паралелни повишаващи;* ***г*** *– паралелни неинвертиращи понижаващо-повишаващи.*

5. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Получените резултати показват, че разработените модели са устойчиви и отговарят на очакванията, тъй като изходната мощност на преобразувателите ясно следва механичната мощност на входа на системата.

Виждат се предимствата от използването на преобразуватели с общо входно и изходно напрежение (interleaved converters), а именно – намаляването на пулсациите на входния ток при повишаващия преобразувател и елиминирането на прекъснатостта на входния ток при неинвертиращия понижаващо-повишаващ преобразувател. Може да се отбележи, че при използването на преобразуватели с общо входно и изходно напрежение пулсациите на тока през изходния кондензатор намаляват драстично, което позволява използване на кондензатори, предназначени за по-малко токово натоварване.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представено сравнително изследване на поведението на ВЕПС с различни DC-DC преобразуватели. Създадени са математически модели в средата Matlab/Simulink на най-разпространените видове DC-DC преобразуватели, които се използват за преобразуване на енергията във вятърни генератори. Също така са изследвани и преобразувателите с общо входно и изходно напрежение и са показани техните предимства пред класическите топологии на повишаващи и неинвертиращи понижаващо-повишаващи преобразуватели. От резултатите на симулациите на системата може да се приеме, че целта на настоящото изследване – да се изготви библиотека от устойчиви математически модели на DC-DC преобразуватели е изпълнена.

ЛИТЕРАТУРА

[1] S. Mukhitar, C. Ambrish. ***Application of adaptive network-based fuzzy inference system for sensorless control of PMSG-based wind turbine with nonlinear-load compensation capabilities***, IEEE Trans. Power Electron; 2011; 26(1):165-175

[2] N.A. Orlando, M. Liserre, R.A. Mastromauro, A. Dell'Aquilla, ***A survey of control issues in PMSG-based small wind-turbine systems***, IEEE Trans. Ind. Inf. 2013; 9(3):1211-1221

[3] Q. Wang, L.C. Chang, ***An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems***, IEEE Trans. Power Electron. 2004; 19(5):1242-1249

[4] J.S. Thongam, P. Bouchard, R. Beguenane, A.F. Okou, A. Merabet, ***Control of Variable Speed Wind Energy Conversion System using a Wind Speed Sensorless Optimum Speed MPPT Control Method***, IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 Nov. 2011, pp. 855-860

[5] H. Li, Z. Chen. ***Overview of different wind generator systems and their comparisons***, IET Renewable Power Generation, 2008, Vol. 2, No. 2, pp. 123-138

[6] S.M. Tripathi, A.N. Tiwari, D. Singh, ***Grid-integrated permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion systems: A technology review***, Renewable and Sustainable Energy Reviews 51 (2015), pp. 1288-1305

[7] V. Lazarov, D. Roye, D. Spirov. ***Study of Variable Speed Wind Turbine with Boost and Non-inverting Buck-Boost choppers and Maximum Power control strategy***, Japmed'6 Conference, Bucharest, Romania, July 2009

[8] M. Assaf, D. Seshsachalam, D. Chandra, R.K. Tripathi, ***DC-DC converters via Matlab/Simulink***, ACMOS'05 Proc. of the 7th WSEAS international conference on Automatic control, modeling and simulation, 2005, pp. 464-471

[9] R. Dowlatabi, M. Monfared, S. Golestan, A. Hassanzadeh, ***Modelling and Controller Design for a Non-inverting Buck-Boost Chopper***, International Conference of Electrical Engineering and Informatics, July 2011, Bandung, India

[10] H. Antchev, P. Goranov, ***Research on dynamic characteristics of identical converters with common input and output dc voltages***, E+E, 9-10, 2012, pp. 10-17

[11] J. Betten, R. Kollman, ***Interleaving dc-dc converters boost efficiency and voltage***, Texas Instruments, EDN, October, 2005, pp. 78-84

Автори: Захари Зарков, доцент, д-р, Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; Людмил Стоянов, доц. д-р, Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *ludiss@tu-sofia.bg*; Иван Бачев, докторант, Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *iv.bachev@tu-sofia.bg*; Владимир Лазаров, проф. д-р, Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *vl_lazarov@tu-sofia.bg*;

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Радослав Спасов

АЛГОРИТЪМ ЗА ИЗБОР НА ПАСИВНИ ФИЛТРИ ЗА ВИСШИ ХАРМОНИЦИ

Николай Матанов, Харалан Пенев

Резюме: *Един от начините за намаляване разпространението и влиянието на хармониците на тока и напрежението в електроснабдителните системи на промишлените обекти е използването на силови резонансни филтри (СРФ). Проектирането на СРФ е строго индивидуална и комплексна задача за всяка електроснабдителна система (ЕС). В този доклад е разработен алгоритъм, който може да се следва при избора на СРФ, като се отчита спецификата на всяка една конкретна ЕС, чрез използването на неин адекватен софтуерен модел. Представен е пример и резултати от прилагането на алгоритъма за конкретна ЕС. Описани са методични особености при прилагането на алгоритъма за всяка друга ЕС.*
Ключови думи: *хармоници, пасивни филтри, модел на електроснабдителна система*

ALGORITHM FOR SELECTION OF PASSIVE HARMONICS FILTERS

Nikolay Matanov, Haralan Penev

Abstract*: One way to reduce the spread and impact of harmonics of current and voltage in power supply systems of industrial plants is the use of power resonant filters (or only filters). The design of the filters is strictly individual and complex task for any power supply system (PSS). In this paper was developed an algorithm that can be followed in the selection of the filters, taking into account the specifics of each specific PSS, using its adequate software model. An example of the implementation and results of the algorithm for a specific PSS is showed. Described are methodical peculiarities in the implementation of the algorithm for each other PSS.*
Keywords*: harmonics, passive filters, industrial distribution system model*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Постоянното увеличаване броя на нелинейни товари в електроснабдителните системи са причина за разпространението на хармоници на тока и съответно наличието им в напрежението. Вредата от несинусоидалността на тока и напрежението са известни [1,2,3]. Начините за намаляване влиянието на хармониците в ЕС принципно могат да се разделят на две групи [2]:

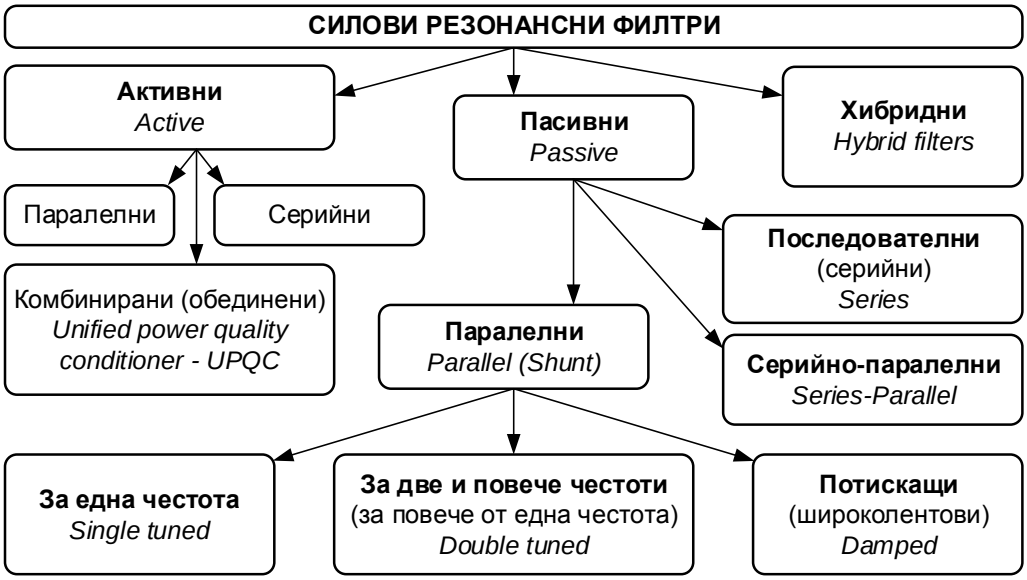
- Избор на подходящи схемни решения и елементи на ЕС;

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

- Допълнителни устройства за ограничаване разпространението на хармониците на ток и напрежение.

Като допълнителни устройства най-често се използват различни видове силови резонансни филтри (СРФ) или филтрокомпенсиращи устройства (ФКУ). На фиг.1 е представена обобщена принципна класификация на СРФ [2].



Фиг.1. Класификация на силовите филтри

На базата на анализа на характеристиките на филтрите и особеностите при експлоатацията им е направено обобщение на техните предимствата и недостатъци [2,4,5].

Предимствата на пасивните филтри могат да се обобщят в следното: възможност за получаване на големи мощности - MVAr; малки експлоатационни разходи; пасивните филтри имат позитивен ефект като цяло върху системата, защото през тях се затварят й хармониците на захранващия източник, не само на конкретния нелинеен товар; многоцелево използване.

Недостатъците (ограниченията) на пасивните филтри са: ефективността на филтъра зависи много от точността на познаване на импеданса на захранващата система в точката на свързването им; резонансната честота се променя с промяна на параметрите на кондензаторите и реакторите (стареене, температура и др.) и честотата на мрежата; през филтрите се затварят и хармониците на тока от захранващата система, които не могат да се предвидят; изискват специална комутационна апаратура; не могат да се прилагат за междинните и неканонични хармоници.

Предимствата на активните филтри: няма опасност от резонанс със системата, както при пасивните; не зависят от съпротивлението на захранващата системата; могат да компенсират не само един хармоник; могат да решават допълнителни проблеми, като не симетрия, нисък фактор на мощността и колебание на напрежението; могат да се използват при променливи режими на работа на нелинейния товар; могат да компенсират и неканоничните хармоници.

Недостатъците (ограниченията): скъпи и сложни; основно са за ниско напрежение; нямат такъв голям диапазон на мощностите както при пасивните.

Като обобщение може да се каже, че каквито и филтри да се използват в ЕС трябва да се има предвид, че по принцип са скъпи устройства и трябва да се подхожда много внимателно при техния избор.
Трябва да се отбележи, че проектирането на СРФ и ФКУ се различава поради разликата във функциите им. Методики за избор на елементите на СРФ и ФКУ са дадени в [4,5,6,7,8,9]. Проучването на дадените методи показа, че:

- често начините на изчисляване на параметрите на КБ и реакторите имат чисто теоретичен характер, без да се отчитат особености като съществуващи гами от мощности, съпротивления, номинални токове и напрежения за КБ и реакторите;
- проектирането на СРФ и ФКУ е сложна практическа задача, макар и теоретично добре изучена, изискваща множество итерации;
- наличните софтуерни решения обикновено са за маломощните филтри използвани в електрониката;
- не се отчита възможността през филтъра да се затворят хармоници със съответната честота от захранващата система, което може да доведе до претоварване на кондензаторните батерии (КБ);
- няма единен алгоритъм за проектиране и избор на елементите на пасивните филтри;
- в етапа на проектиране се изисква много задълбочен анализ на използването им в конкретната мрежа, поради опасността от възникване на нежелани резонансни явления.

2. АЛГОРИТЪМ ЗА ИЗБОР НА СРФ

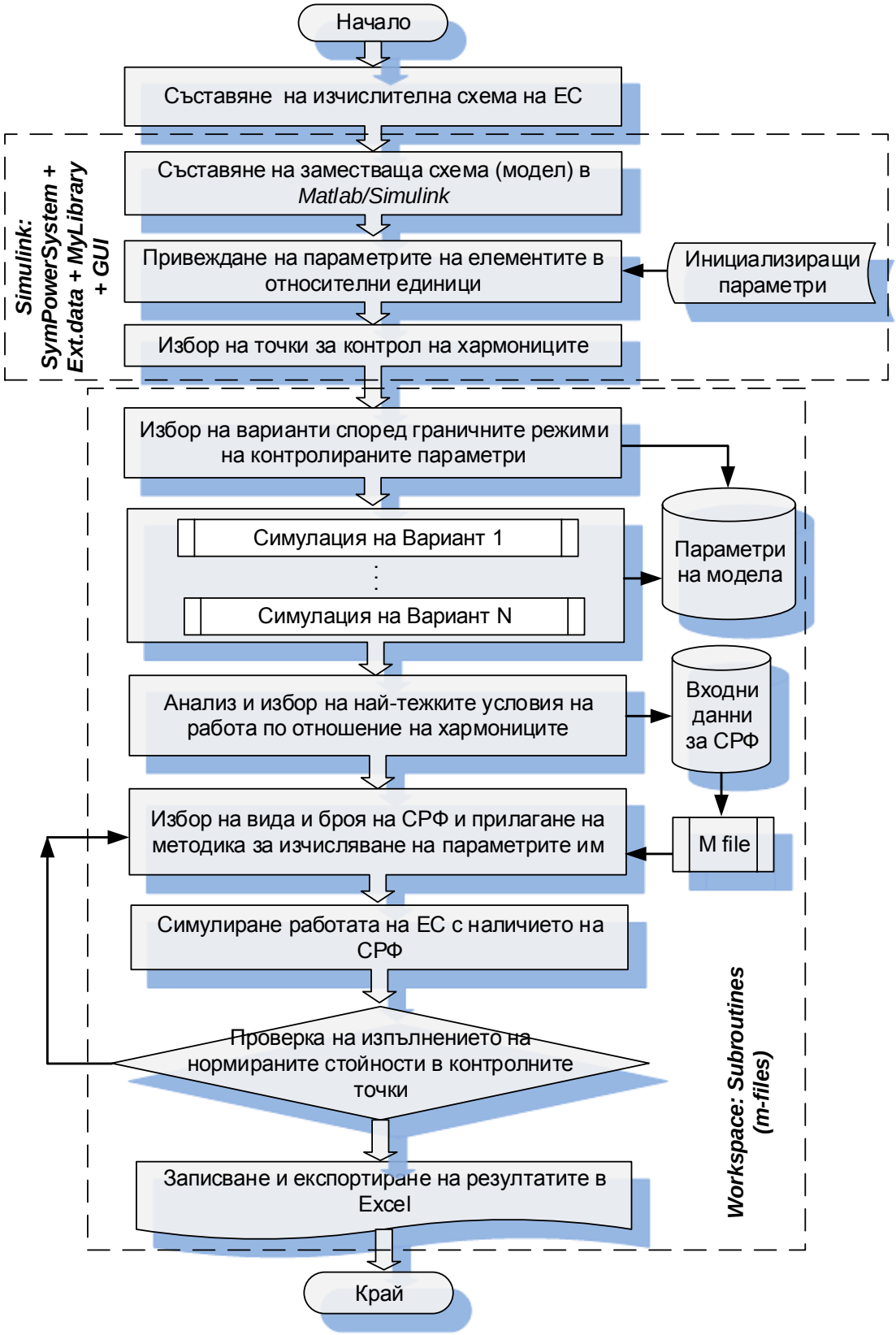
На фиг.2. е синтезиран алгоритъм на работа при избор на СРФ, който позволява да се отчетат, по-горе изброените недостатъци. Алгоритъмът на работа включва следните основни стъпки и особености при прилагането.

Съставяне на изчислителна схема на ЕС (трябва да се знаят параметрите на всички елементи на ЕС, включително мощността на к.с. в точката към присъединяване към обществената мрежа).

Следващите стъпки предполагат работа в средата на Matlab. Съставяне на модел на ЕС в Simulink работейки по начина описан в [10]. Важен момент тук е да се изберат контролни точки, в които да се следят: нивото на хармониците на ток и напрежение, коефициентите на несинусоидалност, претоварването на кондензаторните батерии.

За конкретната схема е нужно да се изберат възможните режими на работа, по отношение на товарите и структурата на схемата, които са най-„тежки“ по отношение на разпространението на хармониците.

Нужно е да се отчете необходимостта от компенсиране на реактивните товари и да се направят симулации с и без наличие на кондензаторни батерии (КБ).

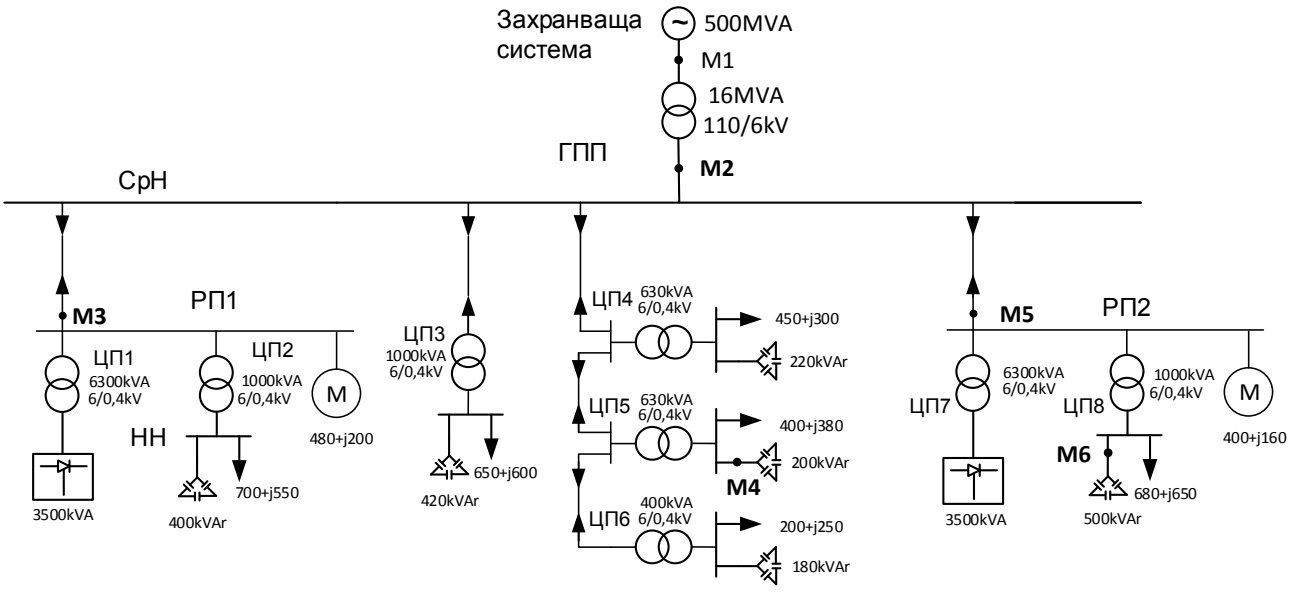


Фиг.2. Принципен алгоритъм на работа за избор на СРФ за ЕС

Следва оразмеряване и „инсталиране“ на СРФ в ЕС. Тук процеса е интерактивен, т.е. поставят се филтри за хармоник номер 5 (h=5), проверяват се нужните показатели, ако са в допустимите норми, няма нужда от допълнителни филтри, ако не са се поставя филтър за h=7 и т.н. до достигане изискванията на стандартите.

3. ПРИМЕРНО ПРИЛАГАНЕ НА АЛГОРИТЪМА ЗА ИЗБОР НА СРФ

По-горе описанията алгоритъм е приложен за конкретна електроснабдителна система, чиято схема е дадена на фиг.3. Основните параметри на елементите и големината товарите са дадени на самата схема. Схемата се състои от главно понижаваща подстанция (ГПП), две разпределителни подстанции (РП) и шест цехови подстанции (ЦП). Нелинейният товар са два мостови трифазни, управляеми токоизправителя включени към шините средно напрежение (СрН) на РП1 и РП2. Нелинейният товар е 58% от общия товар на предприятието. Контролните точки, в които ще бъдат поставени измервателни и записващи „апарати“ са обозначени с „**М**“.



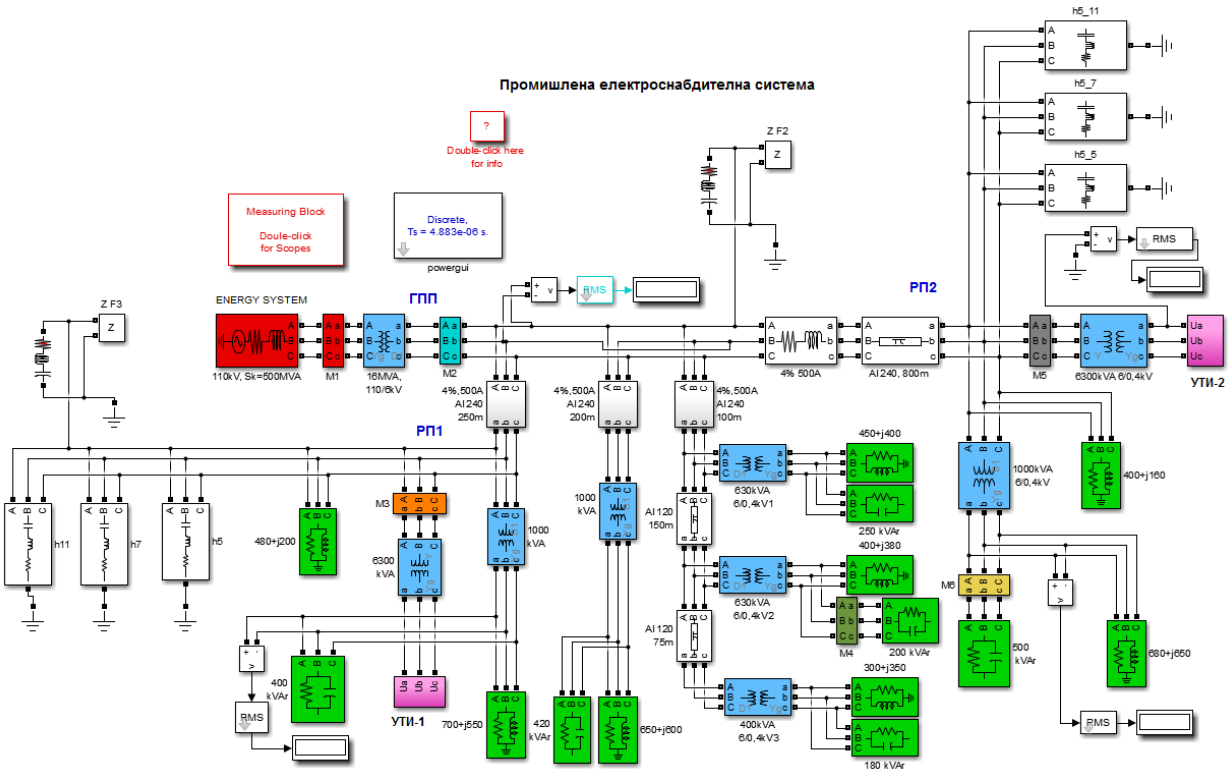
Фиг.3. Схема на примерна ЕС

На базата на схемата на ЕС от фиг.3. е съставен модел в Matlab/Simulink, който е показан на фиг.4. При съставянето му са отчетени параметрите на отделните елементи на електроснабдителната система, и са използвани допълнително разработени софтуерни инструменти и програми, както е описано в [10].

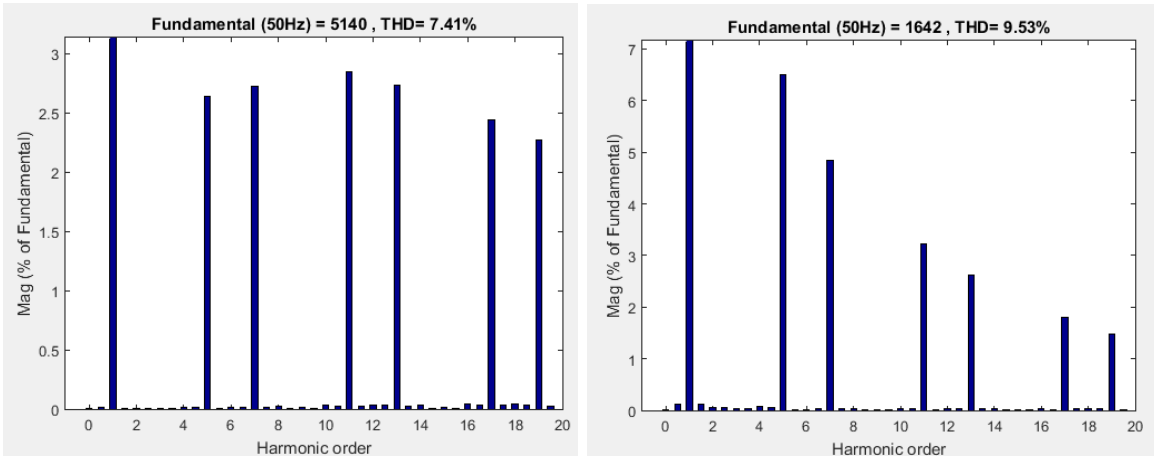
Направени са симулации за различни режими на работа. На фиг.4. и табл.1. са дадени резултатите за THD на напрежението и тока, както и коефициентите на хармониците (спрямо основния). Вижда се, че THD са извън нормите, както й коефициентите на хармониците на тока за h=5-13.

На шините на РП1 и РП2 се поставят филтри за h=5, h=7, h=13, като за всеки случай се провеждат измервания.

В табл.3 са дадени резултатите при инсталиран СРФ за h=5. Вижда се, че коефициентите на несинусоидалност и коефициентите на хармониците са под допустими стойности.



Фиг.4. Модел на ЕС в Matlab/Simulink



а) б)

Фиг.4. Амплитудно честотна характеристика на: а) напрежението; б) тока; (точка М2)

Таблица 1

Коефициенти на несинусоидалност (THD) на тока и напрежението и коефициенти на хармониците (U_{h*}, I_{h*}) за *h=5-13* за схемата без наличието на СРФ в точка М2

	THDu = 7.41% (норма по [11] 6%)			
h	*5*	*7*	*11*	*13*
U_{h*}, %	2.63	2.73	2.85	2.73
	THDi = 9.53% (норма по [11] 6.5%)			
h	*5*	*7*	*11*	*13*
I_{h*}, %	6.51	4.84	3.21	2.61

Таблица 2

Коефициенти на претоварване на КБ преди поставяне на СРФ

Контролна точка	Коефициент на претоварване на КБ
M6	1.25
M4	1.21

На следващите фигури и таблици са показани контролираните величини при поставяне на филтри и за 7 хармоник. Вижда се, че THD, U_{h*} и I_{h*} намаляват още, но за целесъобразността за поставяне на филтри за h=7 може да се прецени от допълнителни фактори като: цена, режими при повреда на един от филтрите, загуби на мощност и др. изискващи още изследвания.

Таблица 3

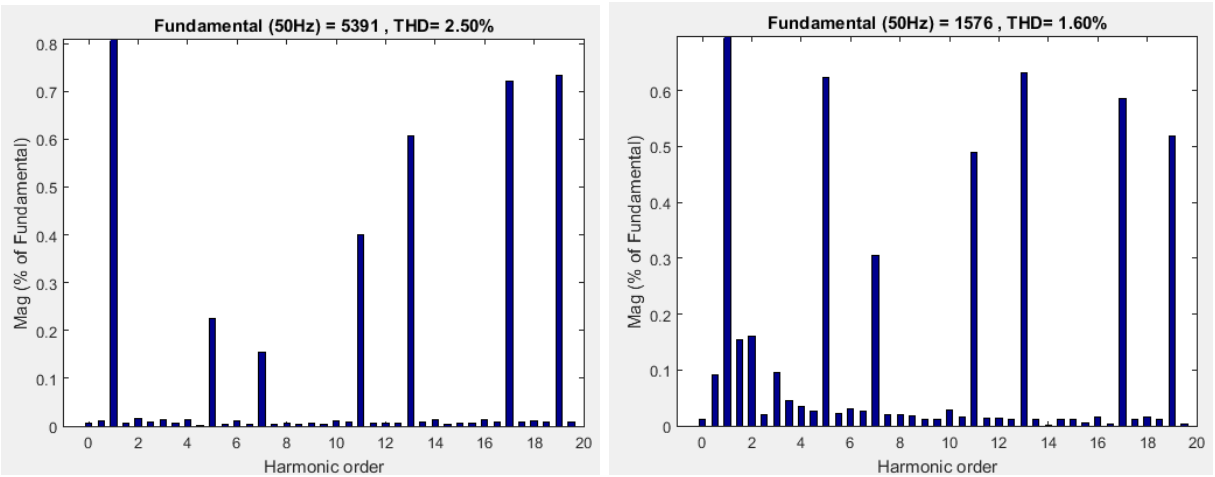
Коефициенти на несинусоидалност (THD) на тока и напрежението и коефициенти на хармониците (U_{h*}, I_{h*}) за *h=5-13* за схемата с поставен СРФ за *h=5* в точка M2

	THDu = 3,08%			
h	*5*	*7*	*11*	*13*
U_{h*}, %	0.23	0.53	0.66	0.88
	THDi = 2,35%			
h	*5*	*7*	*11*	*13*
I_{h*}, %	0.63	1.06	0.83	0.93

Таблица 4

Коефициенти на претоварване на КБ със СРФ за *h=5*

Контролна точка	Коефициент на претоварване на КБ
M6	1.17
M4	1.18



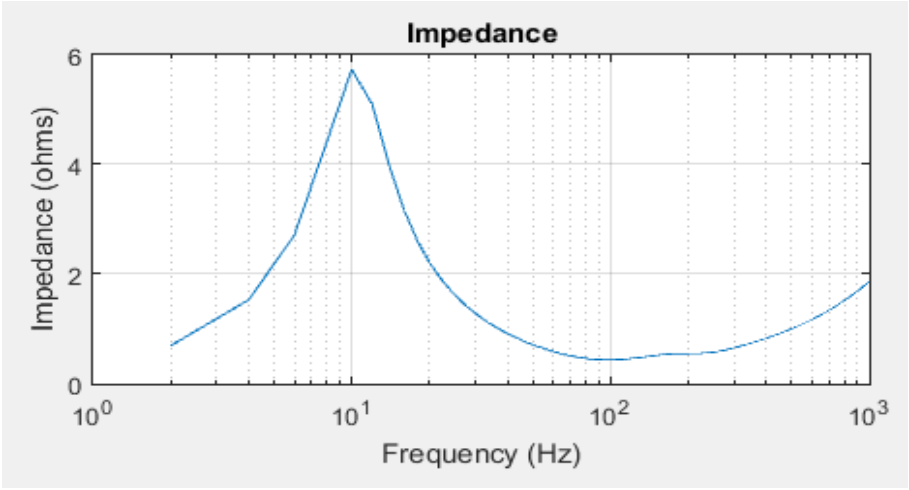
Фиг.6. Амплитудно честотна характеристки на: а) напрежението; б) тока; на общите шини на ГПП при наличие на СРФ за h=5 и 7

За всеки един от изследваните случаи са определени и коефициентите на претоварване на КБ. Ако се приеме допустимо претоварване 1,3 се вижда че стойностите от табл.4 са в допустимите нива.

Таблица 5

Коефициенти на несинусоидалност (THD) на тока и напрежението и коефициенти на хармониците (U_{h*}, I_{h*}) за *h=5-13* за схемата с поставен СРФ за *h=5 и 7* в точка М2

	THDu = 2,5%			
h	*5*	*7*	*11*	*13*
U_{h*}, %	0.22	0.15	0.4	0.61
	THDi = 1,6%			
h	*5*	*7*	*11*	*13*
I_{h*}, %	0.62	0.3	0.49	0.63



Фиг.7. Честотна характеристика на импеданса за една фаза на шините на ГПП с инсталирани филтри

От показаните резултати се вижда, че алгоритъмът е приложим и за него са разработени необходими софтуерни инструменти. За пълнота при избора на СРФ е необходимо да се съобразят и следните допълнителни фактори: съобразяване на разстройването на филтрите; оценка последствията от отпадане (повреда) на СРФ по време на работа на системата; съобразяване на изместването на резонансните честоти върху претоварването по ток и напрежение.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирането СРФ е строго индивидуална и комплексна задача за всяка ЕС. Тук е направен опит максимално да се обхванат всичко аспекти и проблеми при избора на СРФ. Синтезиран е общ алгоритъм на работа, за прилагането на който са разработени различни софтуерни инструменти в средата на MATLAB. Алгоритъмът е приложен за избора на СРФ за конкретна ЕС.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Selvaraj D. E. et al., ***A Short note on Harmonics and Filters in HVDC systems***. Journal Club for Electrical Engineering, V-1, I-2, 2014, pp. 17-26

[2] Матанов Н. ***Изследване и анализ на влиянието на преобразувателната техника върху качеството на напрежение в електроснабдителните системи на промишлени предприятия***. Автореферат. ТУ-София, 2013.

[3] IEEE Std.519-1992. ***Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems***

[4] Akagi. H. ***Modern active filters and traditional passive filters***. Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences, Vol. 54, No. 3, 2006, pp. 255-269

[5] Mindykowski J., T.Tarasiuk, P. Rupnik, ***Problems of Passive Filters Application in System with Varying Frequency***. 9th International Conference on Electric Power Quality and Utilization, Barcelona 9-11 October, 2007

[6] EN 61642:1997. ***Industrial a.c. networks affected by harmonics - Application of filters and shunt capacitors***

[7] M. A. Zamani, M. Mohseni., ***Damped-Type Double Tuned Filters Design for HVDC Systems***, 9th International Conference on Electric Power Quality and Utilization, Barcelona 9-11 October, 2007

[8] Ortmeyer H. T., T. Hiyama. ***Distribution System Harmonic Filter Planning***. Power Delivery, IEEE Transact. Volume: 11 Issue 4, Oct. 1996

[9] Ying-Tung Hsiao, ***Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems***. Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 4, No. 3, 2001, pp. 193-199

[10] Матанов Н., С. Димитрова. ***Модел на електроснабдителна система с променлива структура и електрически товари***. Научна конференция „ЕФ 2015“, България, Созопол 19-21 септември 2015

[11] IEC 61000-3-6:2008. ***Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems***

Автори: Николай Стефанов Матанов, доц д-р, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (ECEOET), Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*; инж. Харалан Пламенов Пенев, докторант, катедра ECEOET, Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *haralan.penev@bg.abb.com*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Сидер Сидеров

АНАЛИТИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗХОДА ЗА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ В БДЖ-ТОВАРНИ ПРЕВОЗИ И МЕТОДИ ЗА НЕГОВОТО ОГРАНИЧАВАНЕ

Илко Търпов

Резюме: *В доклада е представено аналитично проследяване на показателите за енергоемкост с цел подобряване на ефективността и осъществяване на административен контрол от страна на ръководния екип и енергийния мениджър. Също така са разгледани разходите за реактивна енергия и след проведен експеримент са посочени методи за намаляване на средствата за енергия.*
Ключови думи: *железопътен транспорт, разход за електроенергия, реактивна енергия, специфичен разход*

ANALYTICAL RESEARCH - ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION IN BDZ CARGO-METHODS FOR ITS RETRENCH

IlkoTarpov

Summary: *In the report the used up energy indicators are analytically examined with the purpose of improving the effectiveness and realization of administrative oversight by the governing team and the energy manager. What is more, the reactive energy consumption is being examined and with the help of an experiment some methods for retrenching the electric energy consumption are being indicated.*
Key words: *railway transport, electric energy consumption, reactive energy, specific consumption*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Разделянето на БДЖ на отделни дружества и навлизането на честни железопътни превозвачи, прави въпросът за разпределението на изразходваната електроенергия все по-актуален. От друга страна липсата на електромери в електрическите локомотиви създава допълнителни пречки за коректно начисляване на финансови средства според размера на консумираната електроенергия.

За постигането на устойчива енергийна ефективност в една транспортна фирма е необходимо редовно да се провежда аналитично проследяване на показателите за енергоемкост и осъществяване на административен контрол от страна на ръководния екип и енергийния мениджър. За нуждите на аналитичното изследване на разхода за електроенергия в БДЖ-ТП ще бъдат разгредани месечните отчети за разпределение на тяговата електроенергия между локомотивнити депа [2] и от тях ще се пресметне спецефичният разход на енергия и ще се направи сравнение с предходни години. Също така ще бъдат разгледани разходите за реак-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

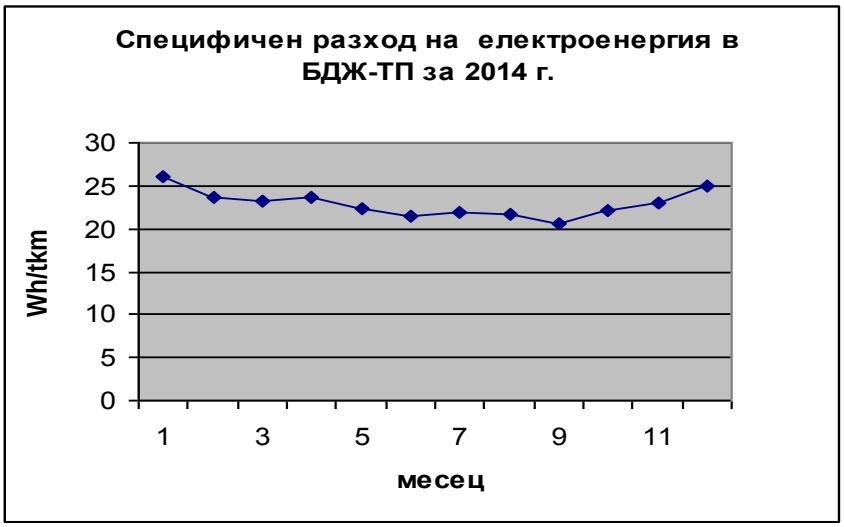
тивна енергия и ще бъдат посочени някои методи за намаляване на средствата за енергия.

2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СПЕЦИФИЧНИЯ РАЗХОД НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Специфичният разход на електроенергия на един влак представлява отношението на общата консумирана от тяговата мрежа електрическа енергия и брутната превозна работа (брутотон-километър), извършена от подвижния състав. Той се определя по формула (1):

$$e = \frac{E}{QS}, \text{(kWh/tkm)} \qquad (1)$$

където E, kWh е използвана енергия; Q, t - тегло на влака; S, km – изминат път. Показателят, определен по формула (1), дава общата енергоемкост на транспортния процес. В практиката този показател служи за оценка на енергийната ефективност на превозите. На базата на тези показатели при обработката на данните, отчетени по пътен лист от показания на електромерите на локомотиви, имащи такива, може да се направи пълен анализ на енергийната ефективност на превозната работа.



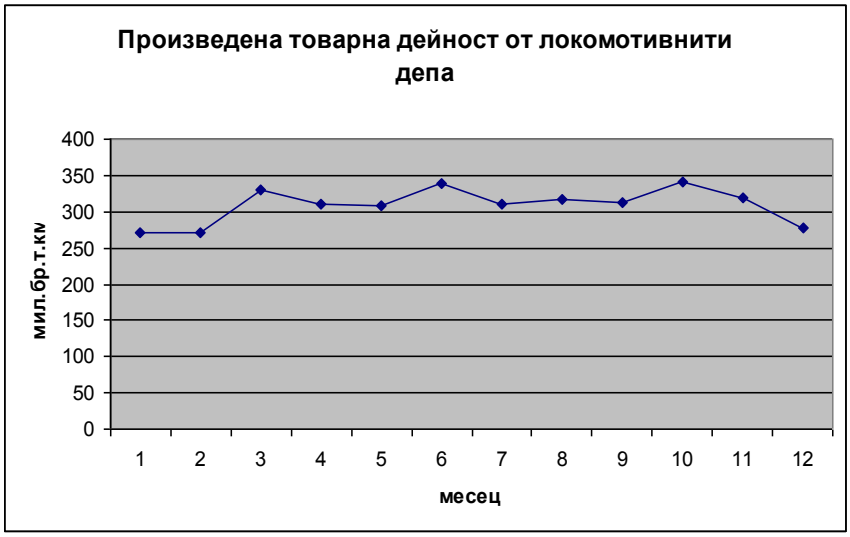
Фиг.1. *Специфичен разход на енергия в БДЖ-ТП за 2014 г.*

Изследването на енергийната ефективност на различните видове локомотиви е необходимо с оглед целесъобразното им използване според тегловите норми за съответните направления. Необходимостта личи и от следните данни за специфичния разход, свързан с произвеждането на единица транспортна продукция при различните видове превози и услуги:

- товарни влакове - 21,29 Wh/tkm;
- пътнически влакове - 38,38 Wh/tkm [1].

Налице е 1,8 пъти по-голям специфичен енергиен разход спрямо товарните превози поради невъзможност за използване на цялата мощност на локомотивите експлоатирани в пътнически превози.

Динамиката на специфичния разход на електроенергия за период от една година е показано на фиг.1.
Средния специфичен разход за разгледаната година показан на диаграма от фиг.1 е 22,87Wh/tkm, което представлява 7% завишен специфичен разход в сравнение с установения през 2002г., посочен по-горе.
Произведените брутотон-километри от локомотивните депа на фиг.2 показват липсата на ритмичност, характерна за товарните превози.



Фиг.2. *Произведена товарна дейност от локомотивните депа за 2014 г.*

3. АНАЛИЗ НА РАЗХОДА ЗА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ

Използваната активна енергия е отчетена на високата страна на трансформаторите в тяговите подстанции и включва, както загубите по контактната мрежа, така и присъединените към нея допълнителни консуматори. (отопление на вагони и стрелки, прелезни и други устройства на инфрастуктурати и др.)

Към посочената активна енергия трябва да се добави и тази на пътническото движение за да се види общият разход на Холдинг „БДЖ”.

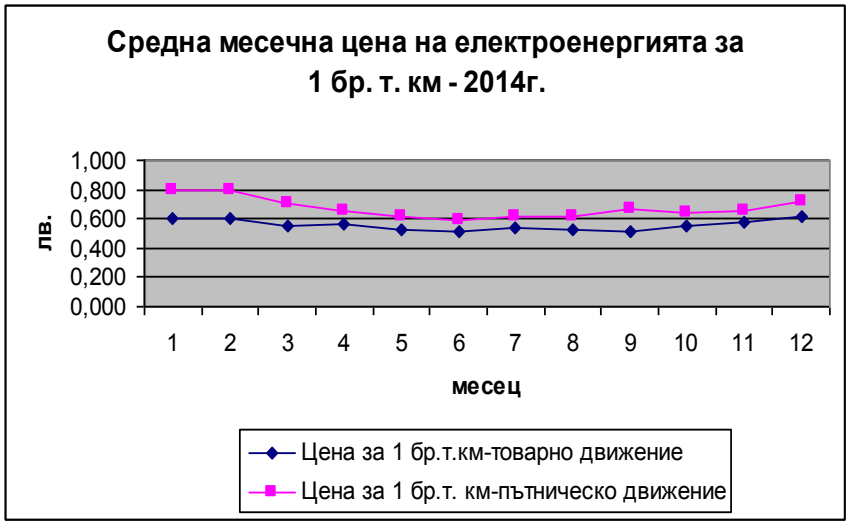
С така получените данни можем да изчислим средна месечна цена на електроенергията за единица произведена продукция.

Съвпадането на кривите от фиг.1 с тази от фиг.4 се дължи на пропорционалната методика прилагана при разпределението на електроенергията между превозвачите без електромери в електрическите транспортни средства.

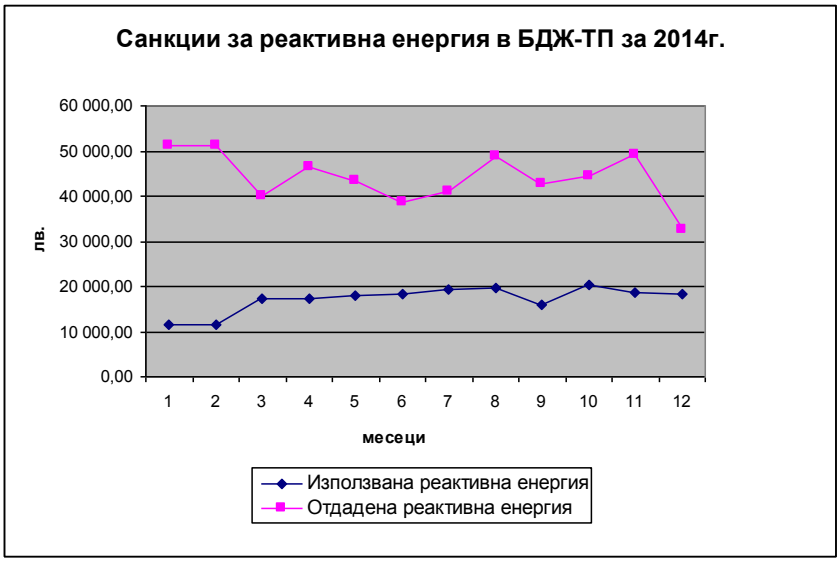
На фиг.5 са показани платените финансови средства от БДЖ-ТП за консумирана и отдадена реактивна електроенергия през 2014 г. по месеци.

От направения анализ на изразходваните средства за използвана и отдадена реактивна енергия се установява, че „БДЖ-ТП” ЕООД изплаща по 61 249,44 лв. средно на месец. Платените средства за използвана реактивна енергия представляват 39 % от средствата за отдадена такава за 2014 г. Проблема с реактивната енергия в БДЖ е изключително сериозен, което налага търсенето на ефективни методи и средства за нейното ограничаване.

Фиг.3. *Използвана активна енергия от БДЖ -ТП за 2014 г.*



Фиг.4. *Средна месечна цена на електроенергията за 1бр.т.км*



Фиг.5. *Платени средства в лв. за използвана и отдадена реактивна енергия в „БДЖ-ТП” ЕООД*

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ

Фактори, оказващи влияние върху разхода на електроенергия, са теглителната сила на локомотива, скоростта на движение и коефициента на полезно действие на транспортното средство. След като разхода на електроенергия ни е основен критерий, определен от времето за придвижване, съгласно книжка разписание, то той придобива вида:

$$E = \int_{t_н}^{t_k} \frac{F_k V}{\eta} dt \,, \tag{2}$$

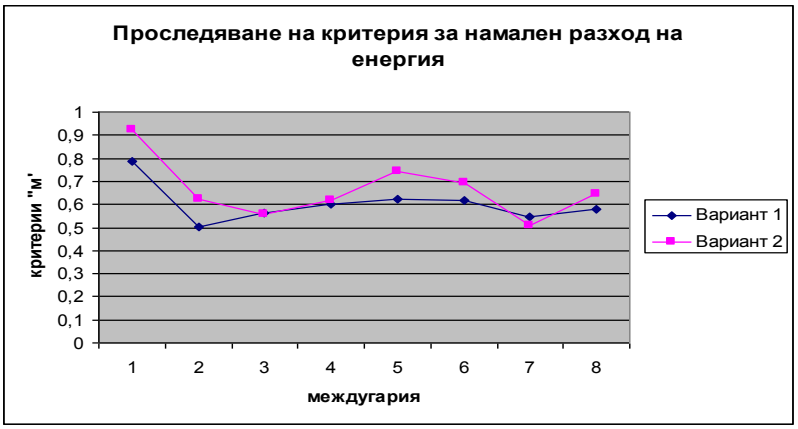
където $t_н$, $t_к$ са начално и крайно време за движение; $F_к$ - теглителна сила на локомотива; η - среден коефициент на полезно действие на локомотива; V - средна скорост на движение.

За да се установи дали можем да намалим разхода за електроенергия в железопътния транспорт се налага по-подробно да бъде разгледан въпроса за необходимата скорост при движение на товарните влакове и възможното и понижаване.

Произведението на изразходваната енергия – E, към средната скорост за движението на влака – $V_{ср}$ ще ни даде критерия за намален разход на енергия - μ, чрез намаляване на средната скорост на движение на влака с 1 km/h.

$$\mu = \frac{E}{V_{ср}} \,, \tag{3}$$

Резултатите от проведения експеримент, при който средната скорост за движение на състава е намалена с 9,44 % са показани на фиг.6.



Фиг. 6. *Проследяване на критерия за намален разход на енергия в междугария*

При вариант 1 състава се управлява по критерия времепътуване, а при вариант 2 по критерии максимална скорост. Икономията на електроенергия при първия вариант, общо за цялата проследена дестинация, е 17,52 % в сравнение с втория. В трето, четвърто и седмо междугарие се констатира съвпадане на критерия поради невъзможност от страна на локомотивният машинист да изпълни заданието.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Необходимо е подобряване на методиката за разпределение на активната и реактивна енергия между превозвачите без налични средства за измерване на консумираната електроенергия;

2. Монтиране на електромери в локомотивите на товарни превози, което ще подобри отчетността и ще намали разходите за електроенергия поради заплащане само на отчетената електроенергия;

3. Проведения експеримент подчертава значимостта на локомотивните машинисти в подобряване на енергийната ефективност и смисъла от въвеждане на стимули за реализиралите икономии.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Аврамов П., И. Миленов, Г. Павлов, ***Възможности за повишаване на енергийната ефективност на железопътния и градския електрифициран транспорт***, сп. Железопътен транспорт», бр. 11-12/2002.

[2] Благоева Е., ***Справка за разпределението на тяговата електроенергия между локомотивните депа в БДЖ.***

Автор: Илко Търпов, д-р инж. маг., „БДЖ - ТП” ЕООД, ПТП - Пловдив

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл. ас. д-р Иван Ангелов

АНАЛИЗ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА НА ТЕХНИКО-ИКОНОМИЧЕСКИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИЯ НА ОСВЕТИТЕЛНА УРЕДБА С LED ОСВЕТИТЕЛИ

Пламен Цанков, Милко Йовчев

Резюме: *В настоящия доклад се представя разработка и приложение на софтуерен инструмент за изчисляване и анализ на чувствителността на технико-икономическите показатели при модернизация на осветителна уредба с LED осветители. Реализирано е усъвършенстване на класическата методика за изчисляване на нетната сегашна стойност чрез въвеждане на възможност за отчитане на вторични инвестиции при сравняване на варианти с осветители със силно различаващ се живот на светлинните източници. Представено е изследване на рентабилността на проект, включващо анализ на чувствителността на технико-икономическите показатели при различни сценарии с промяна на цената на електрическата енергия, годишната часова използваемост на LED осветителите и изменението на инфлацията.*
Ключови думи: *рентабилност, анализ на чувствителността, вторична инвестиция, срок на откупуване, нетна сегашна стойност (NPV), LED осветители*

SENSITIVITY ANALYSIS OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS IN MODERNIZATION OF A LIGHTING SYSTEM WITH LED LUMINAIRES

Plamen Tsankov, Milko Yovchev

Abstract: *This report presents the development and application of software tool for calculation and sensitivity analysis of technical and economic parameters of the modernization of the lighting system with LED luminaires. Improvement of the classical methodology for calculating the net present value by introducing the possibility for accounting the secondary investments when comparing variants with a luminaires with varying life of the light sources is made. Profitability study of the project, including a sensitivity analysis of the technical and economic indicators in different scenarios by changing the price of electricity, the annual utilization hours of LED luminaires and changes in inflation is presented.*
Keywords: *profitability, sensitivity analysis, secondary investment, payback period, net present value (NPV), LED luminaires*

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Модернизацията на осветителните уредби с въвеждане на LED осветители е актуална мярка за повишаване на енергийната им ефективност. Значителният живот на LED осветителите е предпоставка за възникване на допълнителни задачи за поставяне на коректна оценка на технико-икономическата рентабилност на проекта: голяма вероятност от промени на цената на електрическата енергия; промени в лихвените проценти и инфлацията (дефлацията); промени в цените на елементите за изграждане на осветителните уредби, промени в годишната часова използваемост на осветлението; необходимост от отчитане на вторични инвестиции за осветителите. Съществуващите функции и инструменти на най-често използваните в България за изчисляване на технико-икономическите показатели софтуерни продукти Excel [4] и "ENSI – икономически изчисления" не са подходящи за директно отчитане на тези особености на модернизациите с LED осветители.

2. РАЗРАБОТКА НА СОФТУЕРЕН ИНСТРУМЕНТ ЗА ОЦЕНКА НА РЕНТАБИЛНОСТТА И АНАЛИЗ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА НА ИКОНОМИЧЕСКИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИЯ НА ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ С LED ОСВЕТИТЕЛИ

В настоящата разработка се предлага решение на допълнителните задачи за икономическа оценка на рентабилността на проекти за модернизация на осветителни уредби с LED осветители чрез допълване с необходимите функции на класическата методика за изчисляване на технико-икономическите показатели и автоматизираната им реализация с разработен в средата на MS Excel инструмент - фиг. 1.

Класическите икономически параметри [1,2,3], използвани в Excel инструмента за извършване на технико-икономически анализ, са: първоначална инвестиция - I_0 [лв.], нетни (парични) годишни спестявания - B [лв./година], технически/икономически живот - n [години], процент на инфлацията - b.100 [%], номинален сконтов процент - n_r.100 [%], реален сконтов процент - r.100 [%] и срок на планиране - p [години].

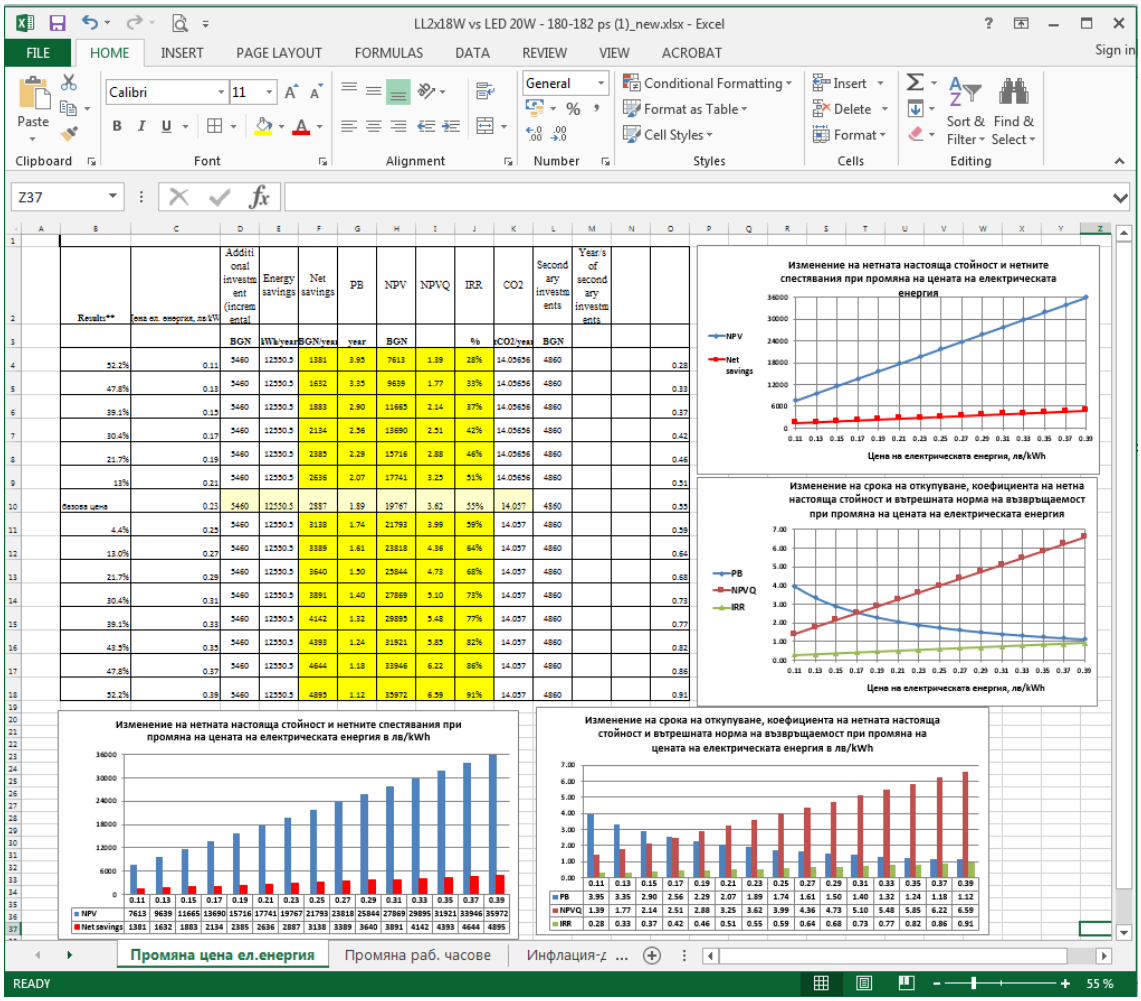
В настоящата разработка се предлага въвеждането на параметър вторични инвестиции в годината i - I_i [лв.], чрез който се отчитат избегнатите инвестиции за замяна на светлинни източници при разлика в живота на LED и заменяния конвенционален светлинен източник в осветителите.

Технико-икономическите показатели за оценка на рентабилността, използвани в Ексел инструмента, са: срок на откупуване - PB [години], нетна сегашна стойност - NPV [лв.], коефициент на нетна сегашна стойност – NPVQ и вътрешна норма на възвръщаемост - IRR, [%].

По дефиниция нетната сегашната стойност NPV на един проект представлява разликата между сегашните стойности на очакваните годишни спестявания B_i за срока на планиране и първоначалната инвестиция I_0, направена за него. При замяна на класическите осветители с луминесцентни лампи с нови, енергийно-ефективни LED, последните имат многократно по-дълъг експлоатационен срок.

За това при изчислението на NPV за определен срок на планиране на проекта, е необходимо да се отчита и сегашната стойност на вторичните инвестиции I_i в резултат от липсата на подмяна на LED осветителите в рамките на този срок, тоест те се явяват допълнителни спестявания. Следователно за този вид проекти се предлага определяне на NPV по следната формула:

$$NPV = \sum_{i=1}^{p} \frac{(B_i + I_i)}{(1+r)^i} - I_0. \qquad (1)$$



Фиг.1. *Софтуерен инструмент за анализ на чувствителността на икономическите показатели при модернизация на осветителни уредби с LED осветители в средата на MS Excel*

Работоспособността на разработения инструмент е показана чрез реализация на изчисление на технико-икономическите показатели и анализ на тяхната чувствителност за проект за модернизация на осветителна уредба на промишлен цех с прототипи на LED осветители, произведени в изпълнение на международен проект RAAND - 2014/104568 „Разработка и производство на иновативни енергоспестяващи промишлени осветителни тела с вградени светодиоди“, финансиран от Норвежки финансов механизъм 2009 - 2014 г.

3. ПРИЛОЖЕНИЕ НА СОФТУЕРНИЯ ИНСТРУМЕНТ ЗА АНАЛИЗ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА

3.1. СЦЕНАРИЙ „НАЙ-ЛОШ СЛУЧАЙ“

Изследва се изменението на технико-икономическите показатели на рентабилността PB, NPV, NPVQ и IRR, при изменение на основните технико-икономически параметри. Задаването на едновременна комбинация от 20% увеличение на първоначалната инвестиция I_0 при 20% намаление на нетните парични спестявания B и 20% увеличение на номиналния лихвен (сконтов) процент n_r, показано в табл.1, е прието да се нарича „Най-лош случай“ („Worst case scenario“). Резултатите от реализираните икономически показатели след прилагане на сценарий „Най-лош случай“ са показани в табл.2, сравнени с базовия.

Таблица 1

Технико-икономически параметър	Нов LED осветител		Съществуващ осветител	
	Базова стойност	Увеличение с 20%	Базова стойност	Увеличение с 20%
Цена на едно осветително тяло, *лв.*	180	216	160	
Цена на замяна на светлинен източник в осветително тяло, *лв.*	180	216	30	
Цена на електроенергия, *лв./kWh*	0,23	0,184	0,23	0,184
Номинален лихвен процент, *%*	8,00	9,60	8,00	9,60
Инфлация (дефлация – за 2014 г. [5]), *%*	-0,90			

Таблица 2

Крайни резултати от сравнението за промишления цех	Резултат	
	Базов	„Най-лош случай“
Първоначална инвестиция, *лв.*	11,340	13,608
Парични спестявания за цеха/помещението, *лв./год.*	2,287	1,830
Срок на откупуване PB, *години*	4,96	7,44
Реален сконтов процент, *%*	8,98 %	10,60%
Нетна сегашна стойност NPV, *лв.*	10 268	2,713
Коефициент на нетна сегашна стойност NPVQ	0,91	0,20
Вътрешната норма на възвръщаемост IRR, *%*	22,3%	14,0%

3.2. СЦЕНАРИЙ С ИЗМЕНЕНИЕ НА ЦЕНАТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

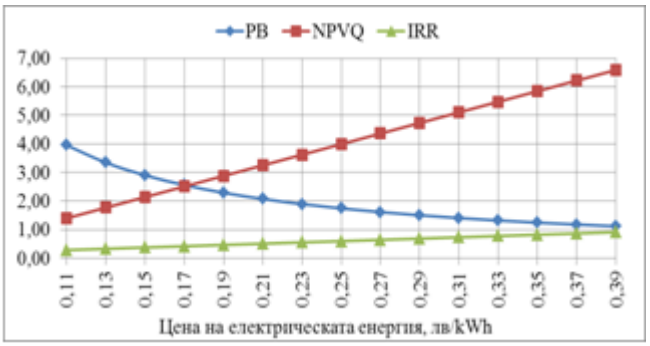
Анализът на чувствителността при фиксиран живот на LED осветителните тела от 40 000 часа може да се изследва и чрез моделиране на изменение в цената на електрическа енергия, като остават постоянни годишните парични спестявания, годините и размера на вторичните инвестиции от замяна на съществуващите LED осветители. Резултатите от моделираното изменение в цената на електроенергията с разработения Excel инструмент са представени в табл.3.

Таблица 3

Цена	Изменение на цената	Нетни спестявания	PB	NPV	NPVQ	IRR
лв./kWh	%	лв./година	години	лв.	-	%
0,11	52,2%	1381	3,95	7613	1,39	28%
0,13	47,8%	1632	3,35	9639	1,77	33%
0,15	39,1%	1883	2,90	11665	2,14	37%
0,17	30,4%	2134	2,56	13690	2,51	42%
0,19	21,7%	2385	2,29	15716	2,88	46%
0,21	13%	2636	2,07	17741	3,25	51%
0,23	*базова цена*	*2887*	*1,89*	*19767*	*3,62*	*55%*
0,25	4,4%	3138	1,74	21793	3,99	59%
0,27	13,0%	3389	1,61	23818	4,36	64%
0,29	21,7%	3640	1,50	25844	4,73	68%
0,31	30,4%	3891	1,40	27869	5,10	73%
0,33	39,1%	4142	1,32	29895	5,48	77%
0,35	43,5%	4393	1,24	31921	5,85	82%
0,37	47,8%	4644	1,18	33946	6,22	86%
0,39	52,2%	4895	1,12	35972	6,59	91%

На фиг.2-а и фиг.2-б са показани в графичен вид зависимостите на изменение на икономическите показатели NPV, нетни спестявания (Net saving), PB, NPVQ и IRR във функция от цената на електрическата енергия.

а) Изменение на NPV и Net saving



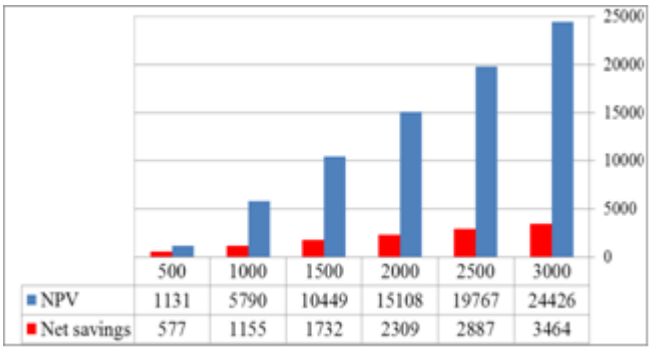
б) Изменение на PB, NPVQ и IRR

Фиг.2. *Изменение на икономически показатели при промяна на цената на електрическата енергия*

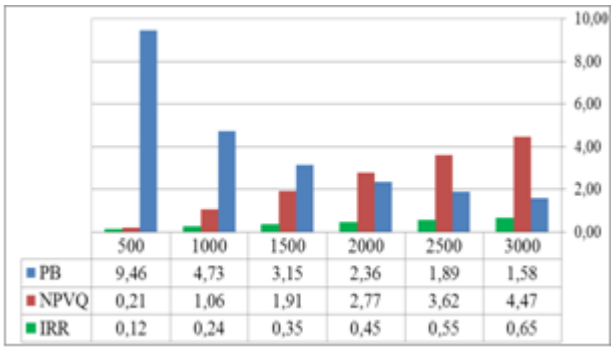
Графичните зависимости от фиг.2-а и фиг.2-б, като и резултатите от табл.3 показват, че с увеличаване на цената на консумираната електроенергия, се намалява по експоненциален закон срокът на откупуване PB на направените първоначална I_0 и вторични I_i инвестиции.

3.3. СЦЕНАРИЙ С ИЗМЕНЕНИЕ НА ГОДИШНАТА ЧАСОВА ИЗПОЛЗВАЕМОСТ НА ОСВЕТИТЕЛНАТА УРЕДБА

На фиг.3-а и фиг.3-б е показано изменението на същите икономически показатели, но при моделирана промяна в годишната часова използваемост на осветителната уредба.



а) Изменение на NPV и Net saving



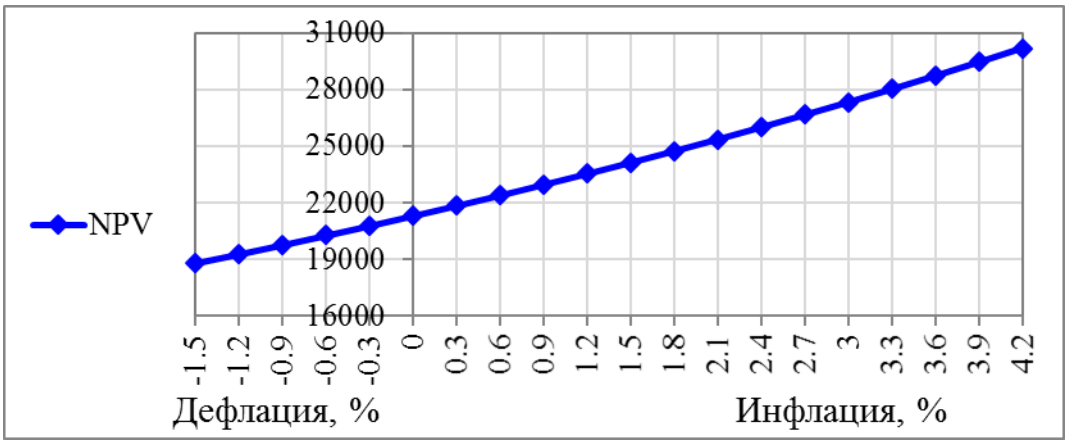
б) Изменение на PB, NPVQ и IRR

Фиг.3. *Изменение на икономически показатели при промяна на годишната часова използваемост на LED осветителна уредба*

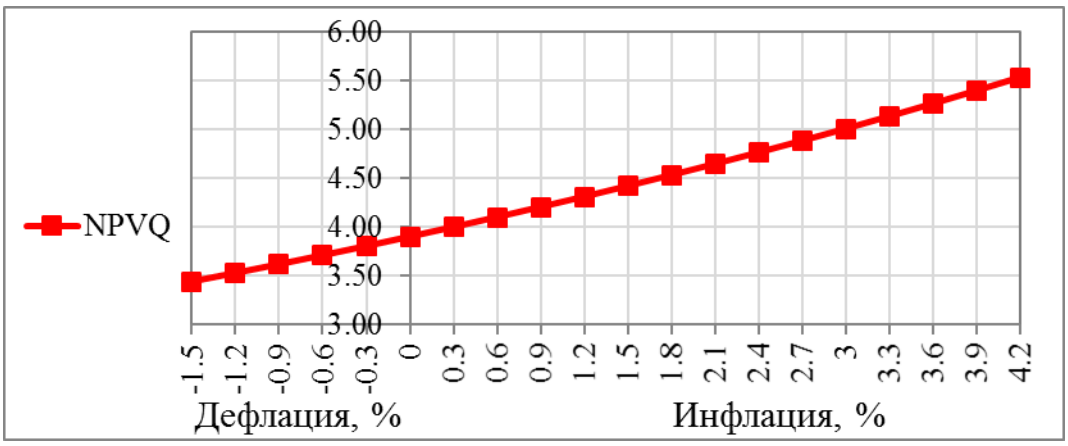
С увеличаване на годишната часова използваемост, срокът на откупуване PB намалява по експоненциална зависимост, както при увеличаване на цената на електрическата енергия (фиг.2). Останалите икономически показатели се изменят линейно, като най-чувствително е изменението на нетната сегашна стойност.

3.4. СЦЕНАРИЙ С ИЗМЕНЕНИЕ НА ИНФЛАЦИЯТА (ДЕФЛАЦИЯТА)

На фиг.4 и фиг.5 е показана зависимостта на нетната сегашна стойност NPV и коефициента на нетна сегашна стойност NPVQ при изменение на инфлацията, в зависимост от индекса на потребителските цени.



Фиг.4. *Изменение на нетната сегашна стойност при промяна на инфлацията*



Фиг.5. *Изменение на коефициента на нетната сегашна стойност при промяна на инфлацията*

По-високите цени на електрическата енергия, по-голямата часова използваемост на осветителната уредба и по-високите стойности на инфлацията водят до увеличаване на NPV, NPVQ, IRR и на паричните спестявания, а се съкращава срокът на откупуване PB, което е показателно за по-добрата рентабилност на проекта, която би се получила при развитие на тези сценарии.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на чувствителността на технико-икономическите показатели за оценка на рентабилността показва значителни изменения на срока на откупуване PB, нетната сегашна стойност NPV, коефициента на нетна сегашна стойност NPVQ и вътрешна норма на възвръщаемост IRR при изменение на технико-икономическите параметри в рамките на дългосрочните проекти за модернизация с LED осветители. Това потвърждава необходимостта от разработката и прилагането на специализирания инструмент при реализация на проекти с LED осветители.

Направените изчисления на технико-икономическите показатели и анализът на тяхната чувствителност за проекта за модернизация на промишлена осветителна уредба с реални прототипи на LED осветители, доказват запазването на рентабилността на проекта при най-тежките сценарии на изменение на входните параметри във времето. Това потвърждава високата енергийна ефективност и целесъобразността от въвеждането в производство на проектираните прототипи на LED осветители в рамките на международния проект „Разработка и производство на иновативни енергоспестяващи промишлени осветителни тела с вградени светодиоди“.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват благодарност на инж. Любомир Червилов и г-жа Валя Пеева от фирма ЕНСИ - Норвегия за предоставените материали по темата в рамките на партньорските им отношения по международен проект RAAND - 2014/104568 „Разработка и производство на иновативни енергоспестяващи промишлени осветителни тела с вградени светодиоди“, финансиран от Норвежки финансов механизъм 2009 - 2014 г.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Дуков, Д. ***Финансиране на устойчиви проекти на сгради***. Учебен курс „Проектиране на нискоенергийни сгради“, Боровец, 2009.

[2] ***Ръководство за анализ на инвестиционни проекти по разходи и ползи***. Европейска Комисия, Генерална дирекция “Регионална политика”, 2008.

[3] ***Инвестиции в енергийна ефективност*** – Наръчник. ЦЕЕ “ЕнЕфект”, София, 2004.

[4] ***Microsoft Excel*** – помощна система.

[5] ***www.nsi.bg*** – Национален Статистически Институт, Инфлация и индекси на потребителските цени.

Автори: Пламен Ценков Цанков, доц. д-р. инж., лаборатория „Осветителна и инсталационна техника“, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Технически университет - Габрово, E-mail address: *plamen@tugab.bg;* Милко Тодоров Йовчев, ас. инж., лаборатория „Осветителна и инсталационна техника“, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Технически университет - Габрово, E-mail address: *milkoyovchev1986@gmail.com.*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл.ас. д-р Ива Петринска

ОСВЕТЯВАНЕ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИ ГАРИ И СПИРКИ

Станимир Стефанов

Резюме: *В доклада са описани основните характеристики на железопътните гари и спирки и основните изисквания, свързани с тяхното вътрешно и външно осветление. Посочени са основните нормативни документи използвани у нас при проектирането на осветителни уредби на железопътни гари и спирки, и са допълнени с някой решения използвани в държави извън ЕС.*
Ключови думи: *влак, гара, железопътни спирки, осветление, перон*

LIGHTING OF RAILWAY STATIONS AND STOPS

Stanimir Stefanov

Abstract: *The current report describes the main characteristics of railway stations and stops and requirements relating to their internal and external lighting. Referred to are the main legal documents and parameters used in design of lighting systems at railway stations and stops in Bulgaria, and are complemented with some solutions in countries outside the EU.*
Keywords: *lighting, platform, railway stations, train station*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Железопътните гари, според своята специфика, предназначение и начин на управление се разделят на следните основни видове:

1. Гари по железопътни магистрали;
2. Гари по железопътни линии с диспечерска централизация и/или комплексна система за автоматизация и управление на движението на влаковете;
3. Разпределителни гари;
4. Гранични гари;
5. Гари със специфични изисквания;
6. Подземни железопътни гари.
7. Интермодални терминали.

Спирка се нарича експлоатационен пункт в междугарие, предназначен за обслужване на пътници, без коловозно развитие освен текущия път. Спирките могат да се проектират като: ;

1. Необслужвани спирки;
2. Обслужвани спирки.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

За обслужване на пътниците в спирките се проектират перони, като обслужваните спирки се проектират с чакалня и гише или автомат за продажба на билети и се предвижда възможност за обслужване на хора с увреждания или с детски колички. Съответно пък пероните на спирките по двойни железопътни линии се разполагат от двете страни на текущия път. Допуска се при обоснована необходимост перонът да бъде разположен между двата коловоза.

Основните съоръжения в гарите и спирките са перони, товарни рампи и разтоварища.

Разнообразието на видовете гари, спирки и техните основни елементи подсказва, че всяка една гара или спирка следва да бъде снабдена с различни осветителни уредби, удовлетворяващи изисквания свързани с конкретните видове дейности, предназначения и функциониране на съответните зони в гарите и спирките, поради което нормирането им се извършва на база нормативни документи за вътрешно и външно осветление за конкретната зона.

В [3] са посочени единствено норми за осветеност на гарови платформи и железопътни прелези, и то без показатели за оценка на равномерност, заслепяване и дискомфорт. Съгласно Глава двадесет и трета от [3] – „Изкуствена осветеност на гаровите платформи“, минималните нива на осветеност от изкуственото осветление на перони, рампи, разтоварища, контейнерни площадки и други площадки за комбинирани превози трябва да е най-малко 50 lx. За райони на железопътни гари или за целите гарови платформи на гари, в които се извършва маневрена работа или други операции по обслужване на влаковете, осветеността трябва да е най-малко 15 lx. На платформите на железопътни гари, които са предназначени за разминаване и/или надминаване на влакове, не е задължително предвиждането на изкуствена осветеност. Във връзка с това е очевидно, че осветителни уредби следва да се проектират на базата на [1], [2] и други международно приети действащи документи и методики. Не бива да се пропуска и факта, че освен осигуряване на необходимите осветености, тези уредби имат и естетически функции и те трябва да се вписват, както по технически критерии в околната среда, така и по визуални и естетически такива.

2. ОСНОВНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИ ГАРИ И СПИРКИ

Тъй като у нас липсват специфично обособени нормативни документи подобни на [5] и [6], проектирането на осветителните уредби на различните по предназначение зони на железопътни гари и спирки би следвало да се извършва на база БДС EN 12464 – 2 за външни осветителни уредби и БДС EN 12464 - 1 за вътрешни осветителни уредби при спазване на минималните норми от [3].

Както у нас, така и в чужбина, преобладаващи са откритите перони на гари и спирки, които са разположени в някаква околна среда със собствени биологични, архитектурни и светлини характеристики. За да не се създават от осветителните уредби на гарите и спирките в околната среда смущаващи светлини, заслепяващ ефект и за да не се стига до поява на дискомфорт в хората и биологичния свят, в [2] и [4] околната среда е категоризирана в 4 типа (табл.1), като за всеки тип в табл.2, стр. 12 на [2] са посочени съответните допустимите показа-

тели. В тази връзка, преди началото на проектирането на осветителните уредби на гарите и спирките, съответно следва да е ясно определено към коя категория спада околната среда. На фиг.1 - фиг.4 са показани спирки и гари в 4-те типа категории околни среди.

Таблица 1

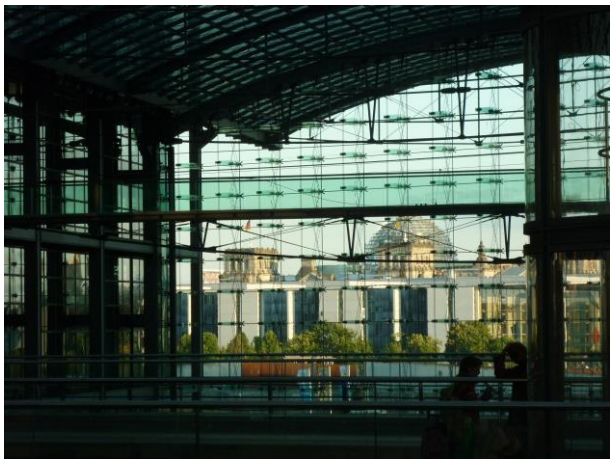
Категории околна среда

Категория	Описание
E1	Вътрешни тъмни зони, като национални паркове и защитени зони
E2	Зони с малка яркост, като индустриални или селски зони
E3	Зони със средна яркост, като индустриални или жилищни предгрупия
E4	Зони с голяма яркост, като градски центрове и търговски зони

Фиг.1. Категория E1.

Фиг.2. Категория E2.

Фиг.3. Категория E3.



Фиг.4. Категория E4.

Параметрите, които трябва да се контролират в осветителните уредби на откритите железопътните гари и спирки съгласно [2] (свързани с конкретни целеви повърхности и обекти) са минимални хоризонтални, вертикални и средни осветености на целеви повърхности, равномерност на осветеността на тези повърхности, цветопредаване, степен на заслепяване за всички позиции на наблюдателя, определяна посредством *GR*-показателя по методиката в [2] и отношени-

ето на минималната осветеност на повърхността към максималната - U_d - регламентирани в Таблица 5.12 на [2]. Видовете площи, съоръжения и дейности в районите на железопътните открити гари и спирки, както и изискванията, относно свързаните с тях минимални средни осветености са представени в Таблица 2. Стойността на експлоатационният фактор *MF,* която се използва в проектирането, следва да се определя в съответствие с типа светлинен източник, който ще бъде използван - *LED* или газоразряден светлинен източник.

Таблица 2

Железопътни и трамвайни линии [2]

Тип площ, задачи или дейност	$E_{m'}$ lx	R_a
Железопътни площи, включващи леки железници, трамвайни линии, монорелсов транспорт, теснолинейки, метро и т.н.		
Железопътни линии в зоната за пътници на пътната гара, включително подлези	10	20
Железопътни разпределителни гари: разпределения на едно ниво, отбивки за закъснения и категоризиране	10	20
Площи със железопътни възвишения	10	20
Железопътни линии за товарни вагони, операции с малка продължителност	10	20
Открити платформи, земеделски и местни влакове, малък брой пътници	15	20
Пешеходни пътеки	20	20
Пресичания на различни нива	20	20
Открити платформи, крайградскии регионални влакове с много пътници или междуградски работнически влакове с малко пътници	20	20
Железопътни линии за товарни вагони, операции с голяма продължителност	20	20
Открити платформи в зони за товарни вагони	20	20
Обслужващи влакове и локомотиви	20	40
Зони за маневриране в разпределителни гари	30	20
Зони за присъединяване	30	20
Стълби, малки и средни гари	50	40
Открити платформи, междуградски работнически влакове	50	20
Покрити платформи, крайградски или регионални влакове или междуградски работнически влакове с малко пътници	50	40
Покрити платформи в зони на товарни вагони, операции с малка продължителност	50	20
Покрити платформи, междуградски работнически влакове	100	40
Стълби, големи гари	100	40
Покрити платформи в зони на товарни вагони, операции с голяма продължителност	100	40
Ревизионна шахта	10	40

Осветителните уредби, освен че следва да бъдат съобразени с изискванията за максимално допустимата смущаваща светлина от външни осветителни уредби върху околната среда според нейната категория – табл.1, следва да бъдат съобразени и със стойностите на показателя на заслепяване *TI* по отношение на водачите на *МПС* – табл.3, стр. 13 от [2] за движещи се пътни превозни средства по улици на които няма улично осветление.

Вътрешните пространства в гарите и спирките, в прилежащите им сервизни, обществени и необществени части следва да се нормират съгласно [1], тъй като техните предназначения и зрителните задачи в тях не са специфични само за ар-

хитектурата и дейностите в железопътните гари и спирки. В табл.3 са приложени норменните изисквания към обществените части в железопътните гари и спирки на база данните от [1], обогатени с данни от [6] и [7].

Таблица 3

Вътрешни осветителни уредби в железопътни гари и спирки

Тип площ, задачи или дейност	E_m, lx	UGR_L	U_0	R_a
Покрити перони и пешеходни подлези	100	-	0,4	40
Изцяло покрити платформи, голям брой хора	200	-	0,5	60
Пешеходни подлези, малък брой хора	50	28	0,5	40
Пешеходни подлези, голям брой хора	100	28	0,5	40
Билетни зали и гарови фоайета	200	28	0,5	40
Билетни гишета и багажни отделения	300	19	0,5	80
Чакални	200	22	0,4	80
Входни фоайета и гарови зали	200	-	0,4	80
Сигнални боксове и технически помещения	200	28	0,4	60
Тунели за достъп	50	-	0,4	20
Клетки за поддръжка и ремонт	300	22	0,5	60
Външни зони с пешеходци, пресичащи участъци за движение на превозни средства	50	-	0,5	20
Зони за достъп на превозни средства	10	-	0,5	20

Фиг.5. Външна зона за достъп към ЖП гара

На база на прегледа на чуждестранни литературни източници извън Европа, напр. [5] и [6], се установи, че при тях се използват с около 25% по-високи норми за някой от типовете помещения и зони в сравнение с Европейските източници. Там е предвидено да се контролира и осветяване на граничната жълтата линия за изчакване, като за изцяло закрити перони минималната хоризонтална осветеност E_{ph} на жълтата линия е 150 lx, а за перони на открито е 30 lx. Нормират се и средна - E, минимална хоризонтална - E_{ph} и минимални вертикални осветености E_{vh} (съответно 42, 21 и 14 lx) и неравномерност на хоризонталната осветеност - $E_{max}/E<7$ за пътеки, рампи, стълби и над-

лези за достъп към гарата [5]. Също така, в [5] се нормира осветеността на зони за достъп към гарите на велосипедисти, ползващи собствени и обществени велосипеди, на други пътници, идващи от публичната обществена мрежа, и на покрити зони за достъп на автобуси до перонитe. Нормират се и осветеностите на телефоните за спешни повиквания и на информационните табла, които не са монитори - 200 lx.

3. АВАРИЙНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИ ГАРИ И СПИРКИ

Аварийното осветление в гарите и на спирките трябва да отговаря на нормативните изисквания за аварийно осветление. В случай на спиране на електрозахранването, то трябва да окаже път за извеждане и евакуация на пътниците от гарата, като съдейства за тяхното безопасно и методично напускане. В гари, където аварийното осветление се захранва от независим променливотоков източник – например посредством *UPS*-система, то може да обхваща част от осветителите на основното осветление.

Всички публични части на гарата, включително стълби, коридори и входове изискват аварийно осветление. Аварийното осветление за стълби и ескалатори трябва да наблегне на осветеността на горното и долното стъпало, както и на площадките за слизане [6]. Помещенията с електрическо и механично обслужване трябва да са снабдени с аварийно осветление, осигуряващо безопасно евакуиране и отстраняване на проблеми по оборудването в тях. Светещи табели за излизане трябва да показват евакуационната верига. Ако табелите за оказване на пътя за евакуация не са светещи, те трябва да бъдат осветени с вертикална осветеност, осигуряваща четимост на знаците в случай на спиране електрозахранването [6][7].

4. КОНТРОЛ И УПРАВЛЕНИЕ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИ ГАРИ И СПИРКИ

Железопътните гари функционират 24 часа в денонощието и 7 дни в седмицата. В тази връзка в тях може да се използват системи за управление на осветлението според сезона, натовареността на гарите и часа. Управлението на осветлението може да се осъществява чрез цялостна система за управление или чрез локални системи за управление на осветлението в публичните зони интегрирани със сензори, фотоклетки, релета, с астрономически часовник, програмируеми контролери и командни ключове, като интерфейса за управление в публичните зони би могъл да бъде интегриран с интерфейси на други системи за управление в гарата.

Управлението на осветлението в непубличните зони е желателно да се осъществява посредством сензори за присъствие комбинирани с местни включватели, като там, където това е възможно, последните да бъдат пренебрегнати.

Не трябва да се забравя обаче, че независимо от философията на системата за управление, при всяко състояние на осветлението то трябва да осигурява необходимите минимални нива по всяко време. Освен това е желателно осветлението да е максимално биологично и екологично съобразено, както по отношение

на неговите качества, така и по отношение на консумираната енергия. В тази връзка, осветлението на затворените зони на гарите и пероните би могло и е желателно да се интегрира с външната светлина през светлата част на денонощието, тъй като съвременните строителни материали и светлотехнически съоръжения позволяват това да бъде направено - фиг.4, фиг.6, фиг.7.

Фиг.6.

Фиг.7.

Към контрола и управлението на осветлението би могло да се добави и управление на светлинно насочване на пътниците към съответните перони, като в комплект с надписите би могло да бъде използвано и цветово оптично водене към съответните перони и влакове.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирането и изпълнението на външните и вътрешните осветителни уредби на железопътните гари и спирки е комплексна и сложна задача, изискваща координиране между множество изкисквания - технически, светлотехнически, електроенергийни, архитектурни и такива, имащи отношение към екологията и жизнения ритъм на флората и фауната. За да бъдат те изпълнени са необходими нормативни документи, които точно, ясно и еднозначно да регламентират съответните качествени и количествени параметри на осветителните уредби, ползващи естествени и изкуствени източници на светлина. Очевидно е, че съдържанието на Глава двадесет и трета от [3] – „Изкуствена осветеност на гаровите платформи“, в която са регламентирани някой минимални задължителни осветености е недостатъчно. В тази връзка, е осезаема необходимостта от наличието у нас на такива нормативни документи, като [5] и [6], съдържащи техническите характеристики, структурата и параметрите на железопътните и обществените съоръжения, на осветлението им и тяхното управление. Освен това, наличието у нас на подобни нормативни документи би облекчило проектирането на гаровите осветителни уредби и би намалило използването на различни източници и стандарти, понякога различаващи се в изискванията или с недостатъчна информация в тях.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 12464-1

[2] БДС EN 12464-2

[3] ***Наредба № 55 от 29 януари 2004 г. за проектиране и строителство на железопътни линии, железопътни гари, железопътни прелези и други елементи от железопътната инфраструктура***

[4] CIE 115-1995

[5] ***Engineering Standard, Design stations electrical infrastructure***, Part 129014, Government of Shout Australia, 2014

[6] ***Manual for standards and specifications for railway stations, Ministry of Railways (Railway Board)***, Government of India, New Delhy, India, 2009

[7] ***The lighting handbook***, 4th edition, Zumtobel lightinh, Dornbirn, Austria, 2013

Автори: Станимир Стефанов, гл. ас. д-р, катедра „Електротехника“, Факултет Електроника и Автоматика, ТУ-София, филиал Пловдив, E-mail address: *glasst@webmail.tu-plovdiv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: ас. д-р Димитър Павлов

ПРИЛОЖЕНИЕ НА СВЕТЛОВОДИ С НАДЛЪЖНА СВЕТЕЩА ИВИЦА ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ НА СПЕЦИАЛНИ ВЪТРЕШНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ

Захари Иванов, Виктор Манов

Резюме: *Представено е нетрадиционно светлотехническо решение за осветяване на представителен и с уникална конструкция атриум на единен център за управление на въздушното движение (ЕЦ за УВД). Разработен е многовариантен проект с използването на кухи светловоди с надлъжна светеща ивица. Изчислени са количествени и качествени показатели на осветителната уредба.*
Ключови думи: *светловод, вътрешно осветление, осветителна уредба*

USING A HOLLOW LIGHT GUIDE FOR LIGHTING SPECIFIC INTERNAL LIGHTING SYSTEMS

Zahari Ivanov, Viktor Manov

Abstract: *Presented untraditional lighting engineering solution for the illumination of representative and a unique atrium design of a center for air traffic management (CATM). Developed multivariate projects using hollow light guide with longitudinal luminous line. Calculated quantitative and qualitative indicators of the lighting system.*
Keywords: *Hollow light guide, interior lighting, lighting system*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Това е една нова и неиползвана у нас система за вътрешно и външно осветление. В класическите осветителни уредби осветителите са разпределени в границите на осветявания обект - на тавана на осветяваното помещение или по дължината на осветяваната улица. В новата система, обектите се осветяват от разположени на тавана светещи тръби, в краищата на които са монтирани светлинните източници. Светлинният поток се разпространява по тръбата, като частично се пропуска през разсейваща ивица, оформена по протежение на дължината или на определени места на тръбата.

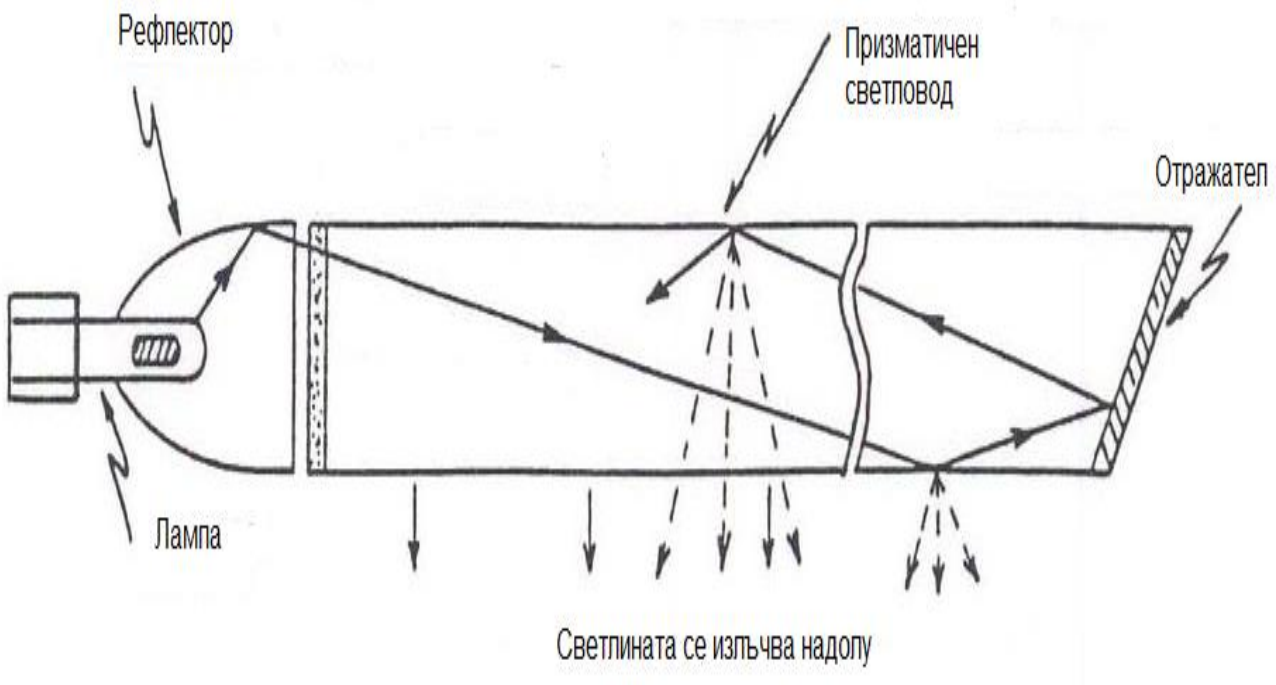
Изпълнението на такъв тип осветителни уредби в България биха спомогнали за разнообразяване на енергийно ефективните светлотехнически решения, използвани за осветяване на обществени пространства, метростанции, подлези, тунели, изложбени зали, помещения с пожаро- и взривоопасна среда и др.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ПРИЛОЖЕНИЕ НА КУХИ СВЕТЛОВОДИ ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ НА “АТРИУМА’’ НА ЦЕНТЪРА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ВЪЗДУШНОТО ДВИЖЕНИЕ В БЪЛГАРИЯ

Размерите на Атриума са впечатляващи: под 21x27m, таван 21x33.5m и височина 24m (фиг.2). Конструктивно тавана е решен с метални ферми, а над тях "оберлихт". Четирите стени на Атриума са плътно остъклени. Поради това възможностите за монтаж на осветителите са много ограничени. Изключително сериозни проблеми възникват с експлоатацията на осветителите. Конвенционалното изпълнение на осветителната уредба с осветители, окачени на тавана, е практически неприложимо, тъй като до тях не може да се осигури достъп за сменяването на изгорелите лампи и почистване и поддържане на осветителите. Предвид на това, са разработени различни вариантни решения на общото осветление, ползвайки кухи призматични светловоди (фиг.1).



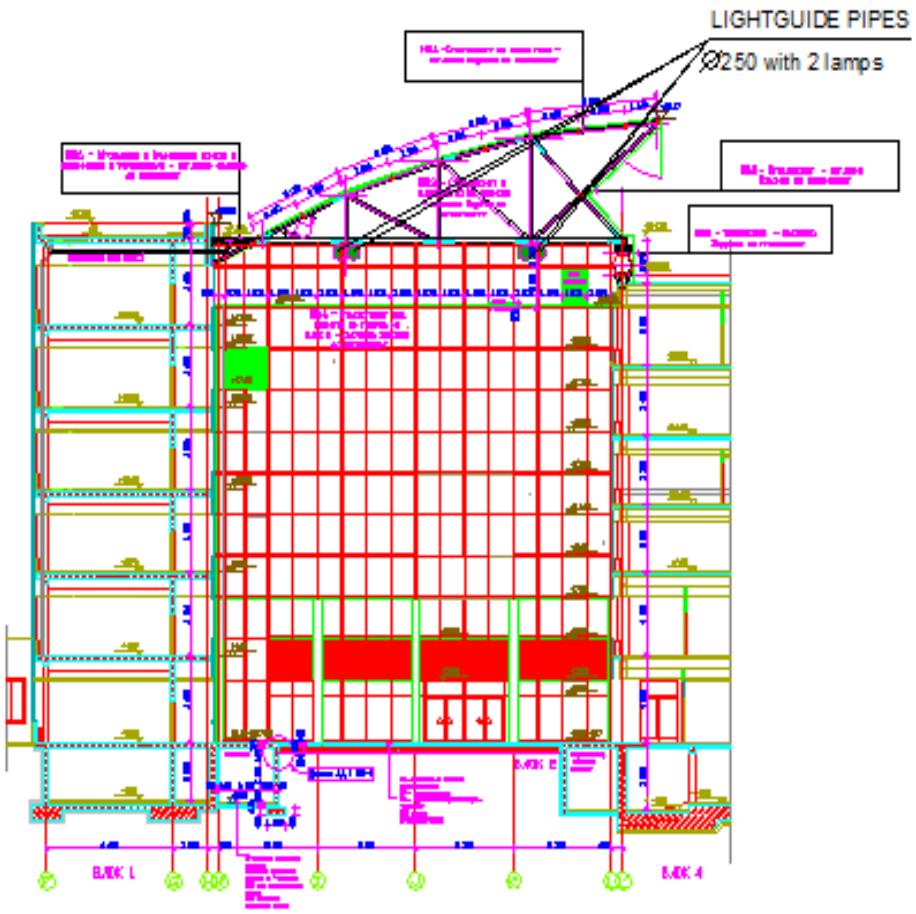
Фиг.1. Принципна схема на светловод с надлъжна светеща ивица.

На фиг.2 е показан монтажа на светловодните тръби над “Атриума’’.

Светещите кухи светловоди представляват кухи прозрачни тръби, направени от специално обработен акрилглас (фиг.2).

Диаметърът на тръбата е 250-300 mm. В единия или двата края на тръбата се монтират прожектори, които насочват светлинния поток на лампата навътре в тръбата.

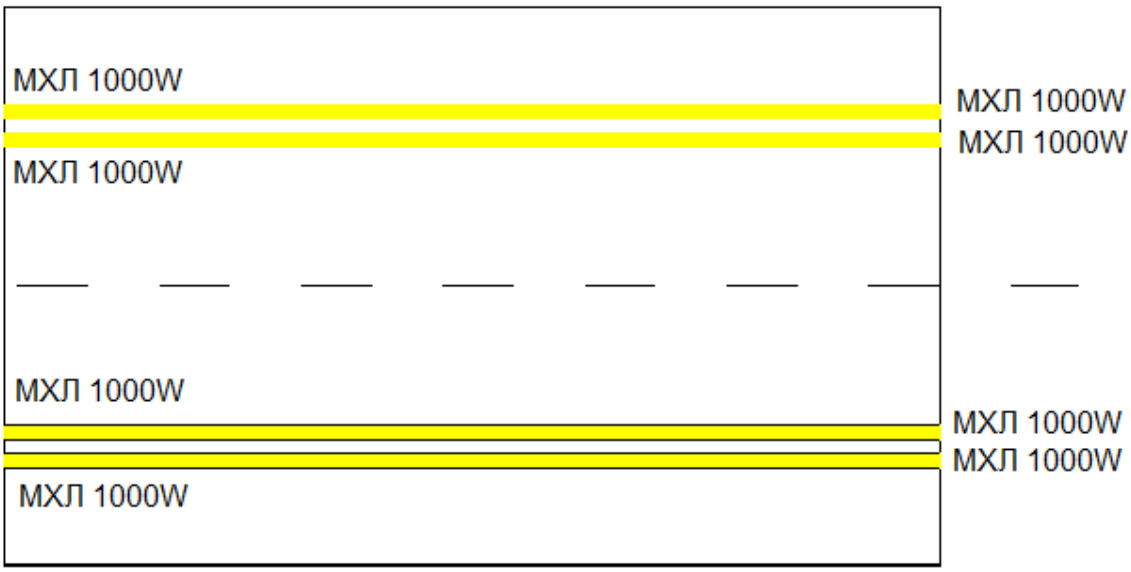
Обикновено се използват метал-халогенни или серни лампи. Въведеният в тръбата светлинен поток многократно се отразява от вътрешната стена на тръбата и частично се пропуска навън. Благодарение на това тръбата "свети", като разпределението на яркостта по нейната дължина е сравнително равномерно.



Фиг.2. Монтаж на светловодите над “Атриума’

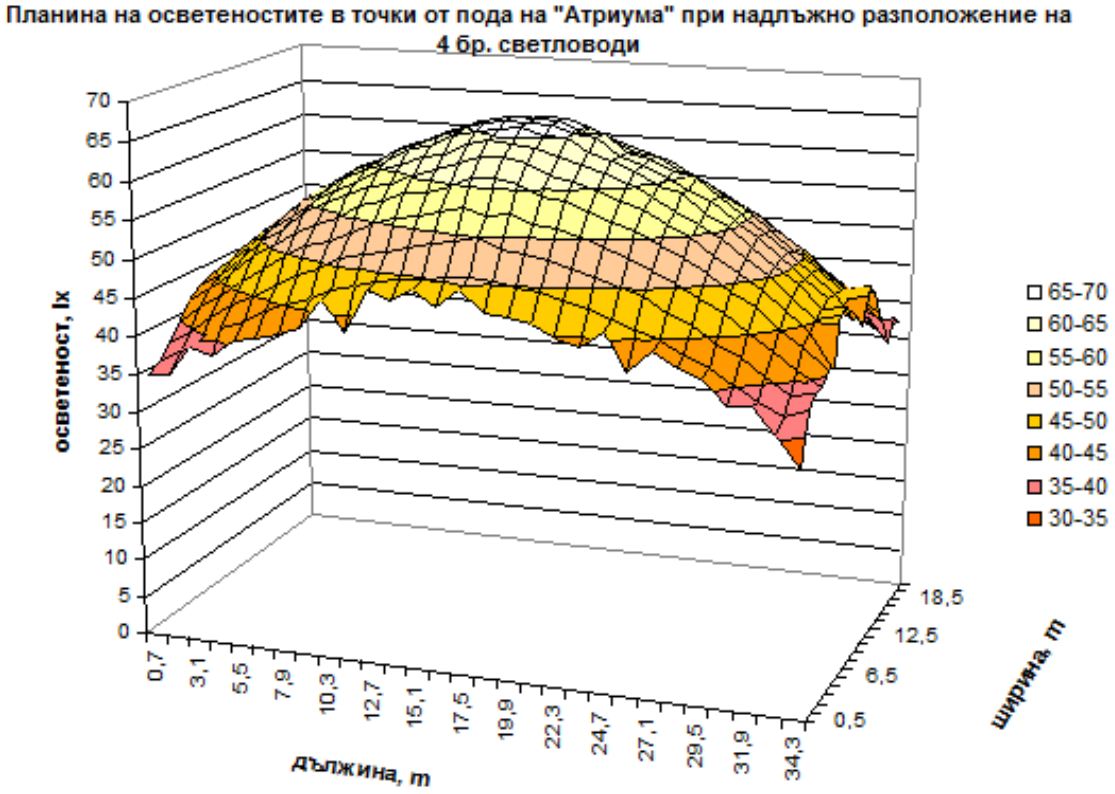
Разработени са следните вариантни решения:

А. Четири надлъжно разположени светещи тръби с дължина по 33.5m, окачени по две една до друга, на две от надлъжните ферми на тавана, както е показано на фиг.3. Постигната е средна осветеност на пода на Атриума 52 lx (фиг.5) и равномерност на осветлението Емин/Еср = 0.61.



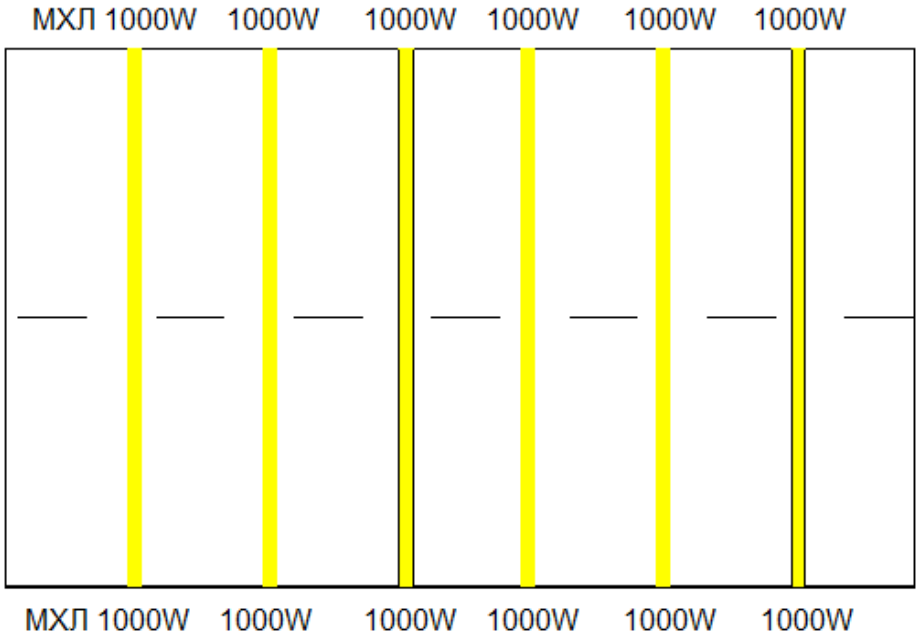
Фиг.3. 4 броя светловоди с МХЛ1000W.

На фиг.4 е показан релефът на осветеностите на пода на “Атриума’’ при надлъжно разположение на четири светловода с МХЛ1000W.

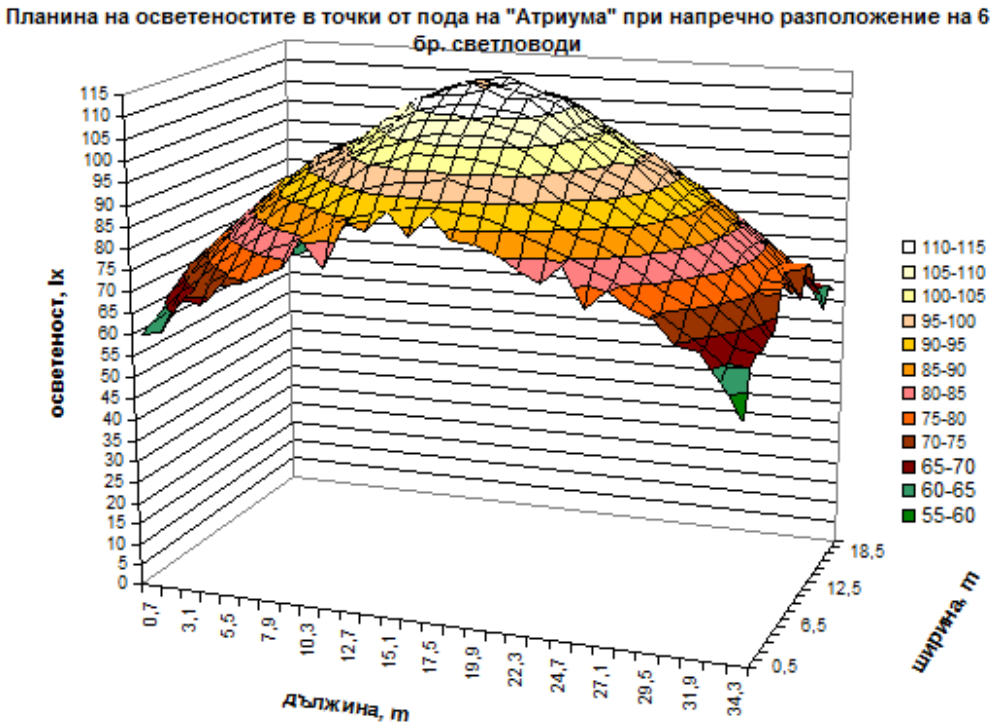


Фиг.4. Релеф на осветеността в точки от пода на „Атриума” при напречно разположение на 4 броя светловоди.

Б. Светловодните тръби са разположени напречно на дългата страна на Атриума (фиг.5). Средната осветеност на пода на Атриума е 108lx (фиг.6) при равномерност Emin/Emax = 0.72.

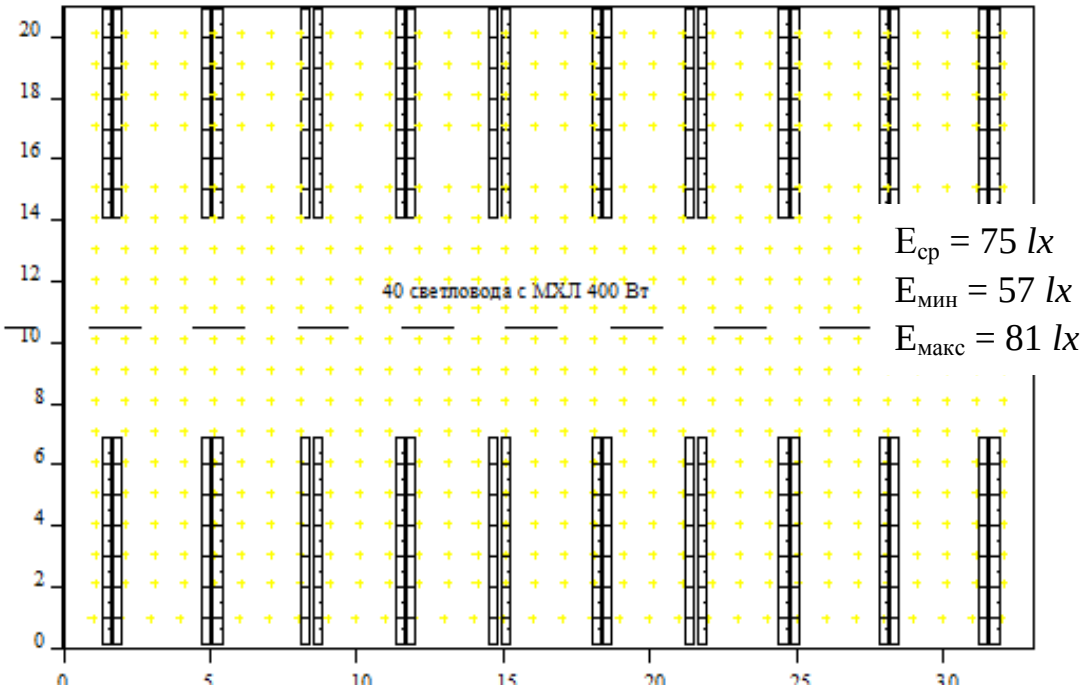


Фиг.5. 6 броя светловоди с МХЛ1000W.



Фиг.6. Релеф на осветеността в точки от пода на „Атриума” при напречно разположение на 6 броя светловоди.

В. Четиридесет светловодни тръби (фиг.7) на фирмата Se’lux с прожектор с метал-халогенна лампа 400W във външния край на тръбата.



Фиг.7. 40 броя светловоди с МХЛ 400W.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изчисленията при многовариантното проектиране показват, че чрез използването на кухи светловоди в Атриума на ЕЦ за УВД биха могли да се постигнат нормативните светлотехнически изисквания, при възможно последващо обслужване на осветителната уредба.

Осветителни уредби, изградени със светловоди, с надлъжна светеща ивица, са много добро светлотехническо решение за помещения със специфични ограничения, като достъпност за подмяна на лампи, поради голяма височина, взриво- и пожароопасност, непрекъсваемост на процеси и др. Приложението на кухите светловоди в осветителните уредби има редица предимства, по- важни от които са: създаване на висококачествено и безопасно осветление; многократно намаляване броя на използваните лампи и ос- ветители, експлоатационни разходи, дължина и стойност на електрическата инсталация и трудоемкост на работа при монтаж на осветителната уредба; повишава се надеждността на работа на ОУ, благодарение на възможността за резервиране на светлинните източници; възможност за намаляване на коефициента на запаса при проектиране на ОУ; многократно намаляване на разходите за материали и труд за изработване на светловода в сравнение с разходите за изработка на осветители за тежки условия на средата; възможност за използване на разрядни лампи с висока мощност.

Кухите светловоди, въпреки своите предимства, не винаги представляват най-доброто решение. Ефективността от използването им нараства с увеличаване на размерите им, а също така и от утежняване на условията, в които работят светловодите. Сравнителен технико - икономически анализ показва [4], че в зависимост от изпълнението, един кух тръбен светловод замества от 9 до 58 взривозащитени осветителя с нажежаема лампа и от 10 до 65 осветителя с луминесцентни лампи с взривозащитено изпълнение. Това позволява да се намалят: разходите на метал при производството на сравняваните изделия от 2,5 до 3 пъти; консумацията на електроенергия 20 - 30% в сравнение с луминесцентни лампи; разхода за обслужване на осветителните уредби от 60 до 100 пъти; приведените годишни разходи около 2 пъти. Общите разходи (инвестиции и експлоатационни разходи) се намаляват 2 пъти.

Основните области на използване на кухите светловодни тръби са: производствени помещения с взриво - и пожароопасна, замърсена и агресивна среда; помещения, в които обслужването на осветителите или е затруднено, или въобще е невъзможно поради специфични производствено-технологични условия; големи зали и помещения на обществени сгради, където е необходимо да се постигнат определени архитектурно - художествени ефекти; в помещения с технологични изисквания за чистота на въздуха и постоянна температура; в изложбени зали, музеи, гари, жп вагони, за вграждане в строителните конструкции на сградите, за осветление на спортни зали, метростанции, за имитатори на слънчево излъчване, в селското стопанство (оранжерии, парници, животновъдни ферми и др.); в уличното осветление като светещи стълбове; за пренос на слънчева енергия за осветление на помещения с недостатъчно или въобще без дневно осветление; за светлинна информация; като елементи на архитектурно решение на интериора и др.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Иванов З. А., ***Възможности и предимства на осветителни уредби с кухи тръбни светловоди"*** , сп."Енергетика", № 6-7, 1996 , стр. 15-16

[2] Иванов З.А., ***Приложение на светловоди с надлъжна светеща ивица в осветителните уредби***, Юбилейна научна сесия -50 години Технически Университет - София, Годишник на ТУ-София, том 48/ 1995г, кн.3., стр. 235-240

[3] Иванов З.А., Манов В., ***Изчисляване на оптична система за плосък светловод,*** XI национална конференция по осветление " Осветление 2001", 13-15 юни 2001г., Варна

[4] Айзенберг, Ю. Б., В. М. Пятигорский, Г.Б.Бухман ***Щелевые светловоды,*** Наука в СССР, 4, 1988

Автори: Захари Иванов, доц. д-р, катедра ЕСЕО, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*, Виктор Манов, маг. инж., фирма „Дженерал електрик-България", E-mail address: *vikmann@yahoo.com*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Николай Василев

СВЕТЛИННА ТЕРАПИЯ

Захари Иванов, Владимир Шаламанов

Резюме:*Разработен, реализиран и изследван е макет в реални размери на RGB контролер – RGB IRED switch controller C06, в комплект със светлодиоден линеен RGB модул, комплект със захранване. Светлодиодите работят в 7 предварително програмирани динамични режима.*
Ключови думи: *светлинна терапия, биодинамично осветление, системи за динамично осветление, RGB системи за управление, учебни помещения.*

LIGHT THERAPY

Zahari Ivanov, Vladimir Shalamanov

Abstract: *Developed and tested a prototype of an autonomous controller RGB IRED switch controller for LED lighting fixtures, kit with linear LED module and power supply. The RGB LEDs has been working following 7 different types of programs, programmed at the controller.*
Keywords: *light therapy, biodynamic lighting, dynamic lighting systems, RGB control systems, classrooms.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Благотворното действие на светлинната е известно още от дълбока древност. Слънчевата светлина е първият източник на светлина, използван във фото-медицината.
Задълбочените клинични изследвания на експерти в медицината в днешни дни потвърдиха добрия ефект върху човешкия организъм на пулсовата кинетична светлинна енергия. Човешкият организъм трансформира светлината в електрохимична енергия, която активира биохимични реакции в клетките, стимулира метаболизма и засилва имунната защита на организма. Светлината действа по естествен начин, като стимулира регенеративните и балансиращи възможности на тялото, като по този начин му позволява само да задейства възстановителния процес. Както в болничната, така и в частната медицинска практика понастоящем вече е натрупан достатъчно опит, който позволява да се твърди, че лечението с изкуствена светлина – това е надежден помощник на лекарите.

2. ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА СВЕТЛИННАТА ЕНЕРГИЯ И ЦВЕТОВЕТЕ ВЪРХУ ХОРАТА

Въздействие на светлинната енергия:
Регулира мастните киселини на клетката, стимулира създаването на нови клетки, подобрява метаболизма, акумулира енергия, от която клетката се нуждае:
а) Увеличава пропускливостта на клетъчната мембрана за кислород и вода; Стимулира естествените защитни механизми на тялото, увеличава кръвната плазма, укрепва имунитета; б) Помага регенерирането на колагенови влакна; в)Укрепва кръвоносните съ-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

дове; г) Регулира нервната система; д) Стимулира лимфната циркулация; е) Ускорява синтеза на протеин и изглажда бръчките.

Въздействие на цветовете:

Червената светлина (R) е активираща: Увеличава жизнеността на организма, активира кръвообращението, ускорява сърдечната дейност и повишава кръвното налягане, стимулира нервната система, сетивата и черния дроб. Повишава отделянето на адреналин от надбъбречните жлези.

Приложение: Прилага се при лечение на анемия, ревматизъм, сърдечни болести, липса на жизненост, безсилие, изтощение на организма, сънливост, неправилно храносмилане. Приложена на лицето, тя премахва жълтеникавия нездрав тен, бръчки, акне, ускорява кръвообращението, подобрява вида на кожата. Подходяща е за всякакъв тип кожа.

Противопоказания: При остри възпаления и възбудимост на нервната система.

Препоръки: Да не се употребява самостоятелно, а след нея да следва зелен, или син цвят.

Зелената светлина (G) е балансираща: Повишава жизнеността, разширява капилярите и създава чувство за топлина, облекчава напрежението. Подобрява растежа и стимулира функциите на хипофизата.

Приложение: За лечение на болести на бъбреците, черния дроб, стомаха, хипофизата и някои болести на сърцето. Регулира функцията на жлезите, регулира мастния баланс на кожата, черните точки, акне и т.н. Подходяща за мазна кожа.

Противопоказания: Не трябва да се употребява твърде дълго време.

Синята светлина (B) е бавна: Действа успокояващо на двигателните нерви, на сърдечносъдовата система. Ускорява образуването на левкоцити и подобрява състава на кръвта. Тя стимулира синтеза на белтък. Подобрява гъвкавостта на костите, изглажда кожата.

*Приложение:*За лечение на жлъчни заболявания, жълтеница, суха кашлица, пневмония. За всякакъв тип кожа.

Противопоказания: При заболявания със симптоми на изтощение.

Жълтата светлина (R+G) е защитна: Действа активиращо на двигателните нерви и мускулната дейност. Влияе благоприятно върху храносмилането, но при свръхдозиране може да причини диария, поради повишено отделяне на жлъчен сок (жлъчегонно действие). Действа лаксативно при запек; стимулира мозъчните функции и сърдечната дейност; повишава отделянето на храчки; стимулира костното изграждане; увеличава стомашната и чревната секреция; стимулира циркулацията, черния дроб и панкреаса, очите и ушите.

Приложение: С него може да се лекуват артрити, неврити, отоци, страхови състояния, запек, фрактури. Прилага се при мускулна и нервна умора.

Противопоказания: При: остри възпаления, свръхвъзбуда, треска, диарии.

Виолетова светлина (R + B) е дрениращa, смекчава, намалява

Приложение: Поддържа калиево-натриевия баланс в организма, намалява наднормения глад, забавя растежа на туморите.

Противопоказания: При заболявания със симптоми на изтощение.

Ясно синя светлина (G + B): Успокоява сърдечната дейност, понижава кръвното налягане, забавя пулса, успокоява нервната система, подобрява съня, по-

тиска болките, намалява температурата, намалява бронхиалната секреция, повишава метаболизма, действа противовъзпалително.
Приложение: За лечение на неврастения, неспокоен сън, артериална хипертония, хроничен колит, изгаряния и нагнояване, трески, възпаления.
Бяла (R + G + B): Бялата светлина има цялостно здравословно действие.
В разработената специална осветителна уредба [3] могат да бъдат направени изследвания за психо –физиологичното влияние на светлината.

3. СВЕТЛИНАТА - НАШ НАДЕЖДЕН ТЕРАПЕВТ

Поради липса на слънчева радиация през есенно-зимния период, "светлинен глад", много хора имат негативни симптоми: обща емоционална депресия, психологически дискомфорт във втората половина на деня, намаляване на физическите сили, повишен апетит, сънливост и други подобни.
Тези депресивни състояния – сезонни нарушения на психиката – са известни в психоневрологическата практика като SAD (Seasonal Affective Disorder) [1]. Статистиката показва, че над 20% от възрастното население на централна, северна и източна Европа са изложени на влиянието на SAD, при което дълбочината на депресията зависи от природни условия и от генетичните фактори.
През есента и зимата дефицитът на дневна светлина се усеща в офиси, училища, болници, както и в производствените цехове, дори и ако в тях са предвидени за монтаж на таван светлинни отвори (така наречените "светлинни отвори на горна дневна светлина").
През последните години значително се е разширила областта на успешното прилагане на светлинна терапия. Получени са окуражаващи резултати от клинични изследвания, които свидетелстват за ефективността на светлинна терапия при профилактика и лечение на такива психични заболявания и заболявания като: а) смекчаване (субсиндромална) форма на зимна депресия (S-SAD); б) депресивни състояния, които не са свързани със сезонни фактори; в) нарушения на съня, причинени от възрастовата патология или работа във вечерна и нощна смяна; г) алкохолен синдром; д) синдром на булимия (невроза на глад); е)предменструален синдром; ж) синдром на "реактивно изместване" – нарушение на биологичните ритми на организма ("сън-будност"): възниква при междуконтинентални полети – преместване през няколко часови пояси, което е неизбежно в дейността на държавни глави, дипломати, бизнесмени и екипажите на самолети, извършващи трансатлантически полети.
Честото пренастройване на биологичните часовници на организма към новата географска времева зона може да доведе до сериозни здравни проблеми.
Физиолози и психоневролози съвсем основателно смятат светлотерапията като найлесния, достъпен и ефективен медицински "инструмент".

4. СВЕТЛОТЕРАПЕВТИЧНИ УРЕДИ

Светло терапевтичните уреди могат значително да помогнат на хората, които работят при постоянна липса на естествена светлина, а също така за профилактика и лечение на SAD. Тези уреди са предназначени както за домашна употреба, така и за инсталиране на работни места за служители на офиси. Те се различават от професионалната светлотерапевтична апаратура в болниците или при лекарите, работещи в техните филиали. Клиничните уреди имат достатъчно голяма светеща повърхност и могат да бъдат използвани по време на сесия едновременно за три – четири пациенти. Различават се два основни типа на основата на различни светлоизточници – окомплектовани с луминесцентни и разрядни (за UV – ултравиолетово излъчване) лампи и окомплекто-

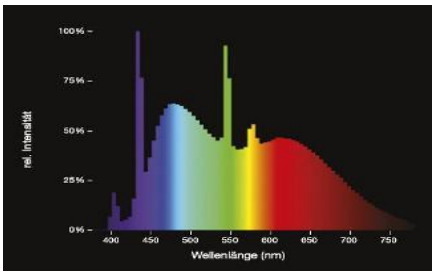
вани със светлодиоди(LED).Също така са добре известни уреди, ползващи лампи с нажежаема спирала или халогенни лампи, с филтри за излъчване в определена дължина на вълната – примерно IR- инфрачервено излъчване.
Устройствата като цяло са оборудвани с вграден брояч на сумарното време за работа. Това е необходимо за контрол на полезния срок на експлоатация на ЛЛ, който се определя от времето, когато светлинния поток на лампите, (а оттам и яркостта на светещия панел на уреда) ще падне с 20% от първоначалния максимум, което изисква подмяна на лампи. При най-добрите образци на съвременните ЛЛ полезния срок на експлоатация е не по-малко от 10 – 12 хиляди часа.
При светлоразпределението на уредите трябва да се вземат предвид геометрията на очите и тяхната структура: фоторецептори – светлочувствителните клетки са разпределени на голяма площ в края на обвивката, а най-чувствителни – в долната й зона. Колкото по-голям брой фоторецептори бъдат активирани със светлина, толкова по-ефективна ще е светлотерапията.
Зениците на двете очи могат да имат различен диаметър на разкриване, във връзка с което ретината може да се освети неравномерно. Освен това, с напредване на възрастта, поради потъмняванията на очните среди, светлинната пропускливост намалява и в очите попадна по-малко светлина.
Яркостта на светлотерапевтичният уред трябва да бъде достатъчна за преодоляване на тези фактори: предпочитаната стойност на яркост на светещата повърхност е ≥ 8000 cd/m^2. Въпреки това, за да се избегне заслепяващото действие, се препоръчва допустимо ниво на яркост – 10 000 cd/m^2. Светещата повърхност на уреда, по възможност, трябва да бъде голяма и равномерна. Светлотерапевтичните уреди имат достатъчно широк ъгъл на излъчване, така че пациентът може да се движи пред уредите в сравнително широка зона.
За контрол на осветеност (E, lx) се използва луксметър. В зависимост от разстоянието на пациента до уреда в зоната на очите, може да се създаде вертикална E = 10000 lx, въпреки че терапевтичен ефект се наблюдава вече при E = 2000 lx. В зависимост от различните ситуации, продължителността на светлинното облъчване се определя от лекар или то се препоръчва в инструкциите за употреба на уреда.
Не е задължително в рамките на определеното време непрекъснато гледане на светещата повърхност, достатъчно е от време на време да се насочи погледа към уреда, който се монтира от ляво или от дясно на избраното разстояние.

4.1. СВЕТЛО ТЕРАПЕВТИЧЕН УРЕД С ЛУМИНЕСЦЕНТНИ ЛАМПИ

В светло терапевтичните уреди с луминесцентни лампи, трябва да се използват лампи със студена дневна светлина (6500 К излъчване на открит небосвод по обедно време) и спектрално излъчване най-близко до слънчевото [2].
Такъв пример е уреда на Philips “Bright Light energy” показан на фиг.1.Той е предназначен за употреба в домашни условия или на работното място.

Фиг.1.

Общ вид на светло терапевтичния уред и спектъра на излъчване на ЛЛ са показани на снимката на фиг.2. В табл.1 са показани режими на сеансите за светлинна терапия при използване на уреда.



Фиг.2.

Табл.1

Разстояние от светещата повърхност до лицето	Осветеност, създавана на лицето	Общото време на сеанси на ден
20 cm	10 000 lx	30 мин.
40 cm	5 000 lx	1 ч
60 cm	2500 lx	2 ч

4.2. СВЕТЛО ТЕРАПЕВТИЧЕН УРЕД СЪС СВЕТЛОДИОДНИ ИЗТОЧНИЦИ

Синьото излъчване на светлодиода – надежден антидепресант.

През 2002 г. американските неврофизиолози и офталмолози са направили много важно откритие. Оказало се, че в ретината, освен основните светлоцветочувствителни клетки (пръчици и колбички), има и трети вид фоторецептор с максимална чувствителност в синята част на видимия спектър (дължина на вълната λ = 465 – 470 nm) [1].

Нови фоторецептори, възприемайки синята част от светлинното лъчение, стабилизират работата на вътрешните биологични "часовници" на човека и регулират денонощните и сезонните биоритми в организма, например, телесната температура и хормоналния баланс. Едни от най-важните хормони са: кортизолът (наричан хормон на стреса) и мелатонин – хормон на съня или умората.

При липса на светлина се освобождава мелатонин в кръвта и човек започва да чувства умора. Този ефект се потиска при облъчване на очите със синя светлина.

На международната изложба "IFA 2009" концернът Philips Lighting демонстрира светлотерапевтически уред "BLU goLITE" със сини светлодиоди, който се появи на пазара през септември 2009 г [2]..

Доминиращата дължина на вълната на излъчване на сините светлодиоди (λ=470nm) съвпада с максимума на чувствителност на посочения по-горе трети тип на светлочувствителни елементи в ретината на човешкото око.

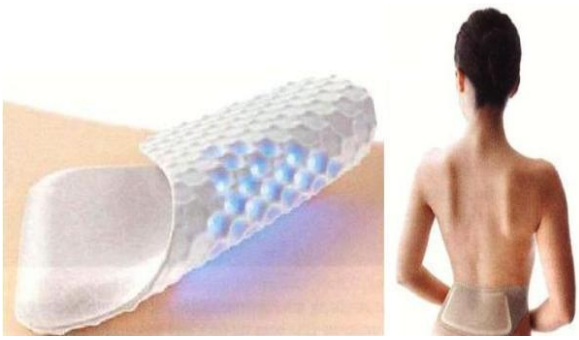
Уредът се отличава с изключително ниска консумация на енергия, малки размери (140 x 140 x 25 mm) и е снабден с таймер и функция на будилник. За да се получи положителен ефект върху биоритмите, в рамките на деня, е достатъчно 15-45 минути на експозиция на синьото излъчване на очите от уреда.

Фиг.3.

Приборът почти не изисква поддръжка – срока на експлоатация на светлодиодите е много голям. При дневна работа 30 минути, подмяна на светлодиодите е необходимо след около 50 години. Излъчването от сините светлодиоди е абсолютно безопасно, ултравиолетовата и инфрачервена компонента липсва.
Яркостта на светлоразсеиващия панел е равномерна и не оказва заслепяващо действия.
Липсата на светлина, проникваща в зрителния анализатор (очите), особено в есенно-зимния период, при много хора предизвиква нарушения на съня, депресия, липса на апетит, отслабване на концентрацията на вниманието, а в много случаи дори на сезонна депресия.
Лек, безопасен и удобен за ползване, уредът "BLU goLITE" успешно е преминал клинични изпитания, може да помогне за преодоляване на тези негативни явления. Източник на информация: вестник "Licht", 2009, №10. с. 695 – "BLU goLITE" hilft gegen Winterdepression

Синьо излъчване на светлодиода – ефективна алтернатива на фармацевтичните средства при болки в гърба.

Концернът Royal Philips Electronics в рамките на неговия изследователски проект "Philips Light & Health – Venture", изнесе доклад на тема "Синьо излъчване на светлодиода – терапевтична опция при болки в гърба" ("Blaues LED-Licht als neue Therpie-Option bei Rückschmerzen") на 11 август 2011 г. по време на конференцията във Франкфурт на Майн: фиг.4 и фиг.5) [2]..
Списание "Licht" (2011, № 9, с. 50-51) публикува доклад за симпозиума, съпровождайки го с позоваване на 22 научноизследователски работи на автори от различни страни, посветени на терапевтическото влияние на синята светлина.
Изводите по отношение на механизма на това въздействие са формулирани на симпозиума в докладите на проф. докт. Матиас Борн (Matthias Born, Дюселфдорфски университет) и други .



Фиг. 4

Фиг. 5

Основните изводи за излъчването на сините светлодиоди са :

1. Излъчването на сините светлодиоди с дължина на вълната $\lambda = 453$ nm при облъченост е = 22 mw/cm^2 подпомага отделянето в организма на монооксиси на азот – NO. Локалното отделяне на NO може да е за сметка на дифузия, транснитрозирование и чрез системата на разпределение в кръвта да проникне дълбоко в кожната обвивка, чак до мускулите, и там се открива.

2. Едновременно, синята светлина води до освобождаване на енергия, топлинна енергия и топлината доста позитивно се възприема от пациентите при усещане на болка. Топлината засилва освобождаването на NO , води до разширяване на кръвоносните съдове.

3. Предизвикани от отделения NO, сигналните пътища обуславят намалена концентрация на калций в клетъчните тъкани и допринасят по този начин да се отпуснат мускулите на кръвоносните съдове.

4. По този начин "синьото облъчване" осезаемо повишава интензивността на притока на кръв, и не само в облъчвания участък, но и във всички области, където светлина не прониква.

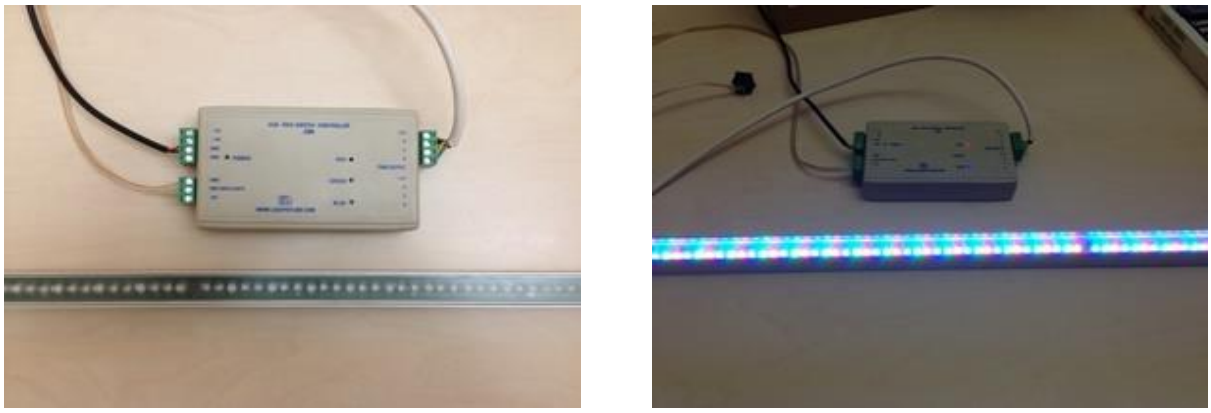
5. Засилване на кръвообращението може да засили засищане на мускулите с кислород и хранителни вещества. Едновременно субстанциите, причиняващи болка се извеждат по-добре.

6. Допълнителни ефекти: NO има антиоксидантни, противовъзпалителни и антиапоптотически свойства, което може да предпази от негативните влияния върху мускулите и нервната тъкан, а също и за намаляване на смъртта на клетките.

7. Съществуващите опасения за евентуалното вредно действие на синьото светлодиодно излъчване са неоснователни: изследванията показват, че лъчение с $\lambda = 453$ nm е абсолютно безопасно и не е токсично при спазване на пределно допустимата облъченост (250 Дж/cm^2). Препоръчителната специфична интензивност на облъчване е само 20 Дж/ cm^2. Техническата безопасност на опитния образец на изследвания уред отговаря на нормите на DIN.

RGB светлодиодите - като помощник за лечение чрез влиянието на всички цветове

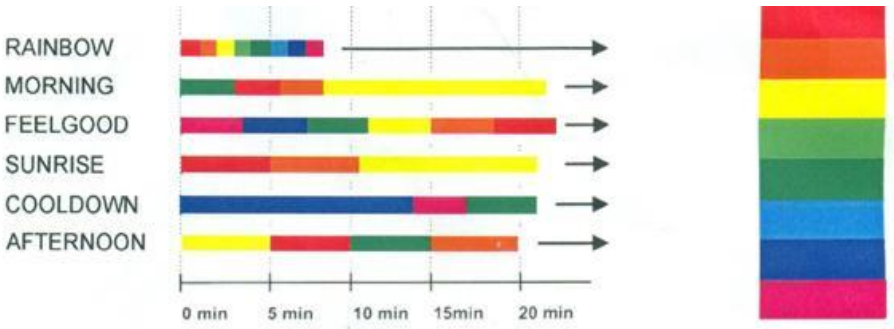
Преди няколко години фирма „Хардсофтдизайн” разработи контролер RGB IRED / SWITCH CONTROLER C06 [4]. Целта му е да може да управлява RGB светлодиоди монтирани в различни по вид осветители, показан на фиг.6.



Фиг.6.

В контролера са зададени 7 динамични програми (фиг.7). Първата програма е обща, като при нея плавно се преминава през почти всички цветове. С бутон за управление може да се фиксира стационарно произволно избран цвят за неопределено време. Останалите 6 програми работят в режими, показани на фиг.7.

Видовете програми, точните цветове в тях, продължителността им на светене в съответната програма, както и продължителността на работа на всяка програма са точно определени, въз основа на изследвания, проведени от специалисти в Берлинския институт по психология. Целта на всяка програма е да влияе благотворно върху определени психологически състояния на човешкия организъм. Точната употреба на всяка програма и броя на повторенията и при съответния сеанс, се определят от лекар специалист.

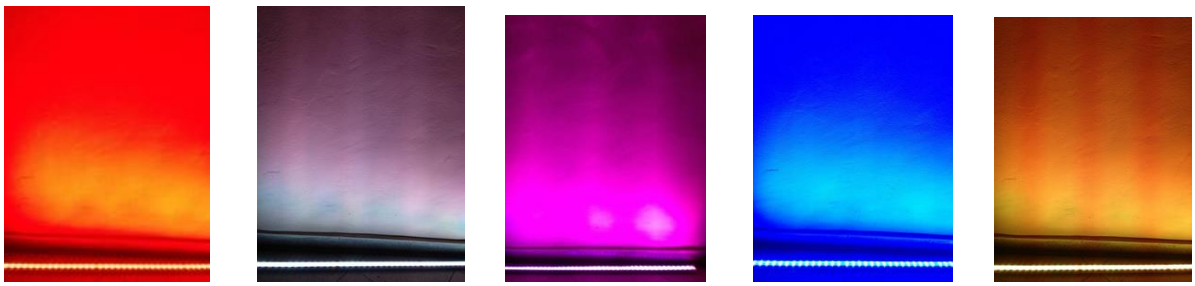


Фиг.7.

Осветителните тела, възпроизвеждащи програмите, могат да бъдат произведени в размер и визия според различните изисквания за употреба и монтаж от съответния лекар или ползвател.

Демонстрационният модел на контролер в комплект с линеен осветител е предназначен за направата на светлинни стени или така наречения „wall-wash" ефект. Светлодиодите са монтирани в алуминиев профил с дължина 1метър. Профилът е екструдиран така, че за капак пред светлодиодите да може да се монтира микропризматичен дифузор. Самите светлодиоди са монтирани на платки от текстолит(3 броя), на всяка от които има 35броя LED светлодиода. За захранване се използва адаптор или трансформатор, работещ на 220V-AC/12V-DC. Мощността му се определя в зависимост от конфигурацията, която ще бъде изградена в съответния медицински център.

Основните цветове, които се използват в различните програми са син, зелен, червен, жълт и оранжев, но има и специфични цветове като нюанс на лилав и розов цвят и др. На фиг.8 са показани някои от специфичните цветове, предназначени за видовете терапия.



Фиг.8.

При употребата на този вид светлинна терапия, силата на облъчване със различна по цвят светлина не е от значение. Благотворният ефект се постига чрез влиянието на различните цветове върху психофизиологическото състояние на организма на човека.

Приложението на уреда(контролер в комплект с осветител или система от осветители) практически дава възможност за лечение на различни по естество и вид физиологически и психологически заболявания. Може да бъде употребяван както с лечебна, така и с естетическа цел.

При специфични изисквания, заложените програми могат да бъдат коригирани по вид, редуцирани по брой или допълнени с нови, с цел максимално точно използване на цветотерапията при конкретните случаи.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При точна диагностика на конкретно заболяване, лечението със светлина би могло да бъде изключителен помощник на съвременната медицина.
В настояще с бурното навлизане на светлодиодните технологии, възможностите на светлинна терапия се увеличават многократно. Поради факта, че светлодиодите практически ни дават възможност за постигане на неограничен брой цветове, в съчетание с увеличения им светлодобив и възможностите на съвременните системи за управлението им , се очаква в близко бъдеще светлинната терапия да играе все по-съществена роля при лечението и профилактиката на редица заболявания. Съвместната работа на лекари специалисти, научни медицински центрове, съвместно с инженери в областта на светлотехниката, би довело до откриване на нови възможности за прилагане на лечение със светлина.

Направата на светлотерапевтични уреди, както за професионална употреба, така и за домашна употреба, ще намира все по-широко приложение. Минималните размери на светлодиодите като източник на светлина, дават възможност на производителите, да създават компактни и с големи функционални възможности уреди за светлолечение, които да бъдат удобни, ергономични и лесно преносими.

Не на последно място, не бива да се забравя, че неправилната и несъгласувана с лекар специалист употреба на уреди за светлинна терапия, и така наречената „самолечение", би могло да окаже отрицателно влияние върху човешкия организъм, което от своя страна да усложни или възпрепятства лечението на съответното заболяване.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Иванов З. А., Гълъбов Б., ***Въздействие на светлината върху човешкия организъм,*** IV Научна конференция "ЕФ 2012", 28 - 30. IX 2012, Созопол

[2] Henri Juslen., ***Dynamic Lighting and human performance***, Philips Lighting

[3] Иванов З.А., ***Универсална светлотехническа уредба за изследване показателите на осветлението*** , X национална конференция с международно участие , " ОСВЕТЛЕНИЕ '96 ", 9-11 октомври 1996 г., МДУ"Ф.Ж.Кюри"- Варна, стр. 48.

[4] Димитров Димитър, фирма „Хардсофтдизайн", производител на RGB IRED / SWITCH CONTROLER C06.

Автори: Захари Иванов, доц. д-р, катедра ЕСЕО, Електротехнически факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*, Владимир Шаламанов, маг. инж., фирма „Алфа лайт", E-mail address: *alphalight@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Николай Василев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧНОТО ВЪЗДЕЙСТВИЕ И ЕРГОНОМИЧНИТЕ И СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИ ПОКАЗАТЕЛИ НА ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ С НАТРИЕВИ ЛАМПИ ВИСОКО НАЛЯГАНЕ

Захари Иванов

Резюме: *Проведени са изследвания за влиянието на натриеви лампи високо налягане и луминесцентни лампи върху показателите на осветителната уредба. Те са проведени в ергономичната уредба на НИИКЛ «Осветителна техника» в лаб. 3101А на ТУ София. Уредбата позволява в широк диапазон да се променят светлотехническите параметри, да се моделират различни системи на осветление и да се провеждат експериментални изследвания при изучаването на показателите на осветителната уредба.*
Ключови думи*: натриеви лампи високо налягане, ергономично осветление, осветителни уредби*

STUDY OF INFLUENCE PSYCHOPHYSIOLOGICAL AND ERGONOMIC AND LIGHTING INDEXES OF LIGHTING SYSTEMS WITH HIGH PRESSURE SODIUM LAMPS

Zahari Ivanov

Abstract: *Studies were conducted on the influence of high pressure sodium lamps and fluorescent lamps on the performance of the lighting system. They were carried in ergonomic system of NIIKL "Lighting" in the lab. 3101 Technical University of Sofia. The arrangement allows a wide range to change photometric parameters model different systems of lighting and be carried experimental research on the study of the performance of the lighting system.*
Keywords: *high pressure sodium lamps, ergonomic lighting, lighting systems*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Натриевите лампи високо налягане са намерили широко приложение в уличното осветление, осветление на спортни площадки и зали, фасади на сгради, паметници, осветление на леярни цехове, складови помещения, на метало- и дървообработващи цехове, корабостроителни предприятия, цехове от химическата промишленост и др..

Енергийната и икономическата им ефективност се определя от високия светлинен добив (60-140 lm/W), дългия живот.(15000-40000 ч.) и стабилността на светлинния поток (Фо/Фк=0,8÷0,9). Проблемите при приложението на НЛВН в осветителните уредби се дължат най-вече на техния неблагоприятен спектър

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

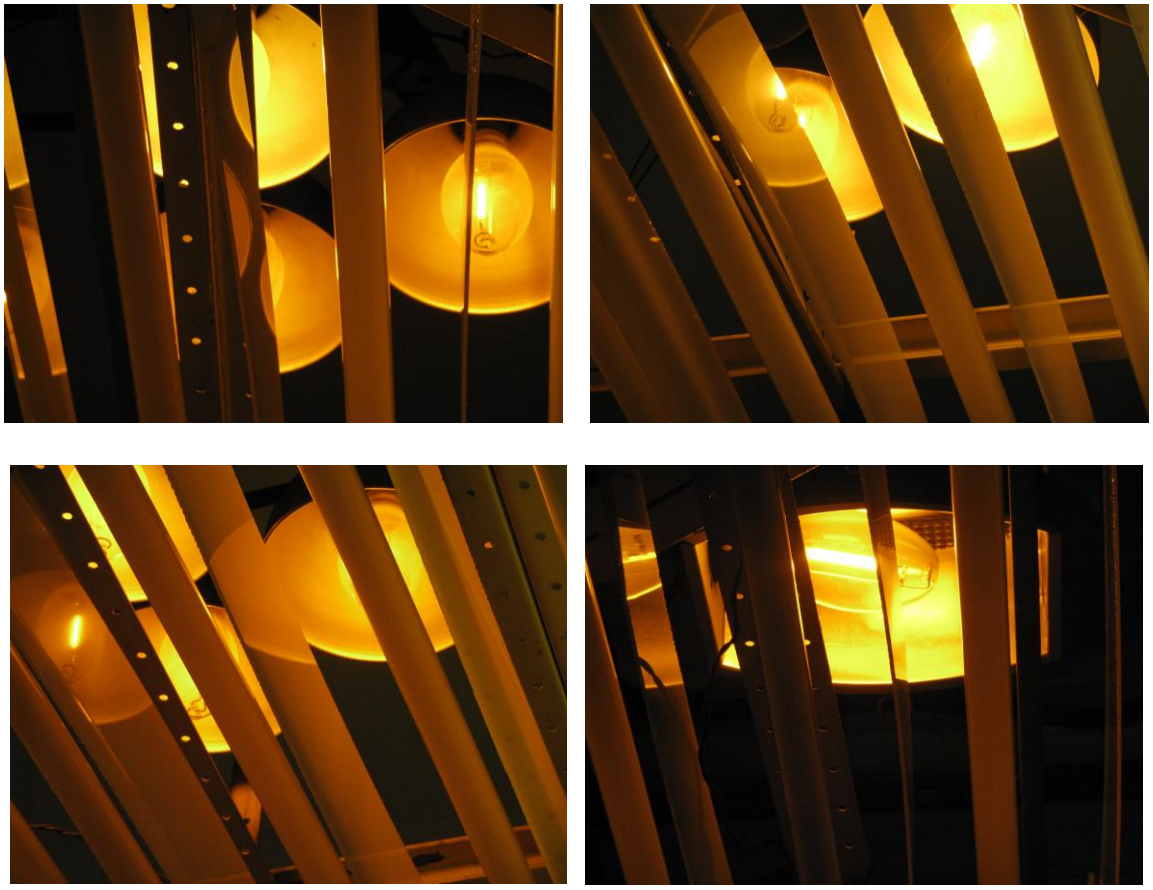
ISSN 1311-0829

(Тцв = 2100 К), лошото цветопредаване (Ra=23÷25) и големите пулсации на светлинния поток (Кпи =80÷90%).

Препоръките на Международната комисия по осветление за икономия на електрическа енергия, без влошаване на качеството на осветлението, изисква прецизиране на областта на приложение на НЛВН с едно по-точно отчитане на техните санитарно- хигиенни характеристики.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧНОТО ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ С НАТРИЕВИ ЛАМПИ ВИСОКО НАЛЯГАНЕ

За изучаване на психофизиологичното въздействие на осветителните уредби с НЛВН в Технически университет - София е изградена специална експериментална осветителна уредба - помещение с размери 6,5 x 4,75 x 3,5m [2]. Таванът и стените са светли, а на прозорците са поставени завеси. Всички повърхнини са оцветени в сиво бежов цвят (ρ≈0,5). Осветителите за натриеви лампи с високо налягане и луминесцентни лампи са разпределени равномерно на подвижна метална конструкция, което дава възможност за промяна на височината на помещението (3,7÷2,5м). Конструкцията позволява моделиране на осветителна уредба, както с директна, така и с индиректна светлина.



Фиг.1. Разположение на осветителите с натриевите лампи с високо налягане върху подвижната метална конструкция.

Ексериментът се проведе с луминесцентни лампи и натриеви лампи високо налягане, като не се използват химикали, процедури и оборудване, които имат

някакви необичайни опасности, свързани със здравето на хората. Участваха по собствено желание дипломанти и стажанти от електротехническия факултет на ТУ София, средно от 6 до 10 лица от двата пола, на възраст от 20÷30 години с нормално зрение.

Заслепяването и дискомфортът са сведени до минимум, т.е. практически те се забелязват. Благодарение на трифазното захранване пулсациите на светлинния поток са също минимални.

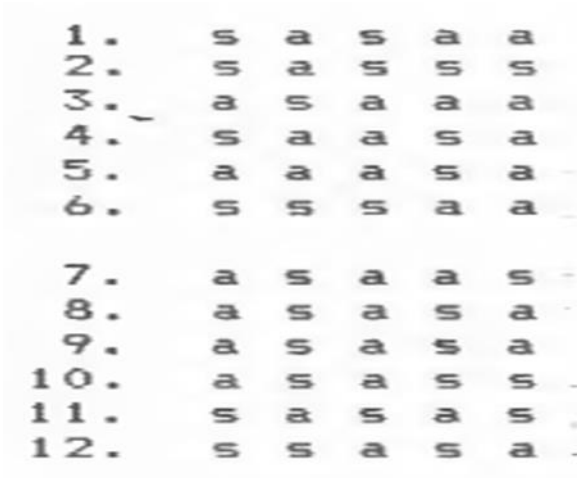
Моделирани бяха зрителни задачи с висока точност при административни и производствени помещения.

Изследванията са проведени при осветености върху работната повърхност от 100 до 1000 lx.

За оценка на психофизиологичното въздействие на моделираните осветителни уредби бяха изследвани:

- Зрителните характеристики: зрителна работоспособност, контрастна чувствителност, разделителна способност, акомодация;
- Физиологични функции: пулс, кръвно налягане, евокирани потенциали, стрес;
- Психични характеристики: настроение, самочувствие, яркостен и цветови комфорт;
- Психофизиологични характеристики: умора, активност, цветопредаване, субективна оценка на осветеността.

За експериментите бяха подготвени специални зрителни задачи: буквени, цифрови, ландолтови пръстени, тестове за цветове, за зрителна умора, работа с шублер и др.



Фиг.2. Тест за акомодация и конвергенция
(визуално подобие на буквите “a” и “s”)

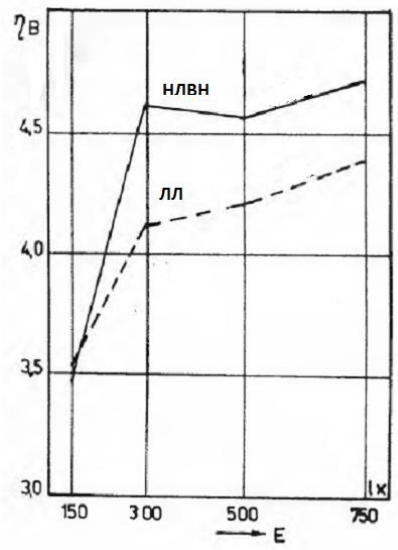
Фиг.3. Тест за изследване сложността на зрителната задача от формата на обекта

Експериментите бяха проведени по два начина:

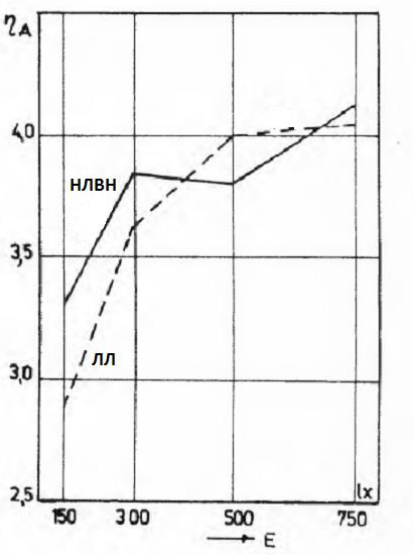
- изследваните лица работеха в продължение на 6 часа при зададени светлинни условия (ниво на осветеност, равномерност, коефициент на пулсации, спектър на светлината). Контролните тестове се задаваха в началото, средата и края на работния ден.

-експресни изследвания, при които на изследваните лица бяха давани различни анкетни тестове в продължение на два часа при зададена светлинна ситуация.

В междинното време изследваните лица бяха заети с писмена работа и четене.

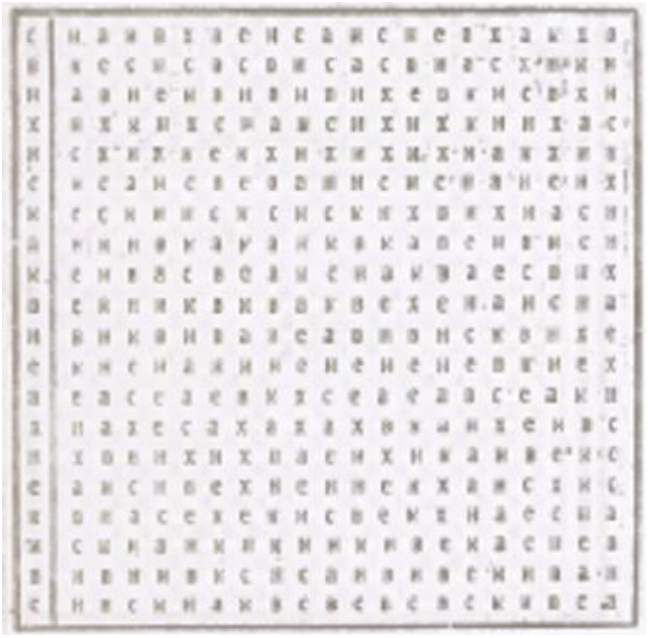


Фиг.4.



Фиг.5.

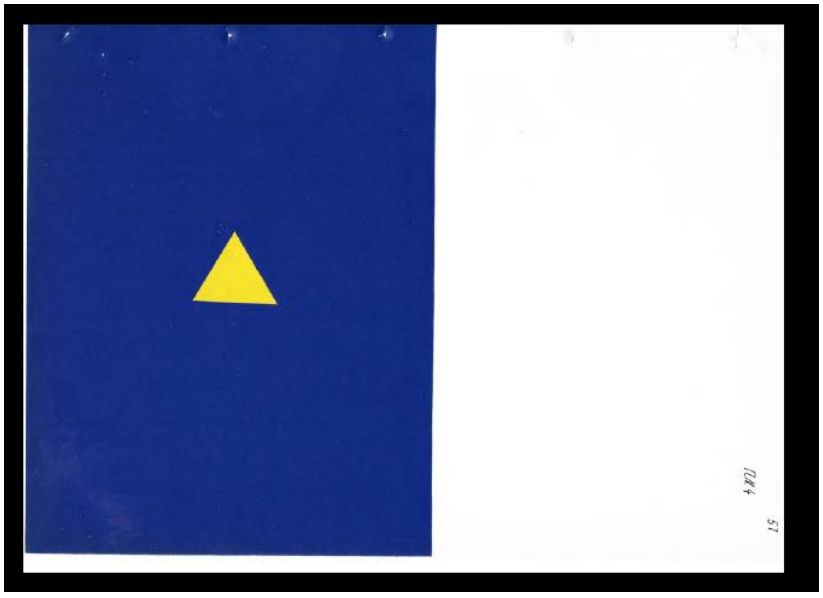
Зависимост на **ή** при работа с буквен тест (**ήB**) и с тест за акомодация (**ήA**).



Фиг.6. Тест за изследване на зрителна работоспособност

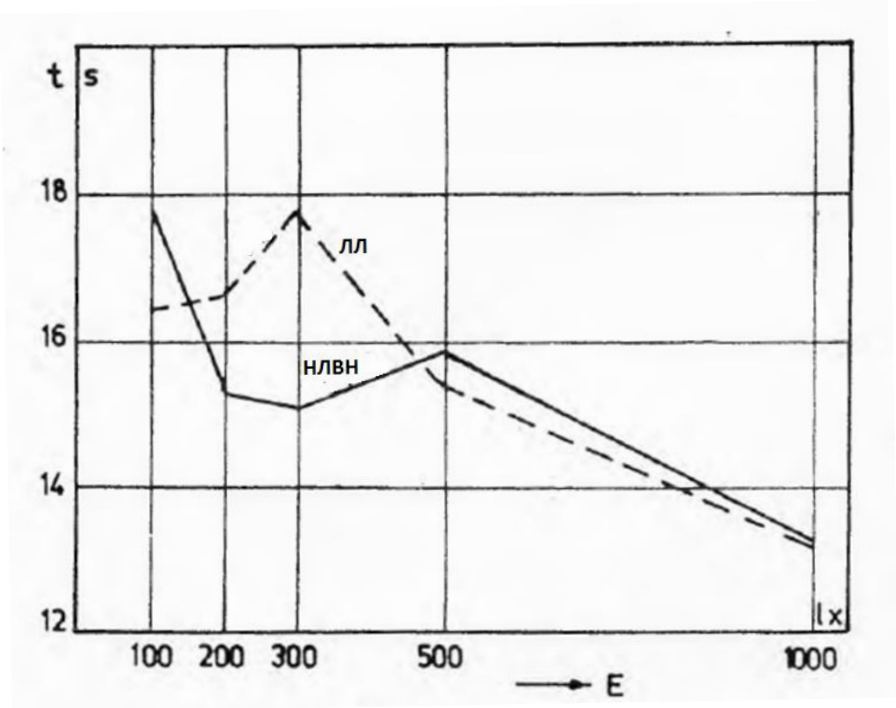
Поради силно противоречивите резултати от експресните изследвания, те не се коментират в настоящия доклад. Част от резултатите от сравнителните изслед-

вания, проведени в НЛВН (Ra≈23 и Тцв≈2100К) или с луминесцентни лампи със студено бяла светлина (ЛЛ, Ra≈65, Тцв≈4300К), са илюстрирани на фиг.4-фиг.13.



Фиг.7. Тест за изследване на отрицателен последователен контраст.

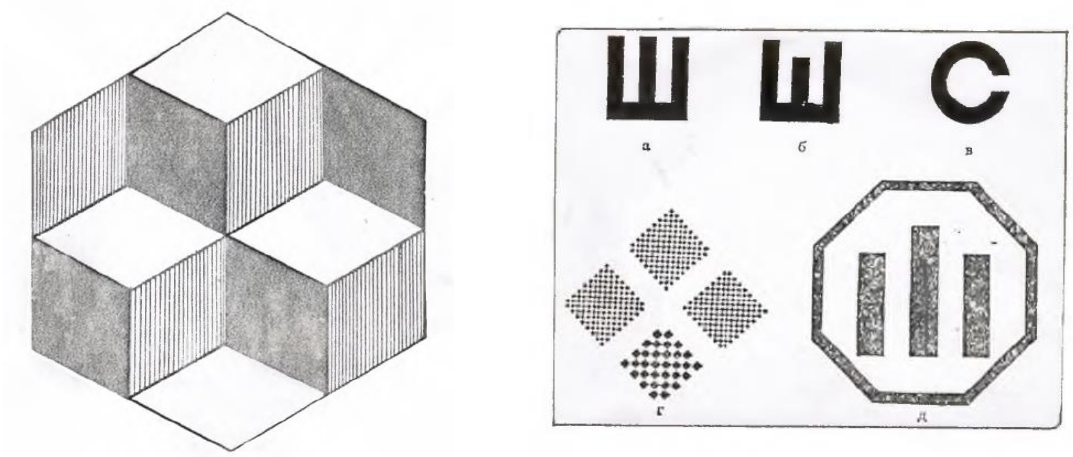
На фиг.4 и фиг.5 е показана зависимостта на зрителната работоспособност от осветеността при работа с буквен тест (ήВ) и с тест за акомодация(ήА). Продължителността на отрицателния последователен контраст (фиг.7) , която дава възможност да се съди за зрителната умора за различните варианти е илюстрирана на фиг.8.



Фиг.8. Зрителната умора.

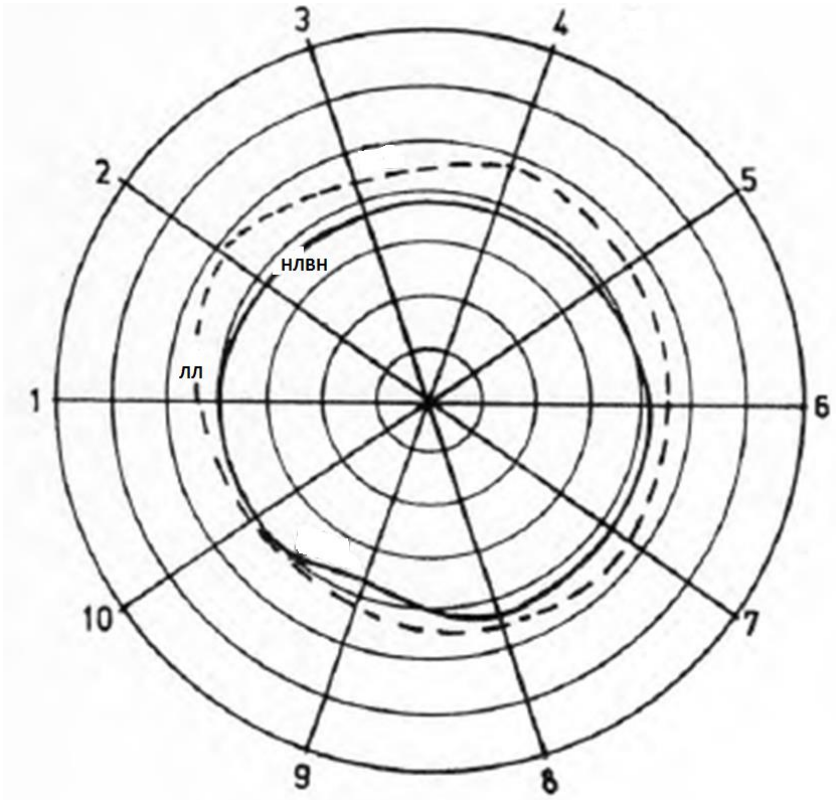
На фиг.10 е дадена графична интерпретация на настроението в края на работния ден при осветителни уредби с ЛЛ и осветеност 500 lx. Подобни зависимости бяха получени и при другите нива на осветеност.

Представените зависимости се отнасят за края на работния ден. За характеризиране на психологичното въздействие на осветителните уредби бяха изследвани настроението, самочувствието активността.

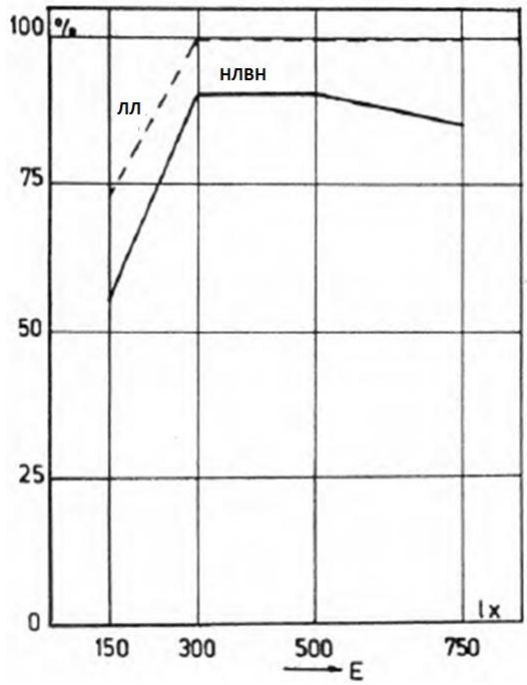


***а*)** **(*б*)**

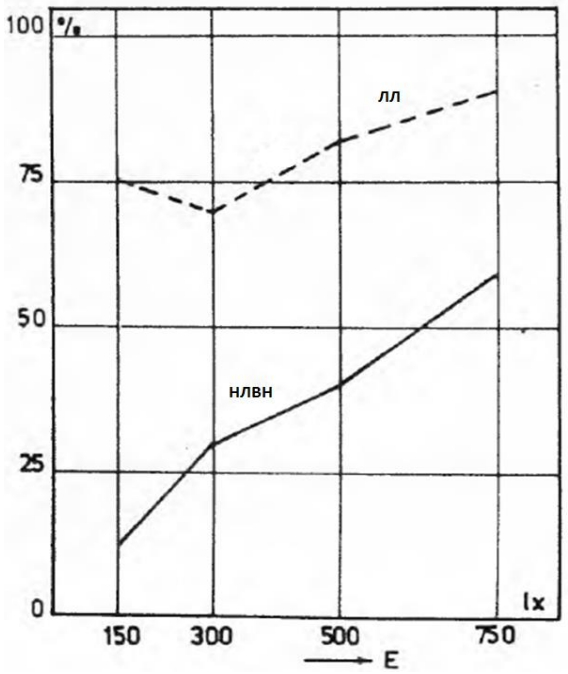
Фиг.9. ***а*)** Тест за изследване на зрителна умора**; *б*)** Тест за изследване на зрителна острота, посредством различни зрителни знаци (оптотипи).



Фиг.10. Диаграма на настроението
(1- с приятни чувства; 2- в добро настроение; 3- с добър дух; 4- обнадежден; 5- радостен; 6- оптимистичен; 7- спокоен; 8 пълен със сили; 9 - доволен 10- ентусиазиран).

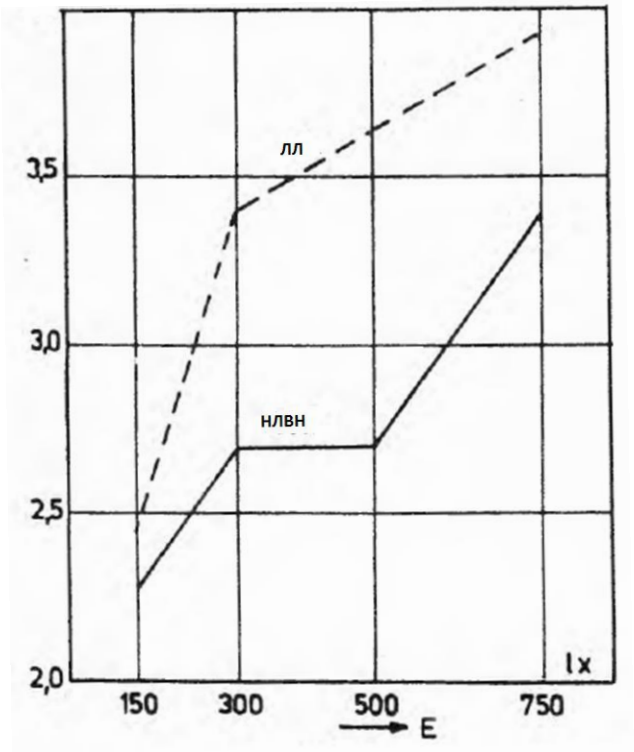


Фиг.11.



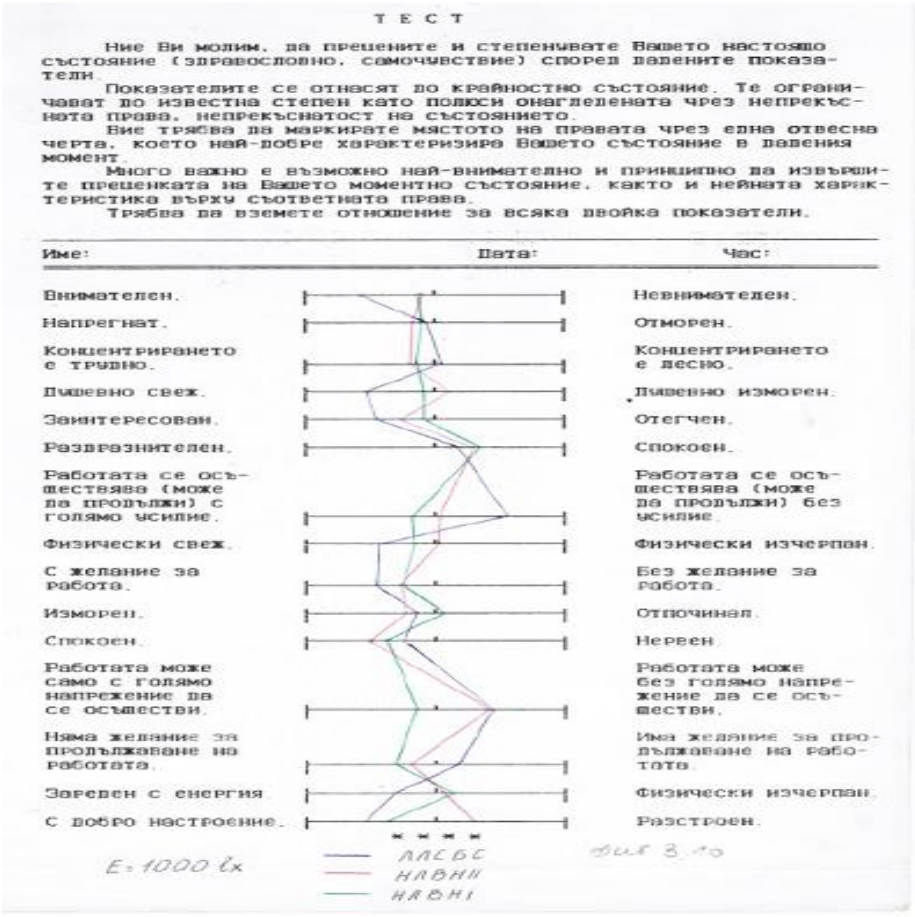
Фиг.12.

На фиг.11 е представена оценката за добро качество на осветлението за различните варианти. Оценката за възприятието на цвета на кожата, като естествен е показан на фиг.12. Голямото различие за двата светлинни източника очевидно се определя от спектралния състав на светлината им.



Фиг.13.

На фиг.13 са представени графично дадените оценки при експериментите. Във всички изследвани случаи анкетираните лица оценяват реализираните с НЛВН нива на осветеност като по-ниски от същите, постигнати с луминесцентните лампи с ниско налягане.



Фиг.14. Тест за изследване на психологическото състояние на участника: активност, самочувствие и настроение.

Определен интерес представлява субективното възприетата на нивото .на осветеност. За целта бе използвана пет степенна. скала за оценяване на осветеността на работното място: 1 -твърде тъмно; 2 - задоволително; 3 - добро; 4 - много добро; 5- твърде светло.

За да се оцени количествено разликата в субективната оценка на нивото на осветеността при двата вида светлинни източници, беше използвана специална експериментална уредба. Тя се състои от две камери (кутии) с размери 0,5 x 0,5 x 0,6 m, разположени една до друга. Първата е осветена с ЛЛ, а втората с НЛВН. Изследваното лице стои на 0,5 m пред двете камери. Осветеността в камерата се задава предварително и по време на експеримента е постоянна. Наблюдателят регулира осветеността в камерата с ЛЛ, докато добие впечатление, че двете осветености са еднакви. За всяка опитна ситуация се правят по 20 измервания. В експеримента участваха над 20 лица, като яркостта в камерата с НЛВН се регулираше от 5 до 120 cd/m^2. Практически във всички случаи нивото на осветеността в камерата с НЛВН е оценявано по-ниско, средно с 23%. При повишаване на яркостта, разликата между субективните оценки на осветеността е намалявала.

Благодаря на проф. д-р инж. Николай Василев за осигурените средства и методични указания за изграждане и изследвания в ергономичната експериментална осветителна уредба.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Анализът на резултатите от изследванията в лабораторни и реални условия дава основание да се направят следните по-важни изводи:
- Зрителната работоспособност при НЛВН се влияе значително от нивото на осветеност. Достигането на зрителен комфорт е възможно при осветеност по-голяма от 300 lx;
- Физиологичните функции: кръвно налягане и пулс, не се влияят, съществено от вида на светлинния източник;
- За зрителни задачи, при които зрителната способност се определя, от остротата на зрението, НЛВН имат определено преимущество;
- Психофизиологичното въздействие на осветлението с НЛВН е по-неблагоприятно от осветлението с луминесцентни лампи;
- Изхождайки от високите икономически показатели на НЛВН, целесъобразно е да се препоръчат за използване в осветителни уредби, в които не се изисква висок индекс на цветопредаване. При това, за реализиране на високоефективни осветителни уредби с НЛВН, трябва да се отчитат както изискванията по отношение на цветопредаването, така и спрямо отразения блясък, заслепяването, пулсациите на осветеността, моделиращия ефект и др., в съответствие с изпълняваната зрителна задача и цветовото оформление на помещението [4].

ЛИТЕРАТУРА

[1] N. Wassilev - Z.Iwanow - G.Dikanarow - BG, D.Gall R.Schnor- DDR, ***"Investigation of the psycho-physiological influence of interior lighting with high pressure sodium lamps"***,Sixth European Lighting Congress, Budapest, 3 - 5 X 1989, Papers 1, p. 68-75.

[2] Иванов З.А., ***Универсална светлотехническа уредба за изследване показателите на осветлението*** , X национална конференция с международно участие , " ОСВЕТЛЕНИЕ '96 ", 9-11 октомври 1996 г., МДУ"Ф. Ж. Кюри"-Варна, стр. 48

[3] Иванов З., ***Осветителна и инсталационна техника***, Авангард Прима, София, 2010

[4] Василев Н. И., Пачаманов А. С., Иванов З. А., ***Ергономични, енергийни, икономични и екологични аспекти на промишленото осветление***, семинар "Промишленото осветление в условията на приватизация", FEMORET-Черноморски регион, Пловдив, 29.10.1998, стр. 1-18

Автор: Захари Иванов, доц. д-р, катедра ЕСЕО, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Христо Василев

ТРИМЕРЕН ТОПЛИНЕН МОДЕЛ НА ДВУСКОРОСТЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Пламен Ризов, Самуил Александров

Резюме: *В доклада е представен 3D модел, използван за компютърно моделиране на топлинното поле в двускоростен асинхронен електродвигател за напрежение 6 kV при номинално натоварване. Моделът използва метода на крайни елементи за решаване на уравненията, описващи топлинните процеси. Източниците на загряване на електродвигателя са загубите в намотките и загубите в стоманата. Топлинното поле на двигателя при номинално натоварване се разглежда като за стационарно. В каналите на статора са разположени активните страни на две отделни трифазни намотки с различен брой полюси. От решението на топлинната задача са определени зоните с максимално локално загряване на изолацията едновременно и на двете намотки, без значение от това, коя от тях е захранена с напрежение в разглеждания момент от време. Направени са изследвания за работа на двигателя при двете скорости, при които броят на полюсите е съответно 2p=12 и 2p=16.*

Ключови думи: *метод на крайни елементи, двускоростен асинхронен двигател, топлинно поле, загуби в стоманата.*

3D THERMAL ANALYSIS OF DOUBLE SPEED INDUCTION MOTOR FOR MIDDLE VOLTAGE

Plamen Rizov, Samuil Aleksandrov

Abstract: *The report presents developed 3D model, used for modeling of thermal field in double speed induction motor for 6kV nominal voltage at rated load. The model uses the Finite Element Method (FEM) for solving the equations, which describe the thermal processes. The sources of heat in this 3D model of induction motor are the losses in windings and losses in the steel of the stator and the rotor pack. The thermal field of the motor at rated load is shown as a stationary field. In the grooves of the stator are placed active sides of the two separate triphase windings with a different number of poles. From the results of the thermal problem, areas with maximum localized heating of the insulation, simultaneously in both coils, have been designated, regardless of which of them is supplied with a voltage in the present moment of time. Researches are made when the motor is operating at both speeds, where the number of poles is respectively 2p=12 and 2p=16.*

Key words: *Finite Element Method (FEM), double speed induction motor, thermal model, magnetic losses.*

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В двускоростните асинхронни двигатели за напрежение 6 kV се използват две напълно независими една от друга трифазни еднослойни статорни намотки с различен брой полюси. Активните страни на намотките са разположени в едни и същи статорни канали – в горен и долен слой. Последователно в горния слой на статорните канали се редуват активните страни на намотките за по-висока и по-ниска скорост. По този начин се осигурява симетрично разполагане на секциите на намотките в каналите. Всяка от тях е свързана в звезда и има свои изводи в клемната кутия на двигателя. Преминаването от едната скорост към другата се извършва чрез външно превключване на захранването от едната намотка към другата.

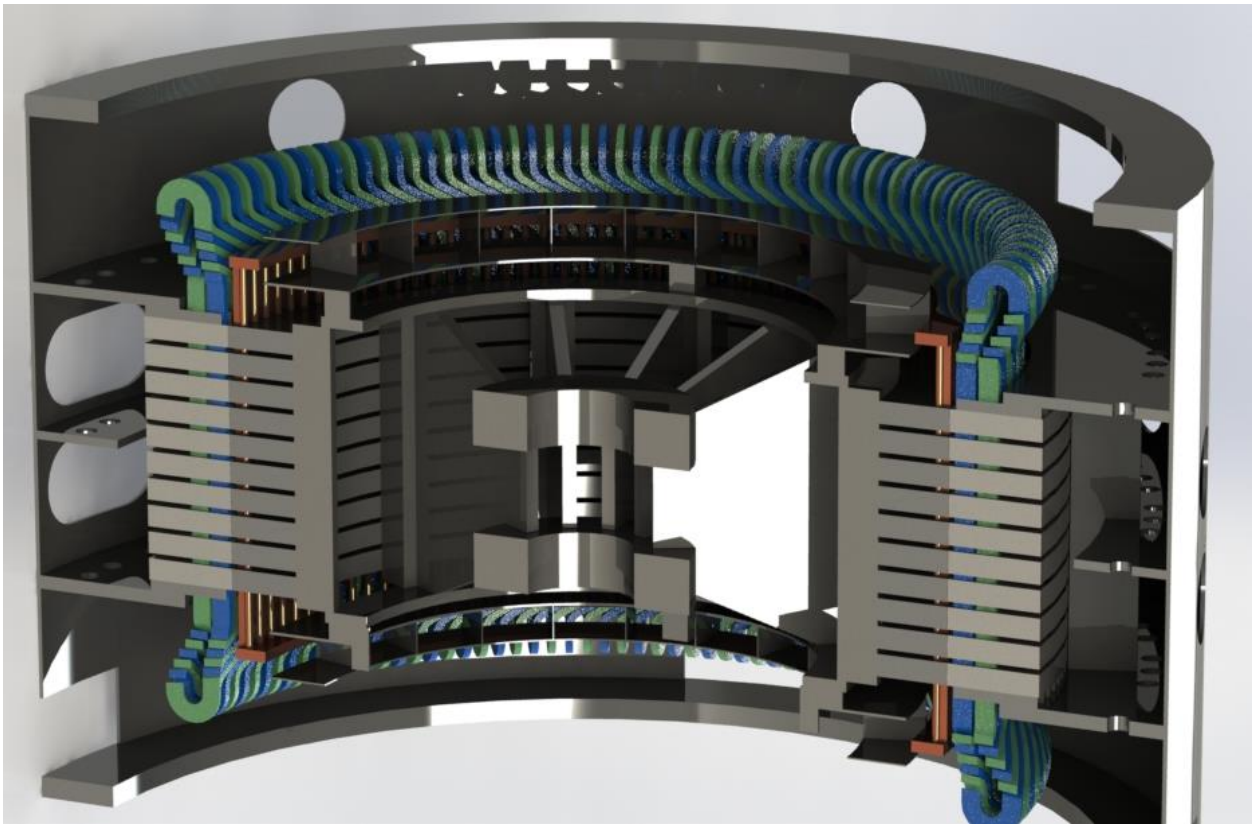
Обектът на изследване в настоящата статия е двускоростен асинхронен двигател тип ВДА 173/49-12-16К показан на фиг.1 с основни характеристики и данни показани в табл.1.

Таблица 1

брой полюси		2p=12	2p=16
номинална мощност	kW	800	400
номинално напрежение	kV	6	6
номинален ток	A	100	60
пусков ток	A	500	310
коефициент на полезно действие	%	92,2	90,7
cos φ	-	0,83	0,71
въздушна междина	mm	2	2
аксиална дължина	mm	495	495
външен диаметър на статора	mm	1790	1790
вътрешен диаметър на статора	mm	1300	1300
височина на статорен канал	mm	89,4	89,4
широчина на статорен канал	mm	12,4	12,8
външен диаметър на ротора	mm	1296	1296
номинални обороти	-	494	371
брой на статорните канали	-	144	144
Електрически загуби в статорна намотка	kW	31,97	13,9
Електрически загуби в роторна намотка	kW	6,47	5,9
Загуби в статорен магнитопровод		6,47	5,9
клас на изолационна система - преди подмяна на статорните намотки - след подмяна на статорните намотки	-	B F	B F
охладителна система	-	Въздушно аксиално-радиална	

При работа на едната намотка, отделените в нея електрически загуби загряват освен собствената изолация и изолацията на другата намотка, в която в същия момент от време не се генерират електрически загуби. Двигателите от този вид се използват за задвижване на помпени или вентилаторни агрегати, които обик-

новено работят при тежки експлоатационни условия - висока температура и влажност на работната среда. Едновременното въздействие на горепосочените фактори, съчетано със загряването на изолацията на намотките ускоряват процеса на стареене на изолационната система както на работещата, така и на неработещата намотка.



Фиг.1. Конструктивни особености на двускоростен асинхронен двигател представени в 3D

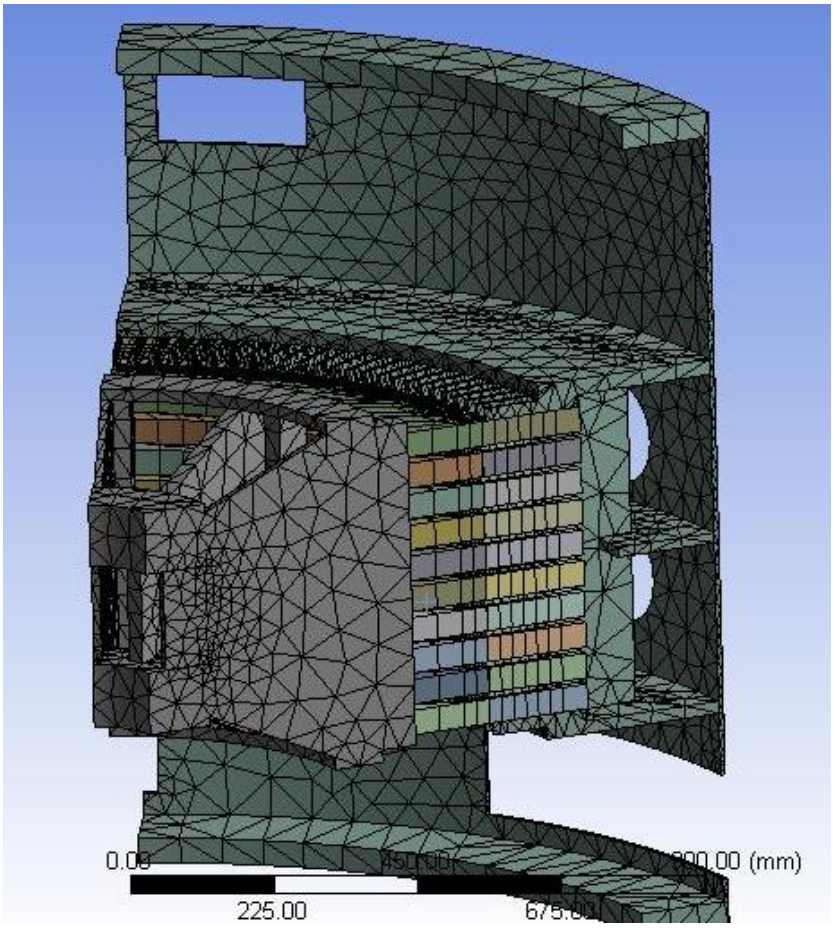
Целта на разработения 3D модел за топлинен анализ и проведените с него изследвания, представени в настоящата статия е определяне на локално най-загретите зони в изолацията в активната части на статорните намотки, с отчитане на генерираните загуби в работещата намотка, в стоманата на статорния магнитопровод и дебита на охлаждащия въздух при двете скорости.

След дългогодишна експлоатация на тези двигатели се достигна до влошаване на физическото състояние на изолацията на статорните намотки и намаляване на изолационното им съпротивление. Тези обстоятелства налагат извършване на подмяна на съществуващите статорни намотки, които са с клас B на изолационната си система, с нови изолации клас F, изработени по VPI технология. Новата изолационна система осигурява по-висока устойчивост срещу въздействие на влага и температура [3]. В използваните преди години изолационни системи, каналната изолация е с по-голяма дебелина – от порядъка на 3-4 мм, докато при новият тип е от порядъка на 2.1 до 2.3 мм. Намаленият обем на изолацията в статорния канал се компенсира с увеличаване на сечението на статорния проводник. Каналната изолация по отношение на топлинния поток се явява преграда, която затруднява изнасянето на отделената топлинна енергия в на-

мотките на двигателя към заобикалящата я среда – стоманата на магнитопроводите или въздуха във вътрешността на двигателя.

2. МОДЕЛ ЗА 3D ТОПЛИНЕН АНАЛИЗ

Моделът за 3D топлинен анализ е изграден в средата на софтуерния продукт ANSYS [4] и включва обемен сегмент от активната част на двигателя, съответстващ на един чифт полюси на двискоростния асинхронен двигател. При статорната намотка с 2p = 6 това е сектор със 60 градуса в радиално направление, при 2p = 16 - 45 градуса. Източниците на топлинна енергия са моделирани посредством електрическите загуби в статорната и роторна намотки; загубите в стоманата на статорния магнитопровод. За тяхното определяне е разработена собствена програма за проверочни изчисления на двускоростни асинхронни двигатели.



Фиг.2. 3D мрежа за пространствена дискретизация на сектор отговарящ на един чифт полюси при 2p=12

В реалната конструкция на двигателите съществуват радиални вентилационни канали както в статора, така и в ротора. Между роторни ярем и вала е разположено роторнто колело – показано на фиг.3, което се състои от главина за монтиране върху вала, роторни спици – играещи ролята на вентилаторни перки и основа върху която се монтира роторния пакет.

Тази конструкция на двигателя определя и вида на използваната вентилация – аксиално-радиална. Охлаждащият въздух се засмуква от пространството, нами-

ращо се под двигателя и се насочва в аксиална посока, в активната частта през аксиалните канали на работното колело. Оттам през радиалните канали на статора и ротора охлаждащия въздух се насочва в радиално направление към външността на двигателя.

За тази цел между статорния пакет и тялото на двигателя са предвидени съответните пространства, а върху статорното тяло са предвидени съответните отвори. Всички тези конструктивни особености са отразени в модел с цел точно моделиране на вентилационната система. Това от своя страна вдига обема на възлите на генерираната мрежа, показана на фиг.2. В нея са използвани четиристенни пирамиди с възможно най-малък брой възли, чрез което се цели минимизиране на броя на неизвестните [1,2]. Предаването на топлинната енергия към охлаждащия въздух се извършва в по-голяма степен чрез конвекция и в помалка част чрез лъчение и топлопредаване. Поради това охлаждането на активната част ще зависи в най-голяма степен от скоростта, с която ще работи двигателя. При по-високата скорост, обема на въздуха които обдухва секциите на статорните намотки е по-голям и те ще се охлаждат по-интензивно – т.е. топлоотдаването чрез конвекция ще е по-голямо. В моделът този факт е отразен чрез коефициентът на конвекция.

2. ОСОБЕНОСТИ НА МЕТОДА ЗА 3D МОДЕЛИРАНЕ НА ТОПЛИННОТО ПОЛЕ

За определяне на разпределението на топлинното поле в активната част на двускоростния електродвигател е приложен числен модел, използващ метода на крайните елементи. Топлинното поле е прието за стационарно, тъй като проведените изследвания се отнасят за установени режими на работа на електродвигателя при номинално натоварване за всяка скорост. В модела е заложена реалната температура на околната среда, в която работи двигателя. Тя е получена от многократни измервания, провеждани в период на 10 години, като е използвана стойността за най-тежкия температурен режим - 41 °C.

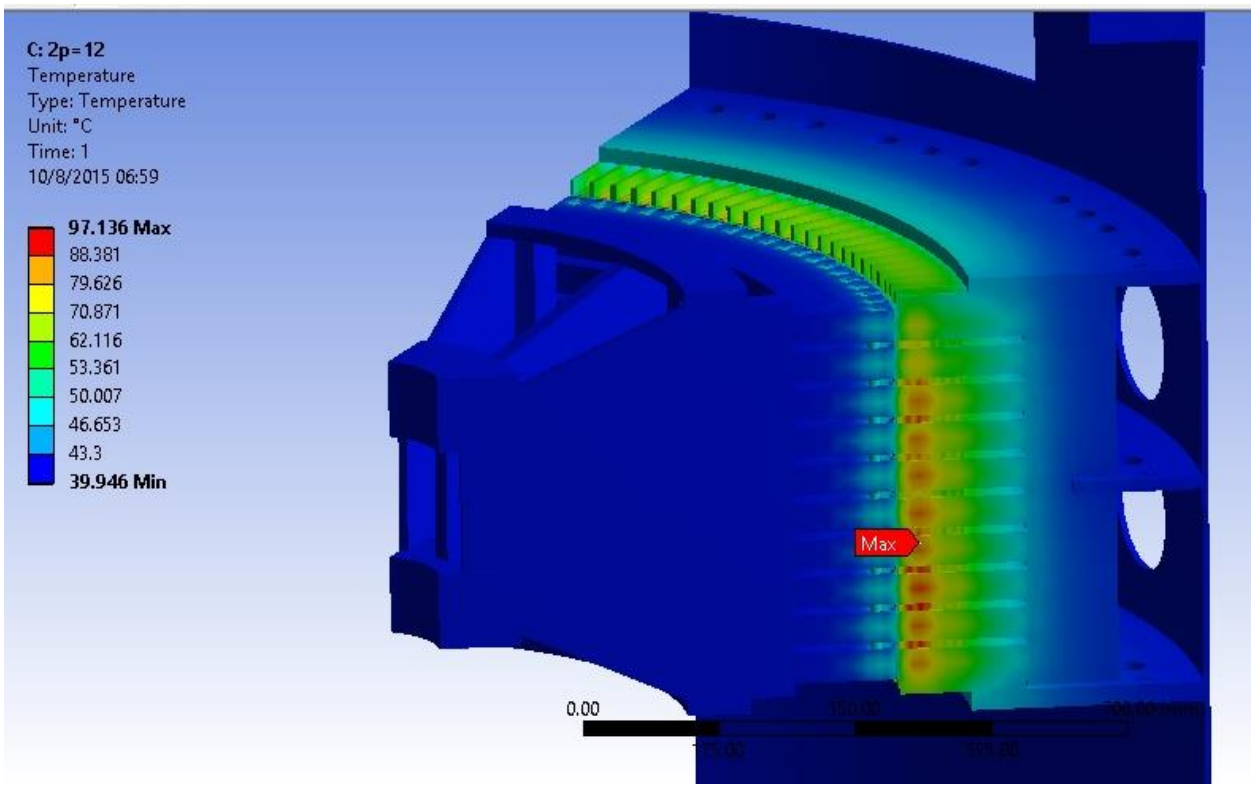
За всяка от скоростите, с които работи двигателя са разработени съответните модели в режим на номинално натоварване. Електродвигателят работи почти винаги при по-високата скорост, където електрическите загуби в работещата статорна намотка и роторната намотка са по-големи. В същото време и скоростта на охлаждащия въздух също е по-голяма, т.е. охлаждането на намотките е по-интензивно.

Радиалните граници на моделите са избрани по-такъв начин, че те да минават през материални среди, които имат идентични топлинни характеристики.

В моделите не са включени челните части на намотките, тъй като тяхната конфигурация е доста сложна. Това от своя страна изисква използването на голям брой възли за доброто им омрежаване. Увеличаването на броя на неизвестните правят топлината задача нерешима с наличната изчислителна техника.

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

На фиг.3 е показано разпределението на температурното поле в активната част на двигателя при 2p=12. На фиг.4 е показано разпределението на температурата в обема на двигателя при 2p=16.

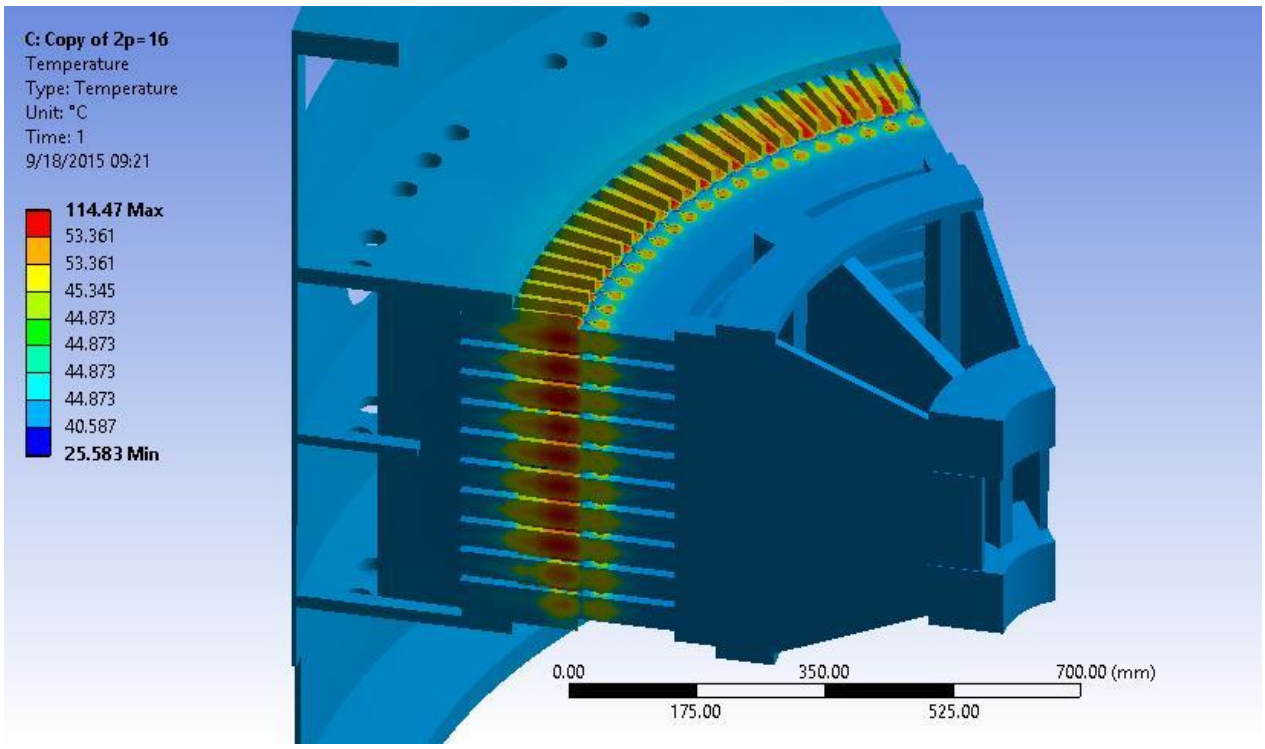


Фиг.3. Разпределение на температурното поле в електродвигател при 2p=12

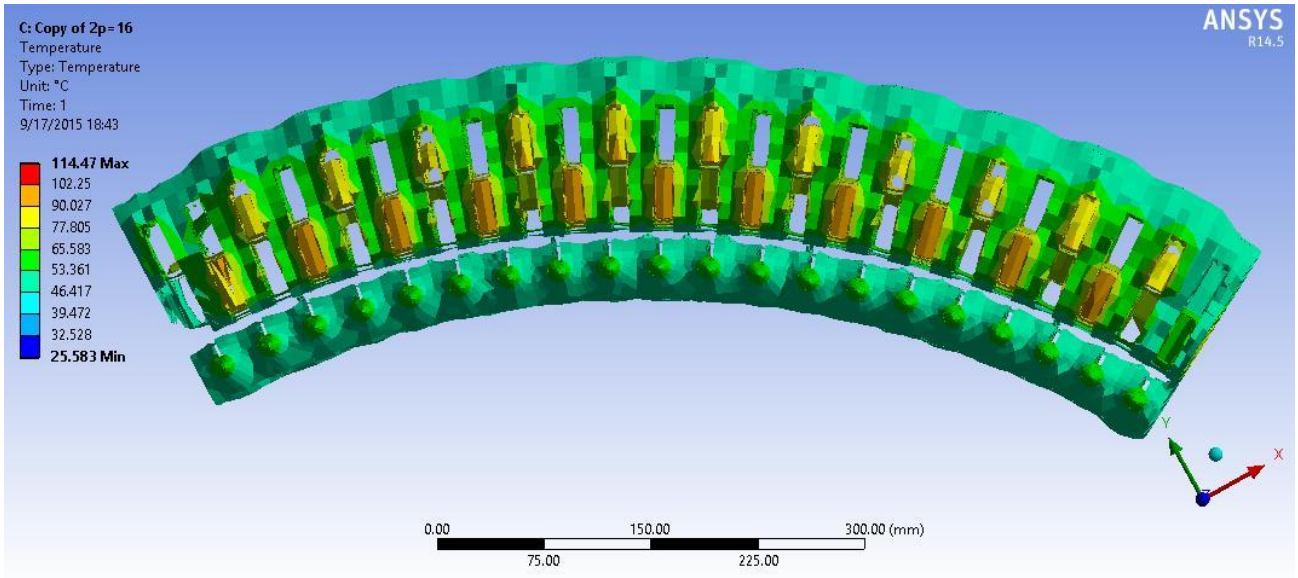
Резултатите показват, че температурата в най загретите части е в допустимите граници за класа на изолацията F. От фиг.3 се вижда, че при 2p=12 най- високо е загряването на проводника на работещата статорна намотка – от порядъка на 85 градуса; на изолацията на двете намотки, както и на проводника на неработещата намотка – от порядъка на 79-80 градуса.

От фиг.4 се вижда че при 2p=16 загряването на аналогичните елементи е малко по-високо, но е от същия порядък. Това се дължи на факта, че охлаждането на намотките не е толкова интензивно, поради по-ниската скорост. Най-малката и най-голямата стойност в цветовата скала са зададените долна и горна стойности на температурите за визуализация, които в действителност не се наблюдават в цветовата картина на разпределение на температурното поле.

На фиг.5 е показано разпределението на температурното поле в напречното сечение, което включва само статорната и роторната намотки. От резултатите се вижда, че роторната намотка в режим на номинално натоварване е незначително загрята, тъй като роторните пръчки са в директен контакт с стоманата на ротора и те директно отдават генерираната в тях топлинна енергия към стоманата.



Фиг.4. Разпределение на температурното поле в обема на двускоростния двигател при 2p=16



Фиг.5. Разпределение на температурата в напречно сечение на електродвигател с 2p = 16

4. АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1. От резултатите показни на фиг.3 и фиг.4 се вижда, че най-висока е температурата в изолацията на активните страни, разположени откъм въздушната междина и е в диапазона от 75 до 84°C при 2p = 16. Аналогично при 2p = 12 – температурата е 75-80°C, въпреки че загубите в статорната намотка са по-големи, но поради по-голямата скорост и вентилацията е по-интензивна. В същия температурен диапазон е работната температура откъм вътрешната зона на каналната изолацията на активните страни на секциите разположени в дъното на статорния канал.

2. От резултатите показани на фиг.3 и фиг.4 се вижда как основния топлинен поток, генериран в статорната намотка, се пренася към стоманата на статорния ярем през каналната изолация, разположена в дъното на статорния канал. В резултат на това, оставащата в проводниците топлина е по-малка и съответно температурата при която те работят, е по-ниска в сравнение с тази на изолацията на секциите разположени от към въздушната междина.
3. Получените резултати от топливния анализ показват, че загряването на изолацията на двете намотки не е равномерно, което способства са за различното стареене в отделните локални зони.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ANSYS Maxwell 3D Field Simulator v14 User's Guide

[2] V. Spasov, "Generation of quality tetrahedral meshes for the finite element method and multigrid method", Proceedings of the XV-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2007, 31 May - 1 June 2007, Plovdiv, Volume II, pp. 119-126

[3] Сотиров Д., П. Ризов, В. Филипов, В. Дойчев, Б. Крачев, Нови високо-ефективни изолационни системи за високоволтови електрически машини, Годишник на Технически Университет - София, том 59 книга 2, 2009, стр. 73 – 83

[4] Панайотов И., Д. Сотиров, Приложение на продукт ANSYS за решаване на задачи с МКЕ и приложението им в областта на въртящи се електрически машини, Годишник на Технически Университет - София, том 60 книга 2, 2010, стр. 283-290

Автори: Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*; Самуил Румен Александров инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, Email adress: *saaleksandrov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Валентин Матеев

ТРИМЕРЕН ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН АНАЛИЗ НА ДВУСКОРОСТЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Самуил Александров, Пламен Ризов

Резюме: *В доклада е представено разработването на 3D модел, базиран на метода на крайните елементи и използван за анализ на електромагнитното поле в двускоростен асинхронен електродвигател за напрежение 6 kV. Електромагнитното поле е разгледано като квазистационарно. За решаване на електромагнитната задача е използван модел, при който са използвани комплексните стойности на статорните токове при номинално натоварване, празен ход и късо съединение на двигателя. Роторните токове са моделирани като индуктирани токове в роторната намотка при номинално хлъзгане. От получените резултати за електромагнитното поле са изчислени силите действащи върху челните части на статорната намотка и породените от тях деформации на челните съединение*

Ключови думи: *метод на крайни елементи, двускоростен асинхронен двигател, електромагнитна сила, челни съединения.*

3D ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF DOUBLE SPEED INDUCTION MOTOR FOR MIDDLE VOLTAGE

Samuil Aleksandrov, Plamen Rizov

Abstract: *The report presents developed 3D model, based on Finite Element Method (FEM) and used for analysis of electromagnetic field in double speed induction motor for voltage of 6 kV. The electromagnetic field is accepted as quasi stationary. For solving the electromagnetic field is used model with complex values for stator currents at rated loading, at no load and at short circuit of the motor. The rotor currents are modeled as inducted currents in the rotor coil at rated slipping. From the acquired results for electromagnetic field, the forces which acts on the splicing of the stator coil and caused by them deformations are calculated.*

Key words: *Finite Element Method (FEM), double speed induction motor, electromagnetic force, splicing*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Двускоростните асинхронни двигатели се използват за задвижване на помпени и вентилаторни агрегати, където е необходимо осигуряване на възможност за промяна на дебита на съответния флуид. Статорната намотка на тези двигатели

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

се състой от две напълно независими една от друга трифазни еднослойни намотки с различен брой полюси. Активните страни на намотките са разположени в едни и същи статорни канали, като последователно в горния слой на статорните канали се разполагат активните страни на едната и другата намотка. По този начин се осигурява симетрично разполагане и на двете намотки в статорните канали. Всяка от тях е свързана в звезда и има свой изводи в клемната кутия на двигателя. Преминаване от едната скорост към другата става, чрез външно превключване на захранването от едната намотка към другата. Обектът на изследване в настоящата статия е двускоростен асинхронен двигател тип ВДА 173/49-12-16К, показан на фиг.1 и е със основни характеристики и данни показани в таблица 1.

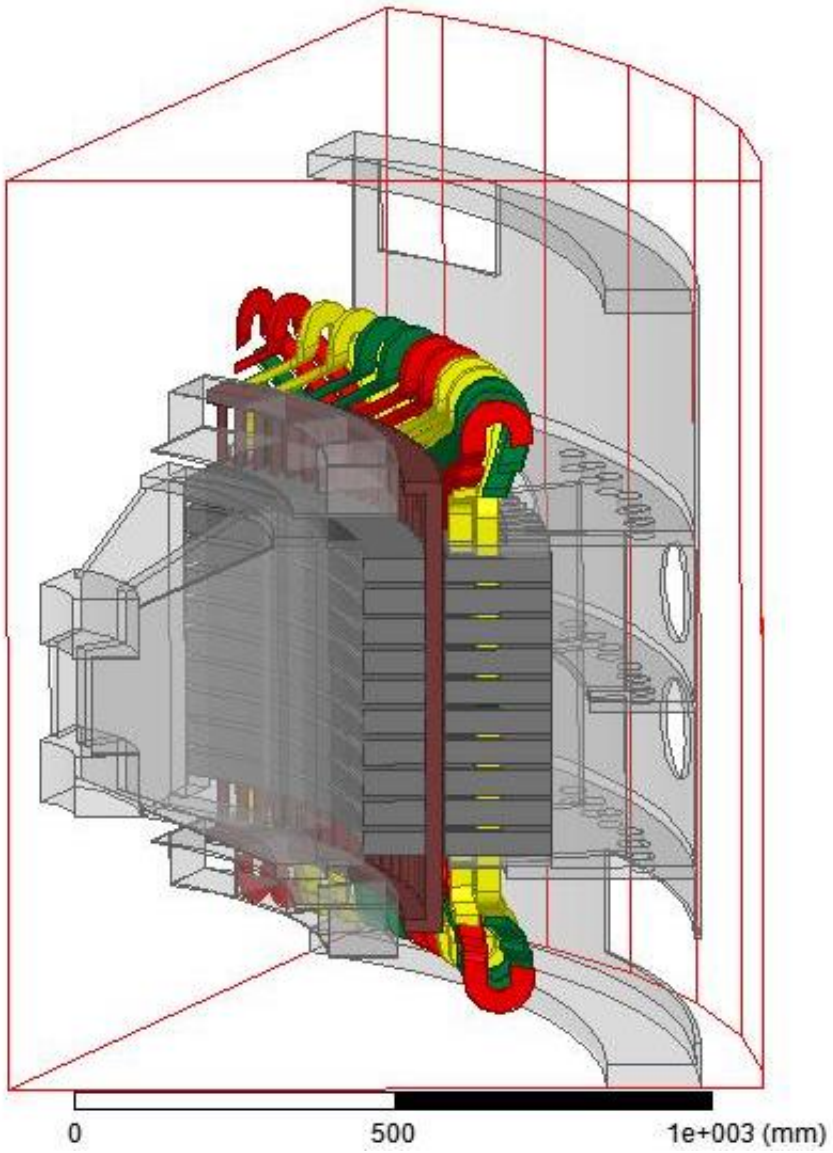
Таблица 1

брой полюси		2p=12	2p=16
номинална мощност	kW	800	400
номинално напрежение	kV	6	6
номинален ток	A	100	60
пусков ток	A	500	310
коефициент на полезно действие	%	92,2	90,7
cos φ	-	0,83	0,71
въздушна междина	mm	2	2
аксиална дължина	mm	495	495
външен диаметър на статора	mm	1790	1790
вътрешен диаметър на статора	mm	1300	1300
височина на статорен канал	mm	89,4	89,4
широчина на статорен канал	mm	12,4	12,8
външен диаметър на ротора	mm	1296	1296
номинални обороти	-	494	371
брой на статорните канали	-	144	144
клас на изолационна система - преди подмяна на статорните намотки - след подмяна на статорните намотки	-	B F	B F
охладителна система	-	Въздушно аксиално-радиална с принудено охлаждане	

Горепосоченият тип двигатели са произведени преди 40 години. Експлоатирани са непрекъснато при повишена влажност и температура, в резултат на което се е достигнало до влошаване на физическото състояние на изолацията на статорните намотки и намаляване на като цяло на изолационната им способност. Тези обстоятелства налагат извършване на подмяна на съществуващите статорни намотки, които са с клас В на изолационната си система, с нови такива, с клас на изолационната система F, изработена по VPI технология. Новата изолация осигурява по-висока устойчивост на въздействието на влага и висока температура и има по-голяма твърдост. При съществуващия тип изолационна система, канал-

ната изолация е с по-голяма дебелина – от порядъка на 6-7 mm, докато при новият тип е от порядъка на 2.2 до 2.65 mm. Намаленият обем на изолацията в статорния канал се компенсира с увеличаване на сечението на статорния проводник. Това позволява да се увеличи механичната здравина на секциите на статорната намотка, в резултат на което се очаква да се намали деформирането на челните съединения.

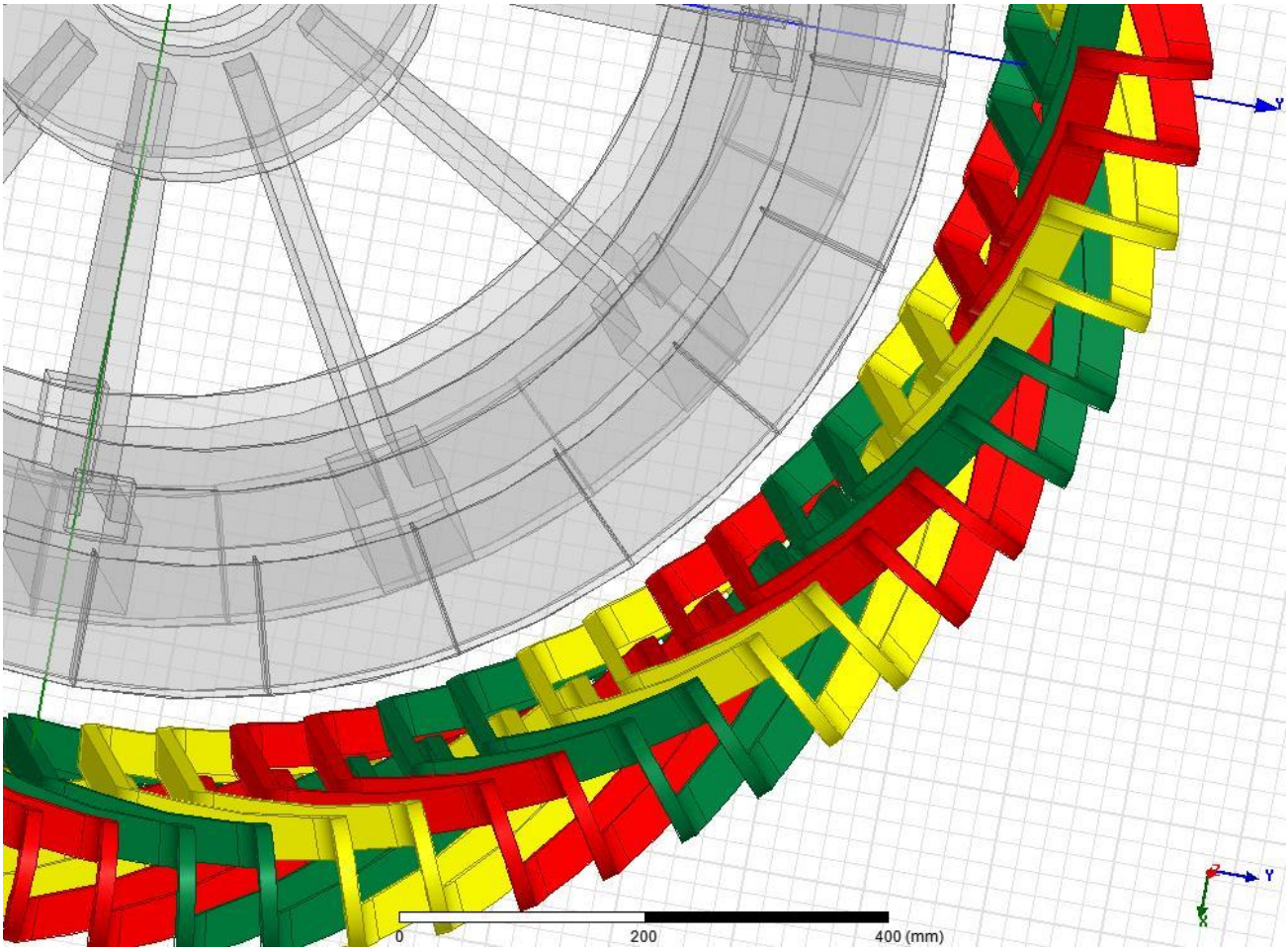
По време на пускане на двигателите челните съединения на статорните намотки, показани на фиг.2 са подложени на силовото въздействие, предизвикано взаимодействието на пусковия ток и потока на челно разсейване.



Фиг.1. 3D модел за изследване на електромагнитното поле и определяне на деформациите на челните съединения при 2p = 12.

Поради повишената механична якост на секциите и повишената твърдост на изолацията, огъването на челните съединения намалява, но в нея продължават да съществуват механични напрежения. В резултат на това силово въздействие на полето на челно разселване върху статорните секции, е възможно в челните

съединения да се появят микропукнатини, които да способстват за последяващо влошаване на изолационното съпротивление в тези области.
Целта на разработката представена в настоящия доклад е разработване на тримерен числен модел на двускоростен асинхронен двигател за средно напрежение, чрез който да бъдат определени електромагнитните сили, действащи върху челните части на статорната намотка и предизвиканите от тях деформации при директно пускане в зависимост от избраната скорост, с която ще работи двигателя.



Фиг.2. Разположение на челните части в 3D модел за изследване на електромагнитното поле и определяне на деформациите на челните съединения.

2. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ

За определяне на електромагнитните сили, действащи върху челните части на статорните намотки е използвано числено моделиране на магнитното поле в активната и челните части на двигателя. То е извършено посредством метода на крайните елементи, като е разработен 3D квазистационарен модел на магнитно поле. От полученото числено решение е определено пространственото разпределение на електромагнитните сили в зоната на челните съединения на работещата намотка при хлъзгане s=1. Получените резултати за пространственото разпределение на силите са използвани за определяне на механичното им въздействие върху челните съединения на статорните намотки. За тази цел е разработен

модел за числено моделиране на механичното натоварване, от който са определени деформациите челните съединения на статорните намотки. Тримерния модел за изследване обхваща част от обема на двигателя в активната зона и зоната на челните съединения, която включва всички елементи от конструкцията му между външния диаметър на тялото и вала на двигателя. В радиално направления моделът обхваща два полюса на машината. При статорната намотка с 2p=12, това е сегмент от 60 градуса, а при 2p=16 – 45 градуса. В аксиално направление моделът обхваща двете зони, в които са разположени челните съединения и активната част на двигателя както е показано на фиг.1 и фиг.2. В радиалните граници, в които е ограничен модела са използвани периодични гранични условия.

Включването в модела на сектор от обема на двигателя се налага от възможностите на изчислителната техника и от изискванията за намаляване на изчислителната грешка, дължаща се на пространствената дискретизация.

Изследвания за нейното влияние върху точността на получаваното решение са направени в [1,3]. Получаването на оптимална пространствена дискретизация определя и възможностите за решаване на електромагнитната задача, чрез прилагане на метода на крайните елементи.

Особеностите на модел за изследване на електромагнитното поле са:

- квазистационарен модел с отчитане на индуктираните токове в роторната намотка;
- област включена в модела - 3D сегмент от активната част и областта на челните съединения, съответстващ на две полюсни деления;
- гранични условия – периодични по повърхнините на разрязване на сегмента;
- възбудители на полето с потенциален характер - статорни токове при хлъзгане s=1:
- за всяка скорост се използва отделна еднослойна статорна намотка, като активните страни на секциите лежат в едни и същи канала на статорния пакет, както е в действителната конструкция на двигателя

Възбудителите на електромагнитното поле са моделирани чрез комплексните образи на пусковите токовете в статорните фази на двигателя при т.е. при s=1. Разгледан е момента, в който тока във фаза А има стойност равна на амплитудата на пусковия ток на двигателя.

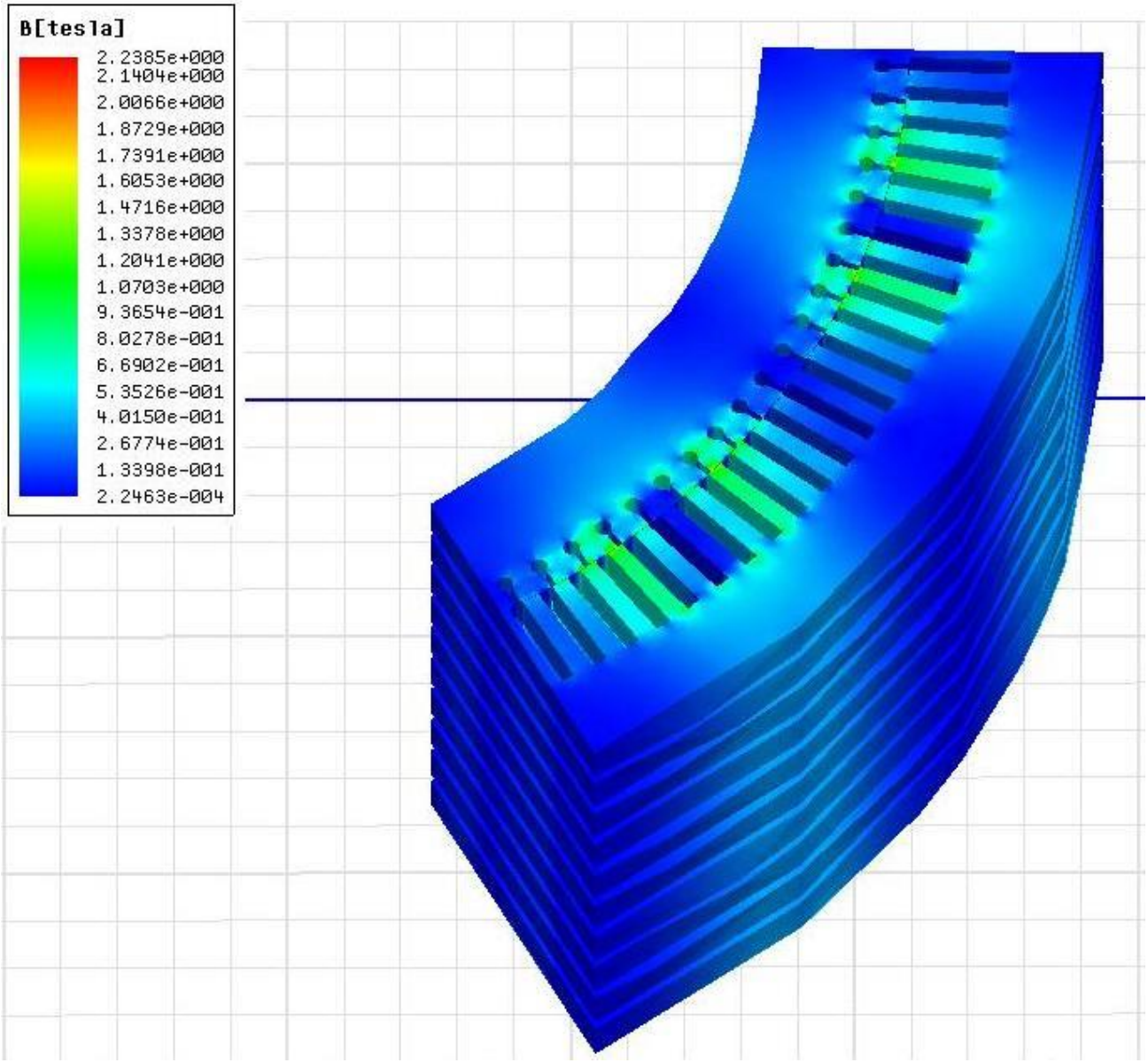
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

На фиг.3 е показано разпределението на магнитната индукция в активната част на статорния и роторния пакет в режим на празен ход за обемен сегмент съответстващ на два полюса при 2p=12. Максималната индукция е от порядъка на 1,2 Т.

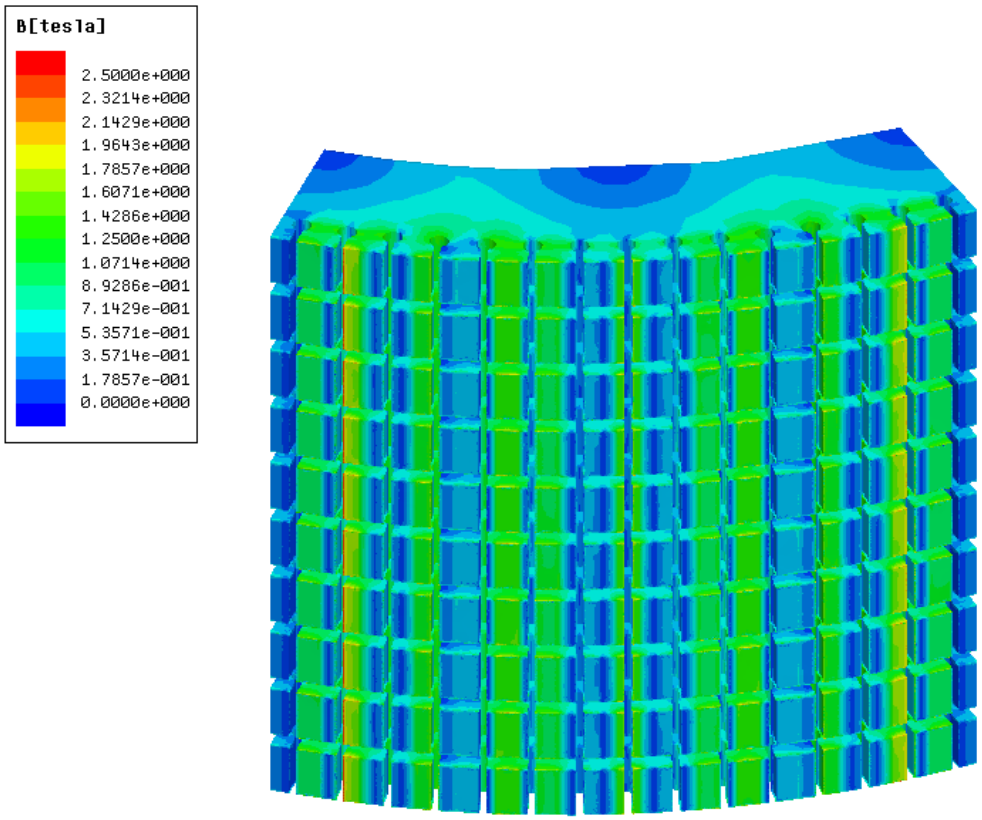
Разпределението на магнитната индукция в обема на роторния пакет (фиг.4) и в обема на статорния пакет (фиг.5) в режим на номинално натоварване за обемен сегмент съответстващ на два полюса при 2p=16, показва асиметрията, породена от скъсяването на стъпката на намотката. Максималната индукция е от порядъка на 2.2 T.

На фиг.6 е показано разпределението на магнитната индукция в активната част на статорния и роторния пакет в режим на късо съединение при 2p=16.

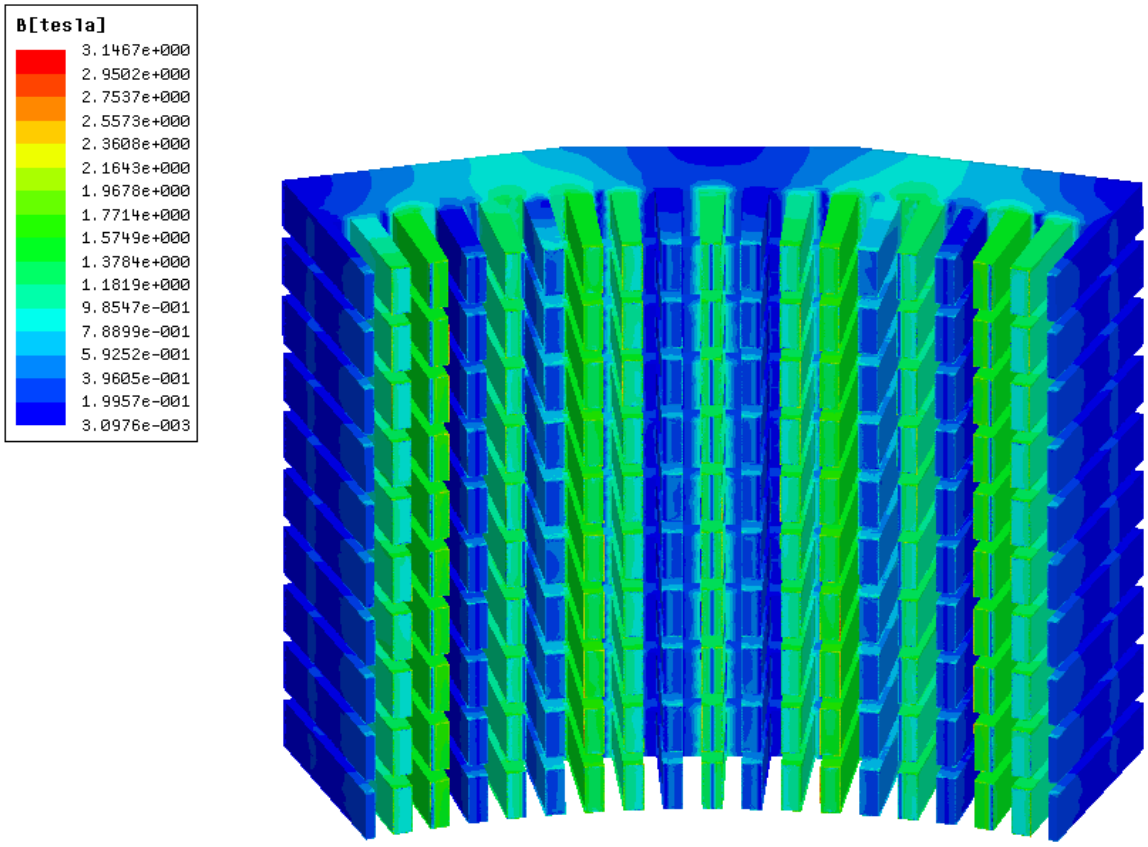
Възбудителният ток отговаря на 10 пъти номиналния ток и получената индукция е от порядъка на 3.7 T.



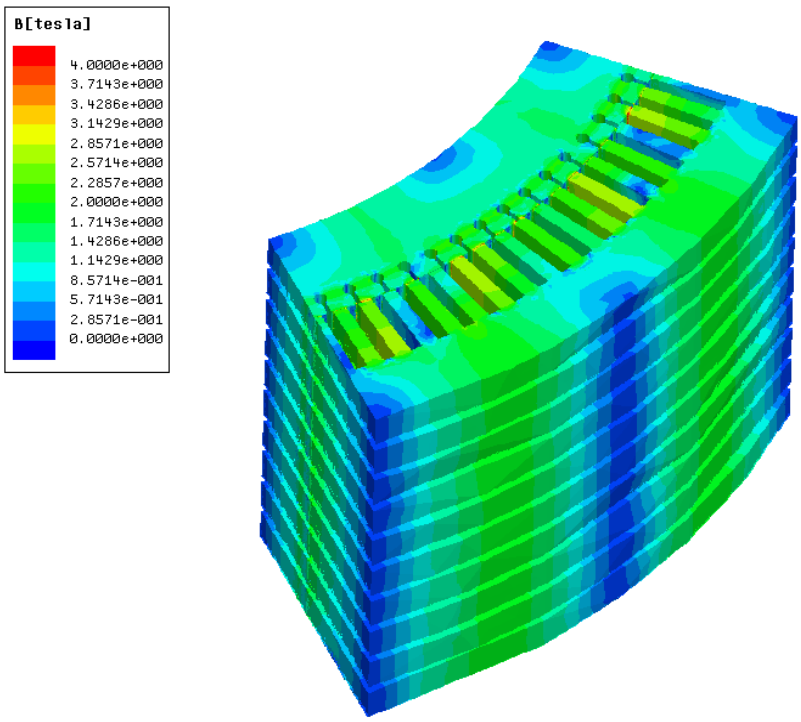
Фиг.3. Разпределение на магнитната индукция в активната част на статорния и роторния пакет при празен ход за 2p=12.



Фиг.4. Разпределение на магнитната индукция във вътрешното сечение на активната част на роторния пакет при s=1 за 2p=16.

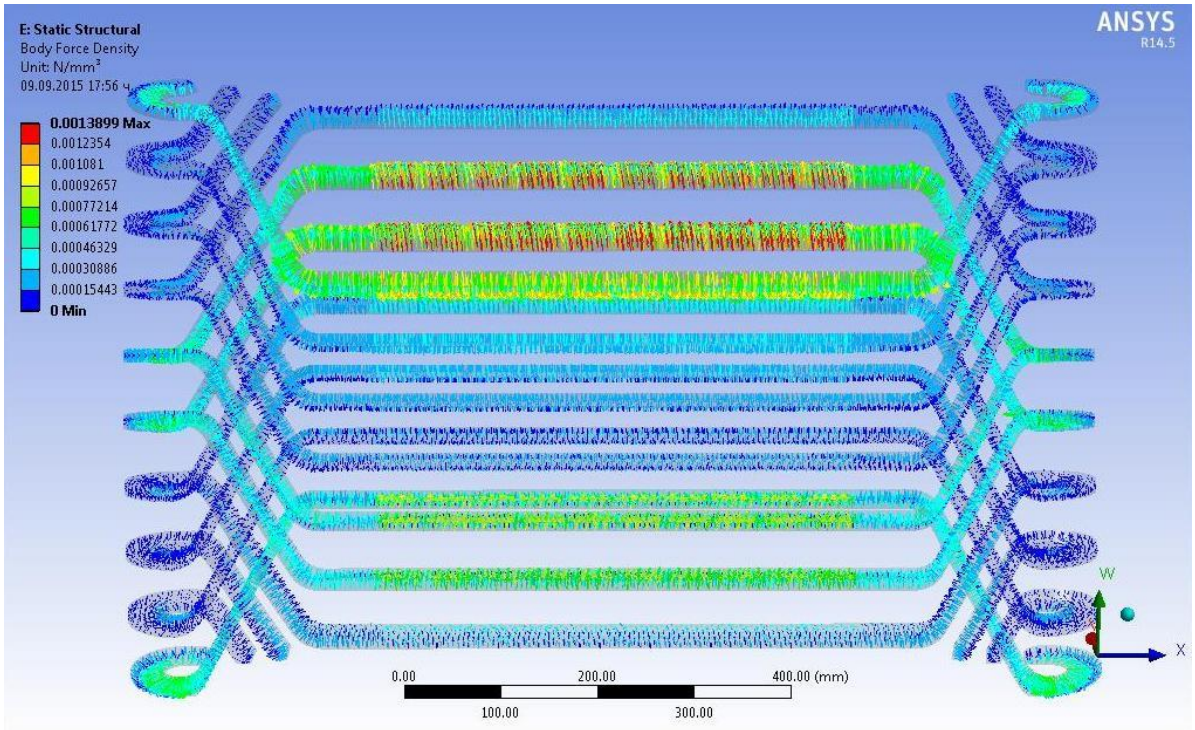


Фиг.5. Разпределение на магнитната индукция във вътрешно сечение на активната част на статорния пакет при s=1 за 2p=16.

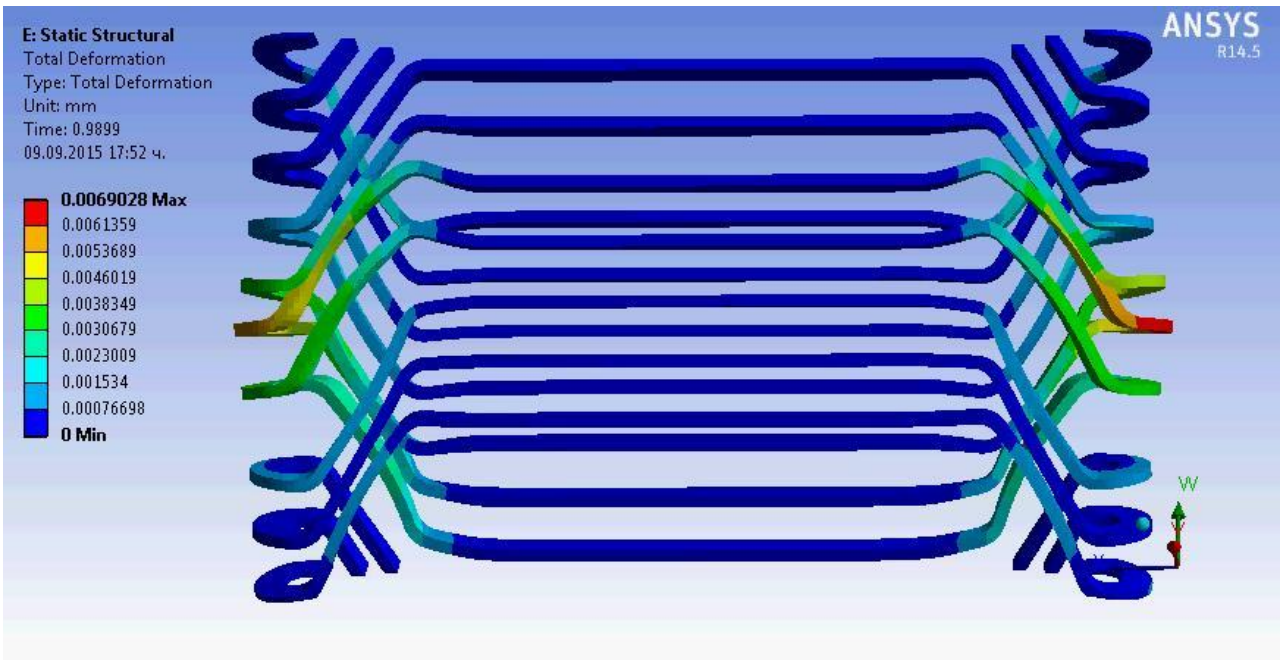


Фиг.6. Разпределение на магнитната индукция във вътрешно сечение на активната част на роторния пакет при режим на късо съединение (I = 10.Iн) за 2p=16.

На фиг.7 е показано разпределението на електромагнитните сили върху активните и челните част на секциите на статорните фази. Най-големи са силите действащи върху секциите на фаза А. Стойността им се изчислява по метода на тензора на напреженията, описан в [2,4].

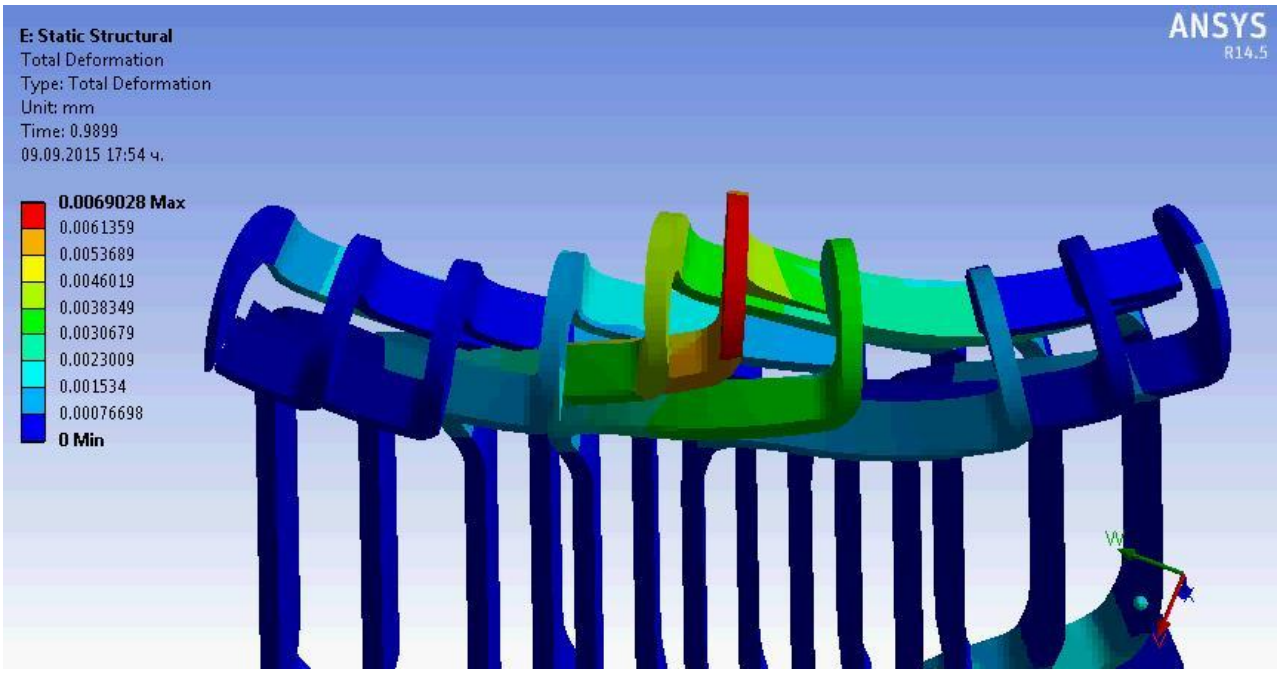


Фиг.7. Разпределение на силите в активните страни на секциите и челните съединения при статорна намотка с 2p = 12.



Фиг.8. Деформация на челните части в аксиална посока при максимална стойност на фазния ток във фаза А при статорна намотка с 2p = 12.

На фиг.8 и фиг.9 са показани деформациите на секциите в областта на челните съединения съответно в аксиално и радиално направление.



Фиг.9. Деформация на челните части в радиално направление при максимална стойност на фазния ток във фаза А при статорна намотка с 2p = 12.

Най-силно са деформирани секциите на фаза А, където в разглеждания момент от време тока има стойност равна на амплитудната. От фиг.8 се вижда, че челните съединения на тези секции са се удължили в аксиална посока. От фиг.9 се виждат силите, действащи върху секциите на същата фаза. Сек са подложени на натиск в радиално направление, в резултат на което челните съединения са се деформирали към вътрешността на двигателя. Аналогични са резултатите получени при 2p=16.

4. АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1. Разработеният модел позволява още в етапа на проектиране на каквато е да електрическа машина да бъдат определени силите действащи върху челните съединения, което от своя страна дава възможност да се предвидят необходимите мерки за допълнително им укрепване.
2. Получените стойности на деформация на челните части позволява да се даде качествена оценка за способността на изолацията им да издържи на механичното въздействие, без да се получат пукнатини в нея, което от своя страна ще влошат изолационните й параметри.
3. Получените резултати от модела позволяват да се получи разпределението на силите и върху онези части на роторните пръчки, които са разположени извън роторния пакет. От него е възможно да се определи възможността те да понесат силовото въздействие не електромагнитното поле без в тях да възникне пластична деформация

ЛИТЕРАТУРА

[1] ANSYS Maxwell 3D Field Simulator v14 User's Guide

[2] V. Spasov, So Noguchi and H. Yamashita. "A method for obtaining positive definite matrices in the 3D nodal voltage-fed FEA", Proceedings of the Second Japanese-Greek Joint Workshop on Superconductivity and Magnetic Materials, Oita, Japan, May 10-11, 2001, pp. 86-91.

[3] V. Spasov, So Noguchi and H. Yamashita, "Comparative analysis of the force computation methods in the 3D FEM with edge and nodal elements", Electrical Engineering Research Conference, Kita Kyushu, Japan, August 2-3, 2001, SA-01-22, RM-01-90, pp. 9-13

[4] В. Спасов. Изчисляване и визуализация на локална електромагнитна сила при метода с крайни елементи, *списание "Електротехника и електроника"*, кн. 11/12, 2007, стр. 39-43.

Автори: Самуил Румен Александров инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, Email adress: *saaleksandrov@tu-sofia.bg;* Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*;

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл.ас. д-р Валентин Матеев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАТИХВАНЕТО В РАЗЛИЧНИ НАПРАВЛЕНИЯ НА ВИХРОВИТЕ ТОКОВЕ В ПЛОСКИ СРЕДИ ПРИ ИМПУЛСНО ВЪЗБУЖДАНЕ

Калинка Тодорова

Резюме: *При проникване на електромагнитно поле във проводяща среда в нея се иднуктира е.д.н. и протичат вихрови токове. Разпределението и интензивността на тези вихрови токове зависят, както от геометричните и електрофизичните параметри на средата, така и от параметрите на възбудителната намотка. За целите на безразрушителния вихровотоков контрол е важно да се познава разпределението в различни направления на вихровите токове в контролирания обект (КО). В работата на базата на разработен модел в средата на Mag Net 7.4 е проведен числен експеримент и е изследвано затихването в различни направления на вихровите токове, индуктирани в КО, при източник на периодичен импулсен възбудителен ток с правоъгълна форма на импулса. Изследването е проведено, като в модела е въведена параметризация по отношение на специфичната електрическа проводимост на КО.*

Ключови думи: *МКЕ, ударно възбуждане, импулсен вихровотоков преобразувател*

STUDY ATTENUATION IN DIFFERENT DIRECTIONS EDDY CURRENT IN A FLAT MATERIAL AT PULSE EXCITATION

Kalinka Todorova

Abstract: *Penetration of the electromagnetic field in a conducting material in it induces voltage and flow eddy currents. The distribution and intensity of these eddy currents depends, both the geometric parameters and the electro physical object parameters, and the parameters of the exciting coil. For the purpose of non-destructive eddy current control it is important to know the distribution in different areas of eddy currents in the controlled object (CO). In the work on the basis of the model developed with Mag Net 7.4 numerical experiment was carried out and is tested in different directions the attenuation of eddy currents induced in the CO, wherein the source of periodic impulse excitation current rectangular pulse. The study was conducted as a model parameterization was introduced to address the specific electric conductivity of the CO.*

Key words: *FEM, shock excitation, pulse eddy current transducer*

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

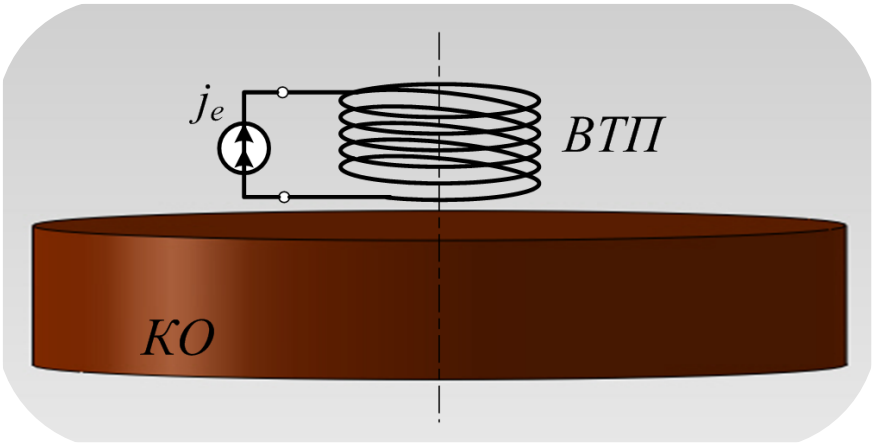
ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Все по-често при използване на вихровотоковият контрол се прилагат импулсни методи [2, 3, 4, 5, 6]. При проникване на електромагнитно поле във проводяща среда в нея се иднуктира е.д.н. и протичат вихрови токове. При определяне на зоната на контрол възниква въпросът какво е разпределението на тези вихрови токове в контролирания обект [1]. Целта на работата е да се изследва затихването на вихровите токове в различни направления в контролиран обект при импулсно възбуждане.

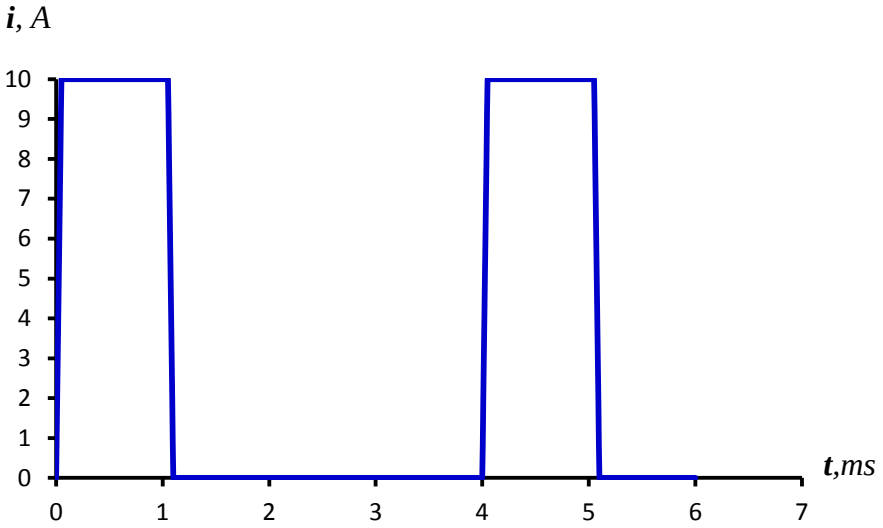
2. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Разглежда се вихровотоков преобразувател (ВТП), който е параметричен, и е включен в схема с идеален източник на ток (фиг.1).



Фиг.1.

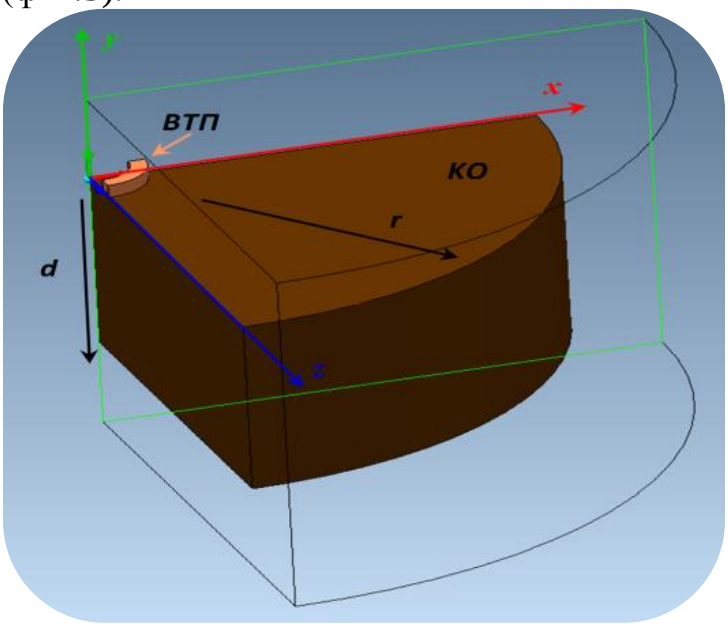
Възбудителният ток на ВТП е периодична поредица от импулси с правоъгълна форма на импулса (фиг.2) и с честота $f=0.25\ kHz$.



Фиг.2.

В средата на продукта MagNet 7.4 е създаден числен модел, състоящ се от ВТП и контролиран обект (КО) (фиг.1). Входен сигнал за ВТП е токът $\boldsymbol{i} = \boldsymbol{j_e}$, а изходен – напрежението $\boldsymbol{u}$. ВТП е цилиндрична намотка от меден проводник. Преобразувателят и КО са съосни. ВТП е разположен много близо над КО, който от своя страна е феромагнитен (μ=100) проводящ цилиндър със специфична електрическа проводимост $\boldsymbol{\sigma}$, променяща се от 0,01 MS/m до 200 MS/m. Чрез числе-

ния модел се изследва разпространението в дълбочина ***d*** и по радиус ***r*** на вихровите токове в КО (фиг.3).

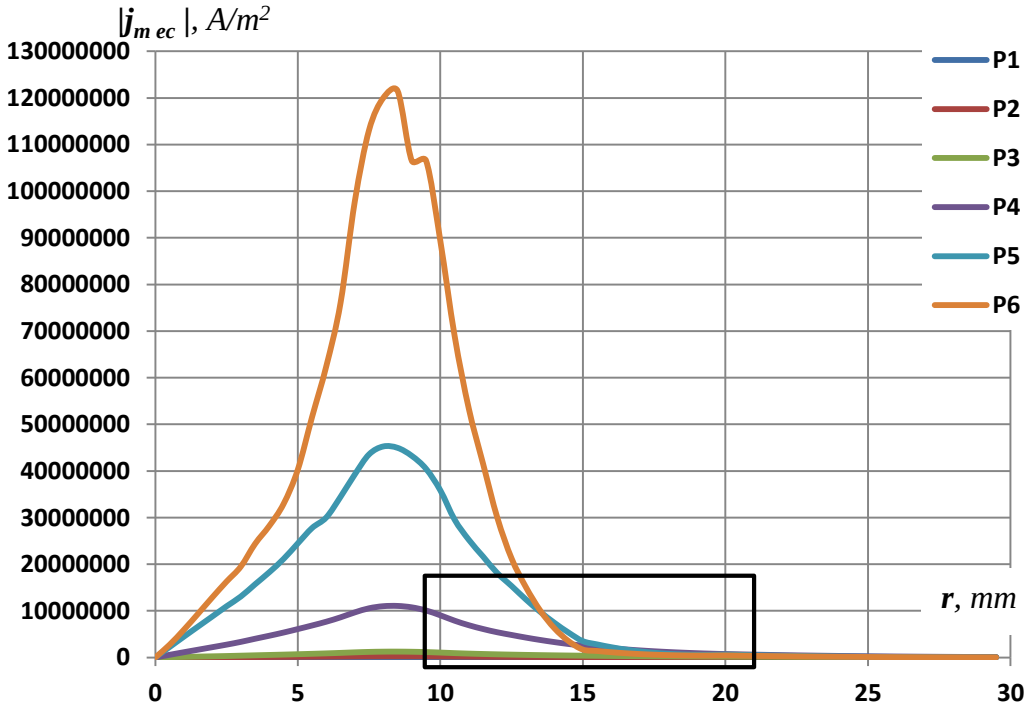


Фиг.3.

Задачата (електрическа верига - полева задача) се решава по метода с крайните елементи [7].

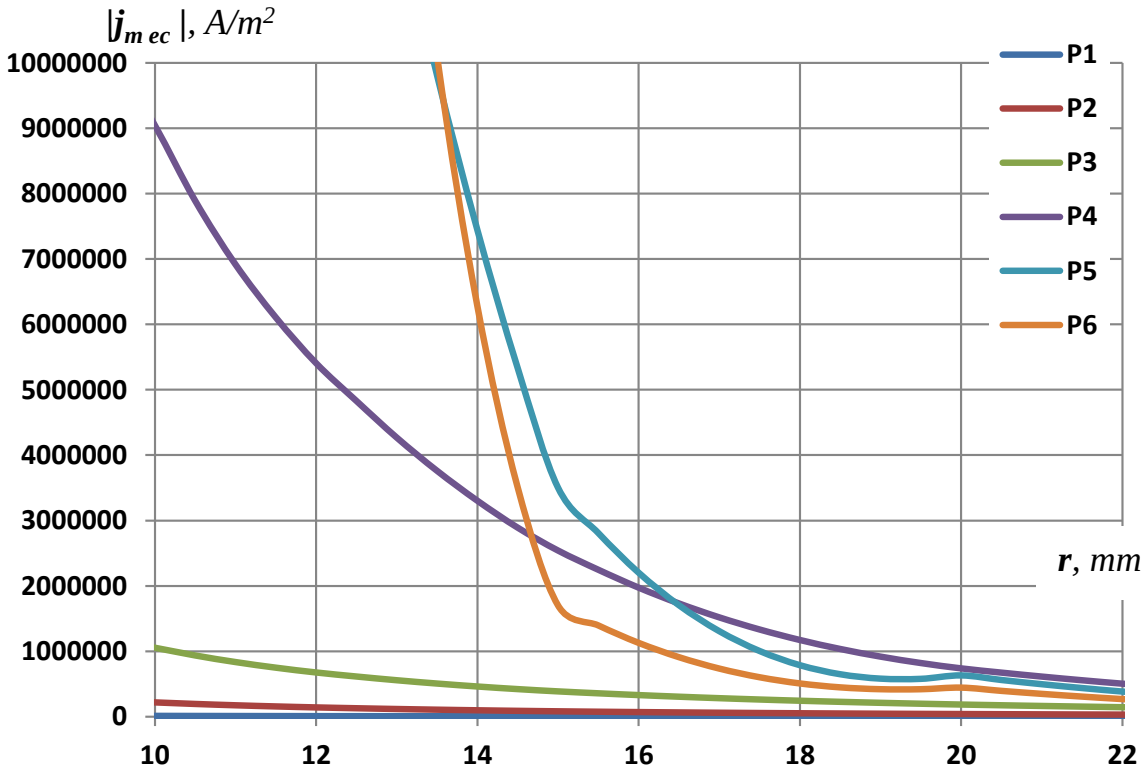
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Разпространението на вихровите токове по направление на радиуса на КО се изяснява от зависимостта $j_{m\,ec}(r)$.



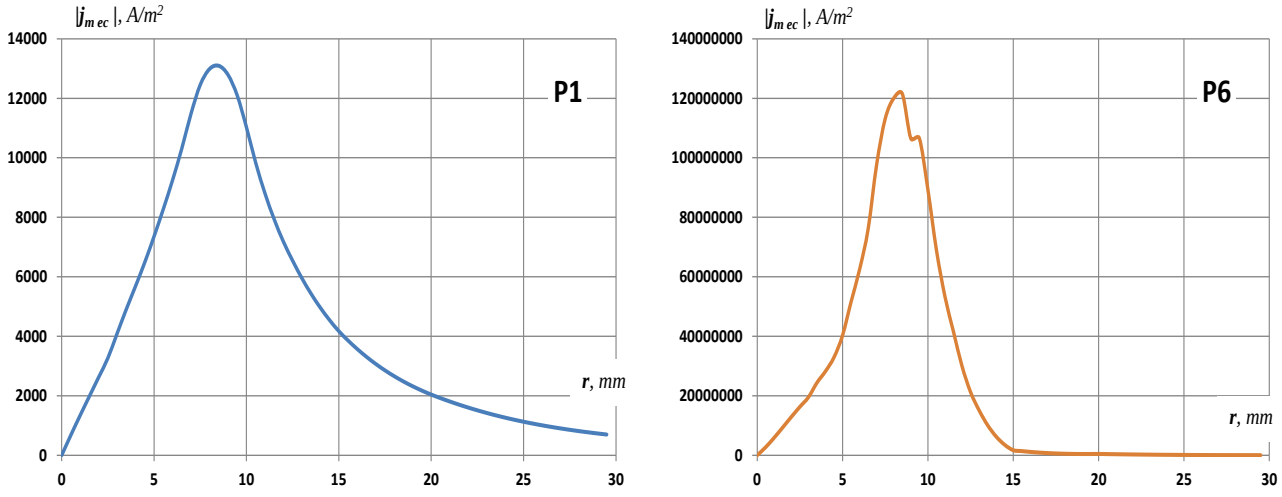
Фиг.4.

Зависимостите на моментната стойност $j_{m\,ec}$ на вихровия ток, индуктиран в КО, от разстоянието ***r*** от оста на намотката в момента t=0,05 ms при d = 0,01 mm за проводимости на КО σ = 0,01 (P1); 0,2 (P2); 1 (P3); 10 (P4); 50 (P5); 200 (P6) MS/m са показани на фиг. 4. Участъци от тези зависимости (ограничени от правоъгълника), увеличени, са показани на фиг. 5.



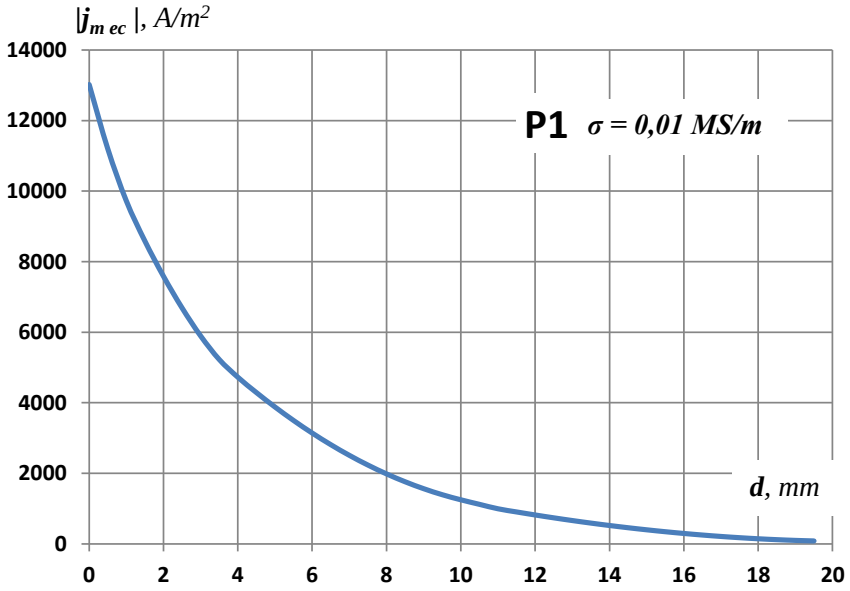
Фиг.5.

Тъй като порядъка на моментната стойност $j_{m\,ec}$ на вихровия ток за различните проводимости на КО силно се различава, за изясняване на характера на разпространение на вихровите токове по направление на радиуса на обекта, на фиг.6 са показани зависимостите $j_{m\,ec}(r)$ за P1 (σ = 0,01 MS/m) и P6 (σ = 200 MS/m).



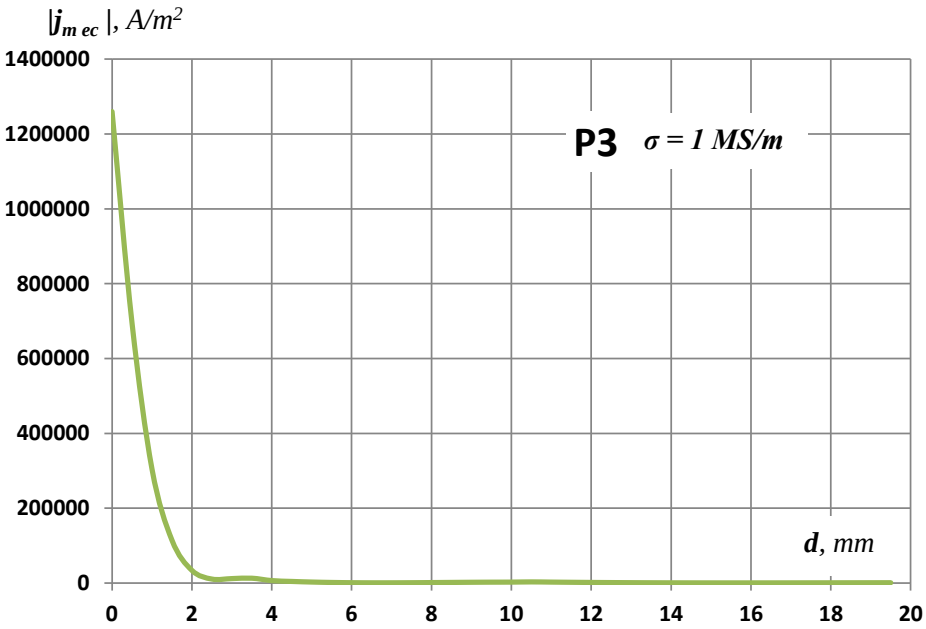
Фиг.6.

Зависимостта $j_{m\,ec}(d)$ показва разпространението на вихровите токове в дълбочина в КО. На фиг.7, фиг.8 и фиг.9 са показани зависимостите на моментната стойност $j_{m\,ec}$ на вихровия ток в КО от дълбочината на проникване d в момента t=0,05 ms за r=8 mm при σ=0,01 (P1); 1 (P3); 200 (P6) MS/m, която за всички случаи е абсолютен максимум.



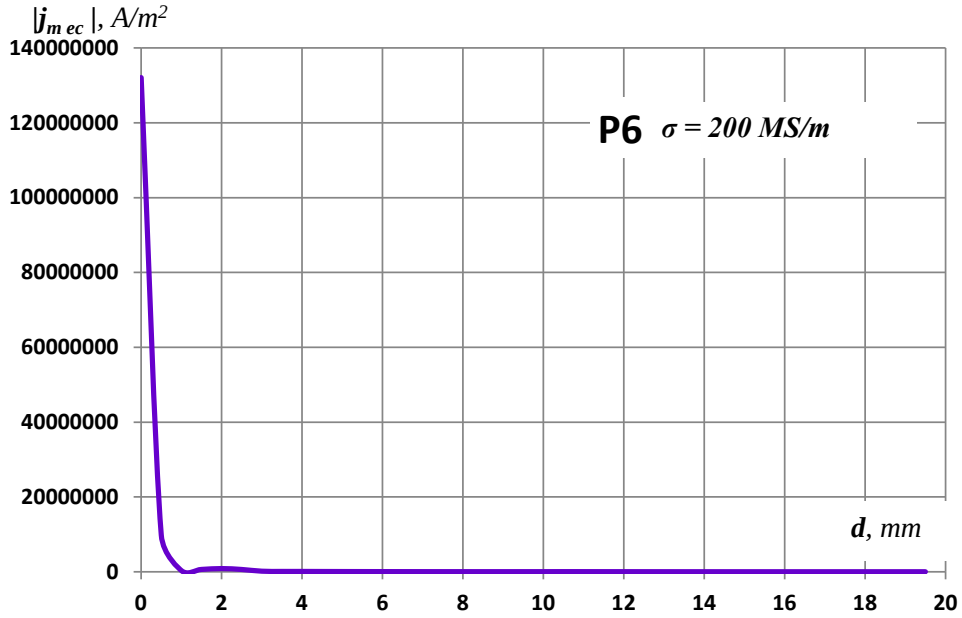
Фиг.7.

При малки проводимости на КО (σ=0,01 MS/m (P1) – фиг.7) затихването на вихровите токове в дълбочина има експоненциална форма, т.е. подобно е на аналогичните зависимости при синусоидален възбудителен ток.



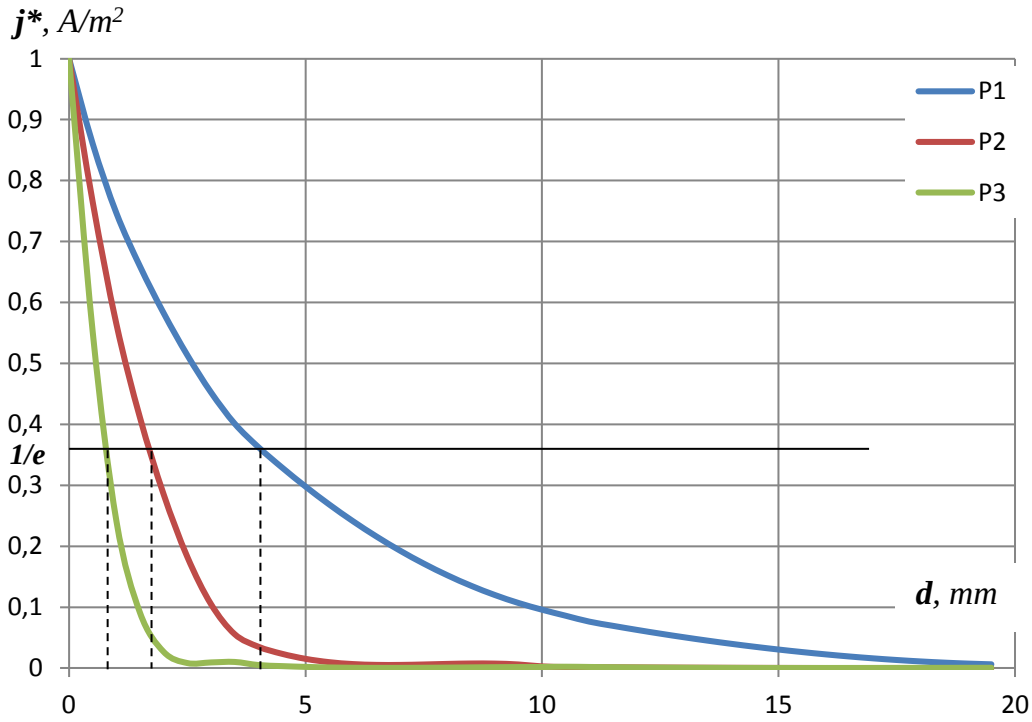
Фиг.8.

При средни и големи стойности на проводимостта на контролирания обект (σ=1 MS/m (P3) – фиг. 8; σ=200 MS/m (P6) – фиг.9) затихването в дълбочина на вихровите токове очевидно е много по-бързо отколкото при малки проводимости.



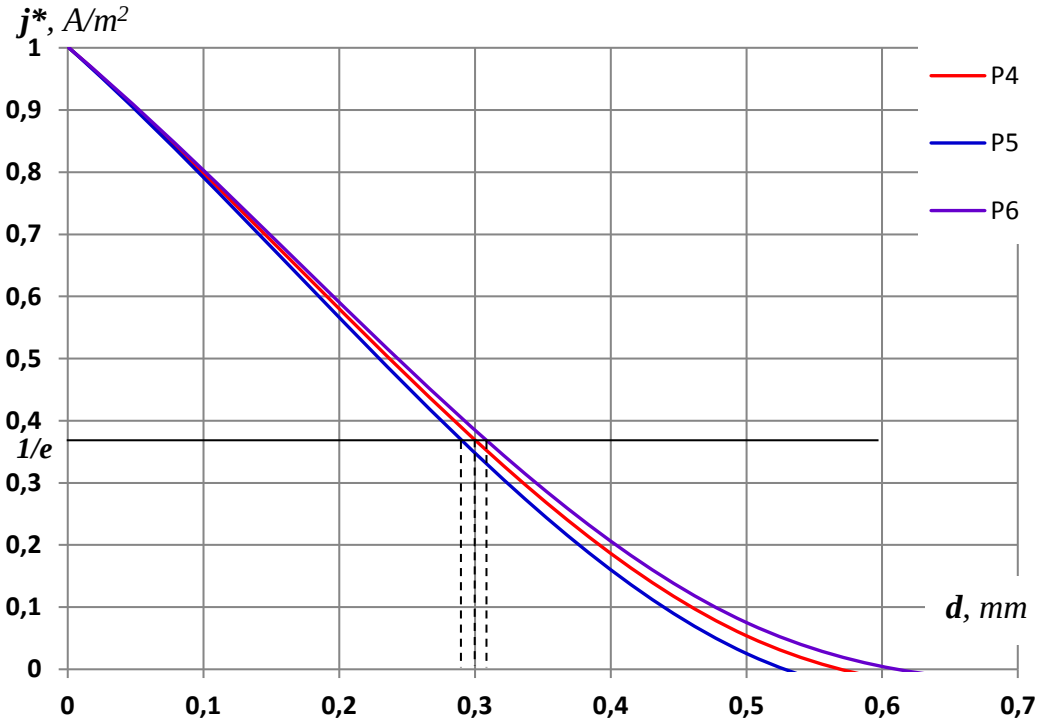
Фиг.9.

Много често при вихровотоковия контрол за оценка на съответни величини се използват техните нормирани стойности. Зависимости на нормираната момент-ната стойност $j^*_{m\,ec}$ на вихровия ток в КО от дълбочината на проникване ***d*** за r=8 mm в момента t=0,05 ms за проводимости на КО σ = 0,01 (P1); 0,2 (P2); 1 (P3) MS/m са показани на фиг.10, а за проводимости σ =10 (P4); 50 (P5); 200 (P6) MS/m - на фиг.11.



Фиг.10.

На тези фигури е показан начин за определяне на дълбочината ***d*** на затихване на вихровите токове - важен параметър при определяне на зоните на контрол при вихровотоковите методи.



Фиг.11.

Известно е [1], че при синусоидални режими дълбочината на проникване на електромагнитното поле се определя от зависимостта

$$\delta = 2/\sqrt{\mu.\sigma.\omega} \quad , \tag{1}$$

където δ е дълбочината, на която плътността на вихровите токове практически затихва. Ако приложим тази зависимост, за да определим дълбочината на затихване на вихровите токове в изследвания обект от разработения числен модел при синусоидален възбудителен ток, ще получим

- за случай P1, σ = 0,01 MS/m $\delta_{P1} = 45mm$;
- за случай P4, σ = 10 MS/m $\delta_{P4} = 1.4mm$.

При сравнение на тези стойности за съответните случаи с дълбочината ***d*** на проникване на вихровите токове при импулсен възбудителен ток, която може да се определи от фиг.10 за P1 и от фиг.11 за P4, се вижда, че те се различават.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От проведените числени експерименти и получените резултати може да се направят следните изводи:

- При различни специфични проводимости на КО (в широк диапазон на изменение), когато се използва импулсен възбудителен ток с правоъгълна форма на импулса, скоростта на затихване на плътността вихровите токове по направление на радиуса на цилиндричен контролиран обект силно се различава за различните проводимости на КО – плътността ва вихровите токове затихва значително по-бързо при по-големи стойности на специфичната електрическа прово-

димост **σ** на КО;

- От получените резултати от числените експерименти за изследване на затихването на плътността на вихровите токове в дълбочина ***d*** на КО и сравнението им с дълбочината на затихване на плътността на вихровите токове при синусоидален възбудителен ток, става ясно, че формула (1) не може еднозначно да се прилага и при импулсни възбудителни режими.

БЛАГОДАРНОСТ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор ДФНИ Е02/8 с Фонд „Научни изследвания“ при МОН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Цветков Д. и кол., Електромагнитна дефектометрия, ДИ „Техника“, София, 1981

[2] Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in “Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques”, IAEA–TECDOC–628. Rev.2, Vienna, 2011

[3] Zergoug M., N.Boucherrou, Material Characterization by Pulsed Eddy Current,

[4] Preda Gabriel, Mihai Rebican, Florea Ioan Hantila, Pulse Eddy Currents Using an Integralfem Formulation for Cracks Detection, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 33 (2010), 1225–1229

[5] Smetana Milan, Tatiana Strapacova, Ladislav Janousek, Klara Capova, Pulsed Eddy Currents: A New Trend in Non-Destructive Evaluation of Conductive Materials, 17th Symposium IMEKO TC 4, 3rd Symposium IMEKO TC 19 and 15th IWADC Workshop Instrumentation for the ICT Era Sept. 8-10, 2010, Kosice, Slovakia, 238-243

[6] Michniaková Mária, Ladislav Janoušek, Milan Smetana, Impact of Probe Configuration on Cracks Depth Resolution in Pulsed Eddy Current Non-Destructive Evaluation, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7b/2012, 226-228

[7] *www.infolytika.com*

Автор: Калинка Тодорова, гл. ас. д-р инж., катедра “Обща електротехника” (ОЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет – София, E-mail address: *ktodorova@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Стефчо Гунински

АНАЛИЗ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ИНФОРМАЦИОННИ ПАРАМЕТРИ НА ИЗХОДНИЯ СИГНАЛ НА ИМПУЛСЕН ВТП, СВЪРЗАНИ С ПЛОЩИ

Стефчо Гунински

Резюме: *В работата е изследвана зависимостта на от специфичната електрическа проводимост на плосък проводящ контролиран обект (КО) на средната стойност (обикновена и по модул) и на ефективната стойност на изходното напрежение при захранване с източник на ток или на изходния ток при захранване с източник на напрежение на параметричен импулсен вихровотоков преобразувател (ВТП). Формата на захранващите импулси е периодични триъгълници или правоъгълници (трапеци).*
Ключови думи: *импулсен вихровотоков преобразувател, средна стойност, ефективна стойност,*

ANALYSIS OF EFFECTIVENESS OF AREA-RELATED INFORMATION PARAMETERS OF THE OUTPUT SIGNAL OF PULSE ECT

Stefcho Guninski

Abstract: *The research focuses on the dependence of the specific electrical conductivity of the flat conductive controlled object (CO) of the average (simple and module) and the effective value of the output voltage when supplied with a current source or the output current when supplied with a voltage source parametric pulsed eddy current transducer (ECT). The shape of the power pulses is periodic triangles or rectangles (trapezoids).*
Keywords: *pulse eddy current transducer, average value, RMS value*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Едно от големите предимства на импулсните вихровотокови методи (ИВТМ) е многопараметровостта и на изходния сигнал. При наличие на периодичност информационните му параметри може условно да се разделят на три групи. Първата група (екстремални параметри) включва стойности на екстремуми – абсолютни или локални максимуми и минимуми [1,2]. Втората включва времеви интервали или честоти. Тази работа е посветена на параметрите, свързани с големината на площи между графиката на изходния сигнал и оста на времето (площни параметри). Типичен пример на такива параметри са ефективната стойност и средната стойност (обикновена и по модул) на периодичния изходен сигнал. Докато при синусоидални режими те са едни от основните параметри, то при ИВТМ не са подробно изучени. В настоящата работа е изследвана чувст-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

вителността на тези информационни параметри към специфичната електрическа проводимост γ на плосък проводящ контролиран обект (КО).

2. ИЗЧИСЛИТЕЛЕН МОДЕЛ

Разглежда се параметричен импулсен вихровотоков преобразувател (ИВТП), представляващ цилиндрична намотка с N=10 навивки, разположен на разстояние d=0,01 mm *(lift off)* над основата на цилиндричен хомогенен изотропен линеен проводящ КО със специфична електрическа проводимост γ (фиг.1). В средата на програмния продукт MagNet 7.4 [5] са анализирани четири варианта. При вариантите **А** преобразувателят се захранва от идеален източник на ток, а при вариантите **В** – от идеален източник на напрежение. При вариантите с номер **1** (А1 и В1) формата на захранването е периодична поредица от триъгълни импулси, а при вариантите с номер **2** (А2 и В2) се разглежда периодична поредица от правоъгълни импулси (трапеци). Всички модели са параметризирани (проблеми от Р1 до Р8) по отношение на специфичната електрическа проводимост за 8 стойности на γ от 0,01 MS/m до 20000 MS/m. Във всички случаи като входна величина се разглежда специфичната електрическа проводимост γ, а изходен сигнал при източник на ток (варианти А1 и А2) е напрежението в краищата на намотката. Когато ИВТП се захранва от идеален източник на напрежение (варианти В1 и В2) като изходен сигнал се разглежда токът през преобразувателя. При всички варианти информационни параметри са *ефективната стойност* на изходното напрежение (ток):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 dt} \quad \text{или} \quad I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} \tag{1}$$

или *средната им стойност*

$$U_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T u dt \quad \text{или} \quad I_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T i dt \ . \tag{2}$$

При двуполярен изходен сигнал се разглежда и *средната стойност по модул*

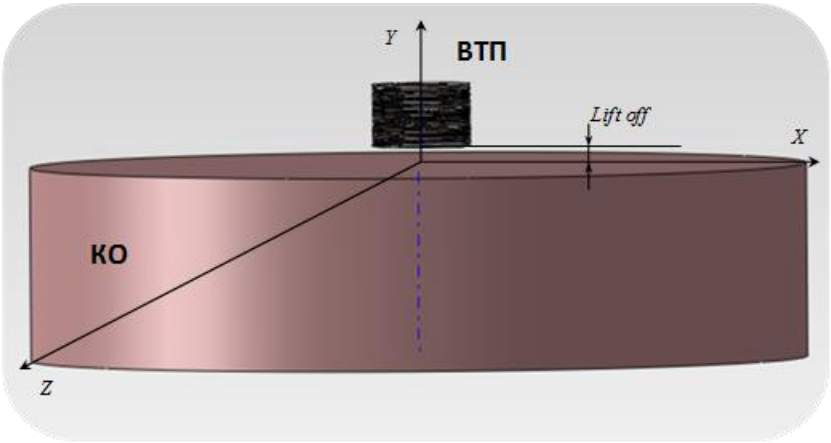
$$U_{av\,mod} = \frac{1}{T}\int_0^T |u| dt \quad \text{или} \quad I_{av\,mod} = \frac{1}{T}\int_0^T |i| dt \ . \tag{3}$$

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Чрез съвместното числено решаване по МКЕ на полевата задача и на електрическия преходен процес са получени зависимостите на различните стойности на изходното напрежение u_{out} (варианти А1 и А2) и на изходния ток i_{out} (варианти В1 и В2) от специфичната електрическа проводимост γ по данни от решенията на проблеми от Р1 до Р8.

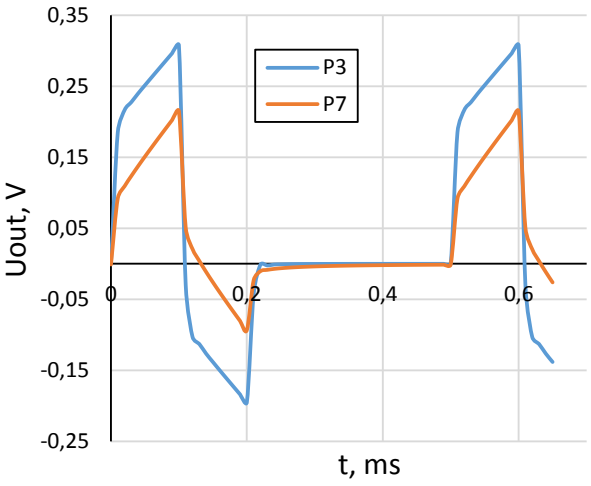
Вариант А1. Захранване с периодична поредица триъгълни импулси от идеален източник на ток.

От графиката на фиг.2 [2,3] за проблеми Р3 (γ = 0,02 MS/m) и Р7 (γ = 300 MS/m) се вижда, че импулсите на изходното напрежение U_{out} са двуполярни,

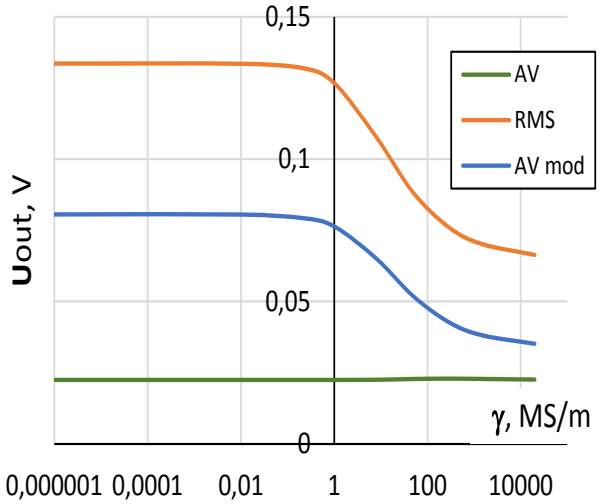


Фиг.1. *Модел на параметричен ВТП над плосък КО*

поради което в този случай има смисъл изследването и на средната му стойност по модул (3). Зависимостите от специфичната проводимост γ на средната стойност (*AV*) от (2), на ефективната стойност (*RMS*) от (1) и на средната стойност по модул (AV_{mod}) от (3) са показани на фиг.3 в логаритмичен мащаб.



Фиг.2. *Зависимост на изходното напрежение от времето за вариант А1*



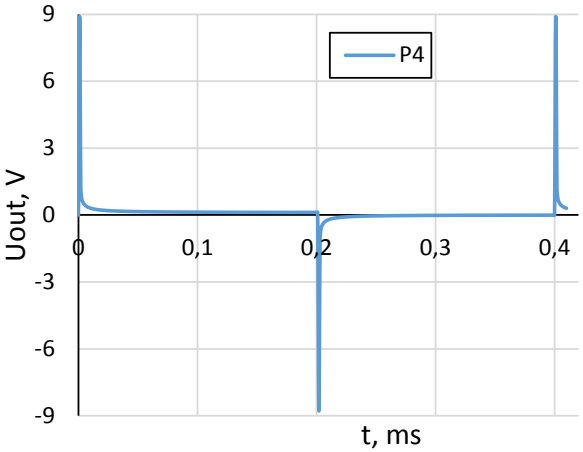
Фиг.3. *Зависимост на информационните параметри на изходното напрежение от проводимостта за вариант А1*

Обикновената средна стойност от (2) практически не зависи от γ, докато и ефективната стойност, и средната стойност по модул (*RMS* и AV_{mod} от фиг.3) в интервала от 1 MS/m до 500 MS/m съществено намаляват.

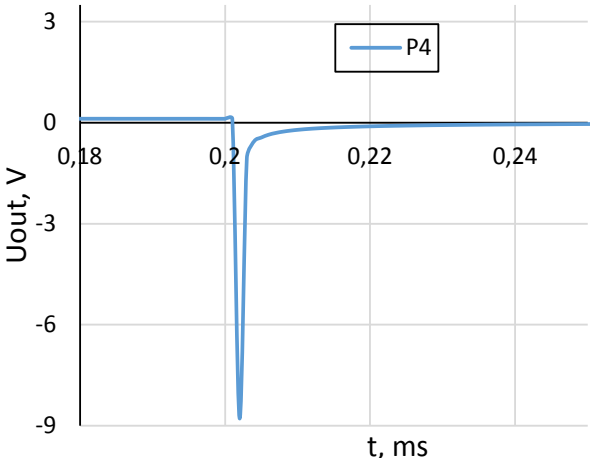
Вариант А2. Захранване с периодична поредица правоъгълни импулси от идеален източник на ток.

На фиг.4 е показана графиката на изходното напрежение при проблем Р4 (γ = 8 MS/m) [2,3]. Вижда се, че импулсите отново са двуполярни, при това симетрични по отношение на оста на времето. Те обаче са много тесни триъгълни импулси (фиг.5), което ги прави неподходящи за използване на площните им параметри. Ако въпреки схемотехническите трудности се определят площните параметри от изрази (1), (2) и (3), то зависимостите им от специфичната електрическа проводимост имат вида, показан на фиг.6. И тук средната стойност практически не зависи от проводимостта като следствие от симетричността на им-

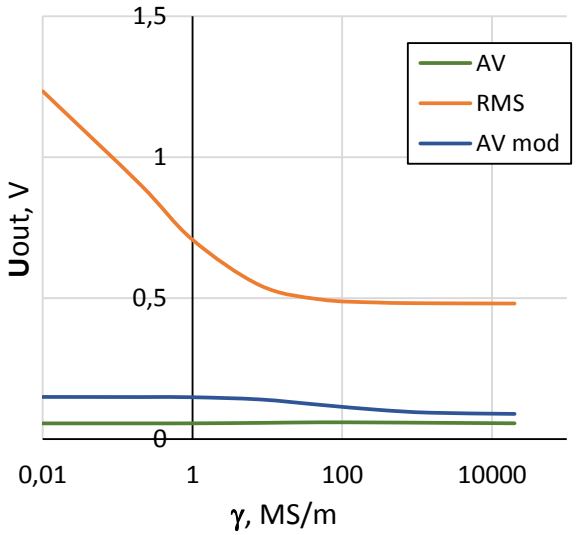
пулсите на изходния сигнал и е много малка. Средната стойност по модул намалява с увеличаване на γ, но тази зависимост е много по-слаба, отколкото при ефективната стойност (фиг.6). Освен това зоната на чувствителност към специфичната проводимост при ефективната стойност е от 0,005 MS/m до 10 MS/m, докато при средната стойност по модул тя е от 10 MS/m до 20000 MS/m.



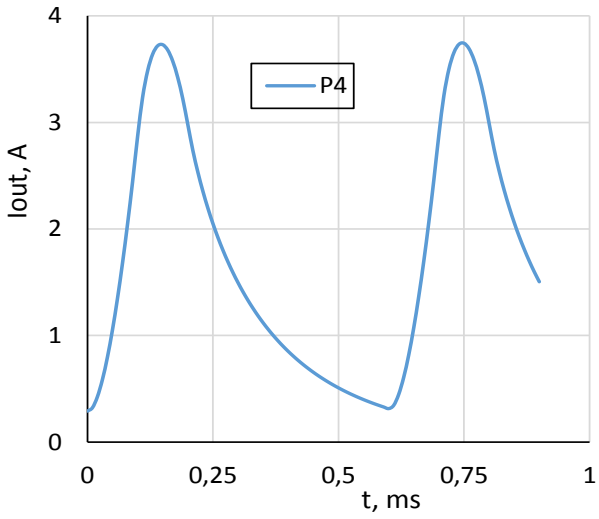
Фиг.4. *Зависимост на изходното напрежение от времето за вариант А2*



Фиг.5. *Зависимост на изходното напрежение от времето за вариант А2 (само отрицателния импулс)*



Фиг.6. *Зависимост на информационните параметри на изходното напрежение от проводимостта за вариант А2*



Фиг.7. *Зависимост на изходния ток от времето за вариант В1*

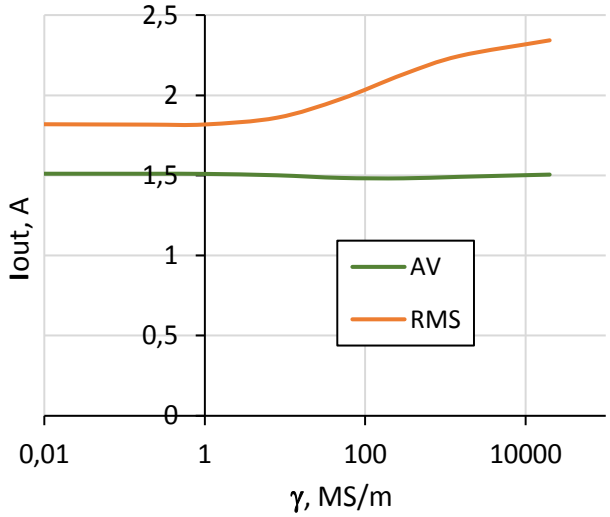
Вариант В1. Захранване с периодична поредица триъгълни импулси от идеален източник на напрежение.

От фиг.7 [2,3] се вижда, че в този случай изходният ток е еднополярен и затова на фиг.8 като площни параметри са показани зависимостите от специфичната проводимост само на средната стойност и на ефективната стойност (от (2) и (3) се вижда, че в този случай средната стойност по модул съвпада с обикновената средна стойност). Както и в предните случаи средната стойност на изходния ток практически не зависи от γ. Отново ефективната стойност съществено зависи от специфичната електрическа проводимост, но само в интервала от 8 MS/m до

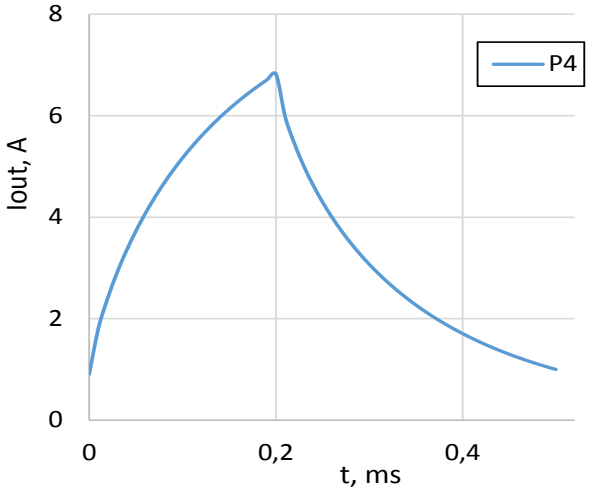
10000 MS/m. Съществено различие също е, че ефективната стойност расте с увеличаването на γ за разлика от случаите на захранване с идеален източник на ток (варианти *A1* и *A2*).

Вариант B2. Захранване с периодична поредица правоъгълни импулси от идеален източник на напрежение.

И в този случай импулсите на изходния ток са еднополярни (фиг.9) [2,3] и средната стойност по модул не се разглежда. Зависимостите на средната и ефективната стойности от специфичната проводимост са показани на фиг.10. Сравнението на графиките от фиг.10 и фиг.8 показва голямото им сходство. И тук средната стойност не се влияе от γ, докато ефективната стойност расте в същия интервал на проводимостта - от 8 MS/m до 10000 MS/m.



Фиг.8. *Зависимост на информационните параметри на изходния ток от проводимостта за вариант B1*



Фиг.9. *Зависимост на изходния ток от времето за вариант B2*

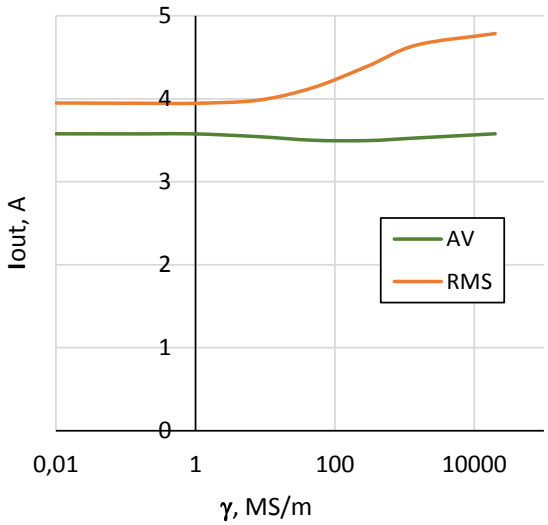
4. ИЗВОДИ

От получените резултати може да се направят следните по важни изводи:

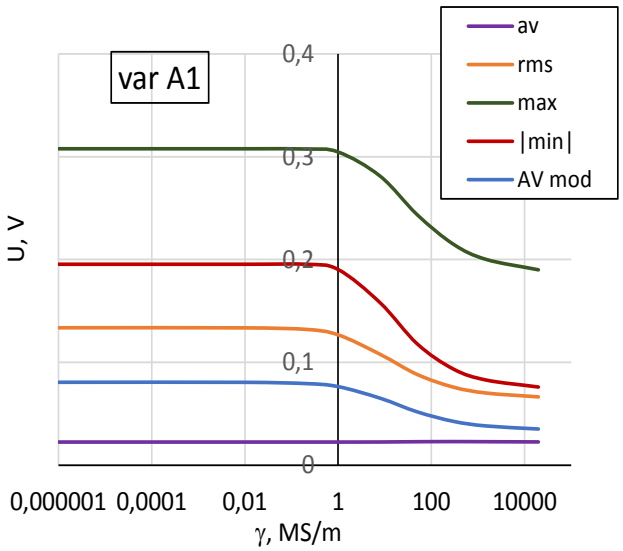
1. Във всички случаи (различна форма на импулсите и при двата типа захранващ източник) средната стойност от израз (2) практически не зависи от специфичната електрическа проводимост на контролирания обект (фиг.3, фиг.6, фиг.8 и фиг.10).

2. Само при захранване с триъгълни импулси от идеален източник на ток средната стойност по модул на изходния ток съществено зависи от специфичната проводимост γ в интервала от 1 MS/m до 500 MS/m (фиг.3).

3. Във всички случаи има не малки интервали, в които ефективната стойност съществено зависи от γ (фиг.3, фиг.6, фиг.8 и фиг.10). Видът на зависимостта зависи основно от формата на импулсите и вида на захранващия източник.



Фиг.10. *Зависимост на информационните параметри на изходния ток от проводимостта за вариант B2*



Фиг.11. *Сравнение на зависимостите на площните и екстремалните параметри на изходното напрежение от γ за вариант A1*

4. Когато захранващият източник е идеален източник на ток ефективната стойност намалява с увеличаването на специфичната проводимост (фиг.3 и фиг.6), а при идеален източник на напрежение зависимостта е обратна – ефективната стойност расте с нарастването на γ (фиг.8 и фиг.10).

5. Формата на захранващите импулси влияе на интервала, в който ефективната стойност зависи от проводимостта само при идеален източник на ток (варианти (*A*). При триъгълни импулси специфичната проводимост влияе на ефективната стойност при големи стойности (500 MS/m > γ > 1 MS/m) (фиг. 3), а при правоъгълни импулси тази зависимост е налице при 0,005 MS/m > γ > 10 MS/m (фиг.6).

6. При захранване с идеален източник на напрежение (варианти *B*) [4] формата на импулсите практически не влияе на интервала, в който ефективната стойност на изходния ток се влияе от проводимостта (фиг.8 и фиг.10).

7. Като цяло площните информационни параметри са по-нечувствителни към специфичната електрическа проводимост, отколкото екстремалните. Това е илюстрирано на фиг.11, където за вариант *A1* са показани зависимостите от γ освен на площните параметри и съответните зависимости на:

av – средната стойност на изходното напрежение от фиг.2;

rms – ефективната стойност на изходното напрежение от фиг.2;

max – максималната стойност на изходното напрежение от фиг.2;

|min| - абсолютната стойност на минимума на изходното напрежение от фиг.2;

AV mod - средната стойност по модул на изходното напрежение от фиг.2.

Таблица 1

Вид на източника	Форма на импулсите	Вид на зависимостта на rms от γ	Диапазон на чувствителност	Вариант
идеален на ток	триъгълна	намалява	1 – 500 MS/m	A1
	правоъгълна	намалява	0,005 – 10 MS/m	A2
идеален на напрежение	триъгълна	расте	8 – 10000 MS/m	B1
	правоъгълна	расте	8 – 10000 MS/m	B2

Очевиден е еднаквият характер на зависимостта на информационните параметри от проводимостта (намаляващ), но най-голяма е чувствителността при двата екстремума (**max** и **|min|**) и едва след тях следва площния параметър **rms**. Информацията за неговата зависимост от γ е обобщена в табл.1.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Цветков Д. и кол., Електромагнитна дефектометрия, С., Техника, 1981

[2] Guninski S., Power Source Type Impact on Output Signal of Pulse ECT, Proc. 10TH Summer School "Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering Sozopol'14", pp. 52-60, ISSN: 1313-9487

[3] Тодорова К., С. Гунински, Изследване на зависимостта на изходния сигнал на ВТП от проводимостта при различни форми на импулса на възбудителния ток, Годишник на Техническия университет – София, т. 64, кн. 4, 2014 г., с. 197 – 202, ISSN 1311 - 0829

[4] Menana Hocine, Mouloud Fe´liachi, Contribution to the Modeling of a Voltage Driven Pulsed Eddy Current Sensor for the Characterization of Conductive Plates, Analog Integr Circ Sig Process (2011) 69: 75-80

[5] 2D Tutorial, Preparing, Solving and Interpreting NDT Problems, Infolytica Corporation, 2005

Автор: Стефчо Гунински, доц. д-р инж., катедра „Обща електротехника", Електротехнически факултет, Технически Университет – София, E-mail adress: *sgg@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Ивайло Долапчиев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФОРМАТА НА ВИХРОВИТЕ ТОКОВЕ ПРИ ИМПУЛСНО ВЪЗБУЖДАНЕ В ПЛОСКИ ПРОВОДЯЩИ СРЕДИ

Калинка Тодорова

Резюме: *Електромагнитният вихровотоков метод се основава на резултатите от взаимодействието на приложено външно електромагнитно поле с електромагнитното поле на вихровите токове, които се създават в изследван обект от същото това външно поле. За да се определи конкретната зона на контрол в контролирания обект (КО), е много важно да се познава характера на индуктираните вихрови токове. На базата на разработен модел в средата на Mag Net 7.4 е проведен числен експеримент и е изследвана формата на вихровите токове, индуктирани в КО с различна специфична електрическа проводимост – от 0,01 до 200 MS/m, при източник на периодичен импулсен възбудителен ток с правоъгълна форма на импулса.*
Ключови думи: *МКЕ, ударно възбуждане, импулсен вихровотоков преобразувател*

STUDY OF THE FORM OF A FLAT EDDY CURRENTS IN CONDUCTIVE MEDIUM AT PULSE EXCITATION

Kalinka Todorova

Abstract: *Electromagnetic eddy current method is based on results from the interaction of externally applied electromagnetic field with the electromagnetic field of the eddy currents are created in the object studied by the same external field. To determine the specific zone of control in the controlled object (CO) is very important to know the nature of the induced eddy currents. Based on the model developed in the mid Magnet 7.4 numerical experiment was carried out and evaluated is the form of eddy currents induced in the CO with different specific electric conductivity - from 0.01 to 200 MS / m, when a source of a periodic excitation current pulse of a rectangular a pulse.*
Key words: *FEM, shock excitation, pulse eddy current transducer*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Както е известно [1], при проникване на електромагнитно поле в проводяща веществена среда, в нея се индуктира електродвижещо напрежение и протичат вихрови токове. Разпределението и интензивността на тези вихрови токове зависят, както от геометричните и електро физични параметри на веществената среда, така и от различни параметри на възбудителната намотка и от взаимното разположение на средата и намотката. Интензивността и разпределението на

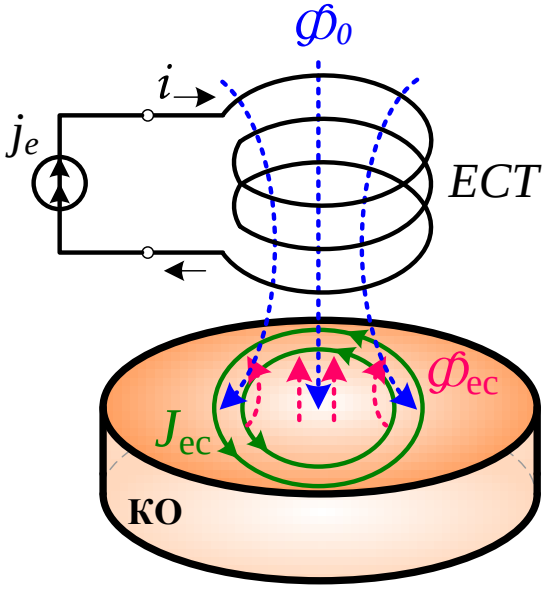
© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

вихровите токове е различно в различните участъци на проводящата среда. За целите на вихровотоковия контрол, за да се определят зоните на контрол, е важно да се познава характера на разпространение на вихровите токове в контролирания обект. За целите на вихровотоковия безразрушителен контрол [2, 3, 4, 5, 6, 7] все по-често се прилагат импулсните методи. При импулсните методи изходният сигнал е многомерен. Това разширява възможностите на вихровотоковия безразрушителен контрол.

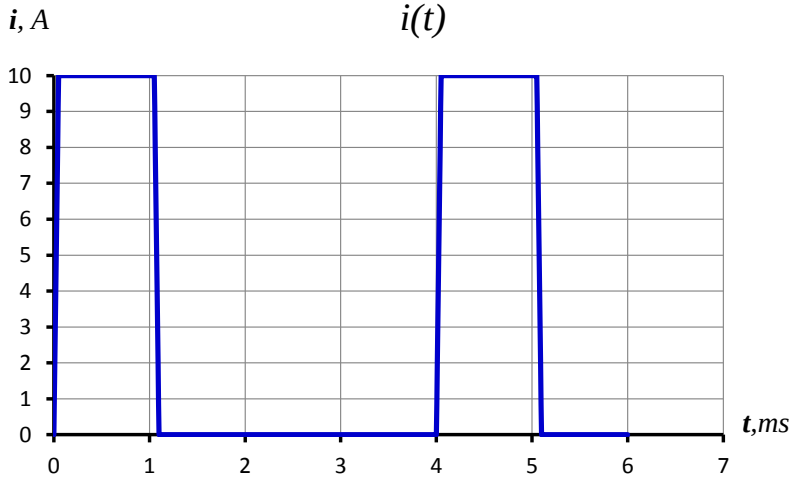
2. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Разглежда се (фиг.1) параметричен вихровотоков преобразувател (ВТП), захранен от идеален източник на ток. Входен сигнал за ВТП е токът $\boldsymbol{i} = \boldsymbol{j_e}$, а изходен – напрежението $\boldsymbol{u}$.



Фиг.1.

Възбудителният ток е периодична поредица от импулси с правоъгълна форма на импулса и честота $f=0.25\ kHz$ (фиг.2).



Фиг.2.

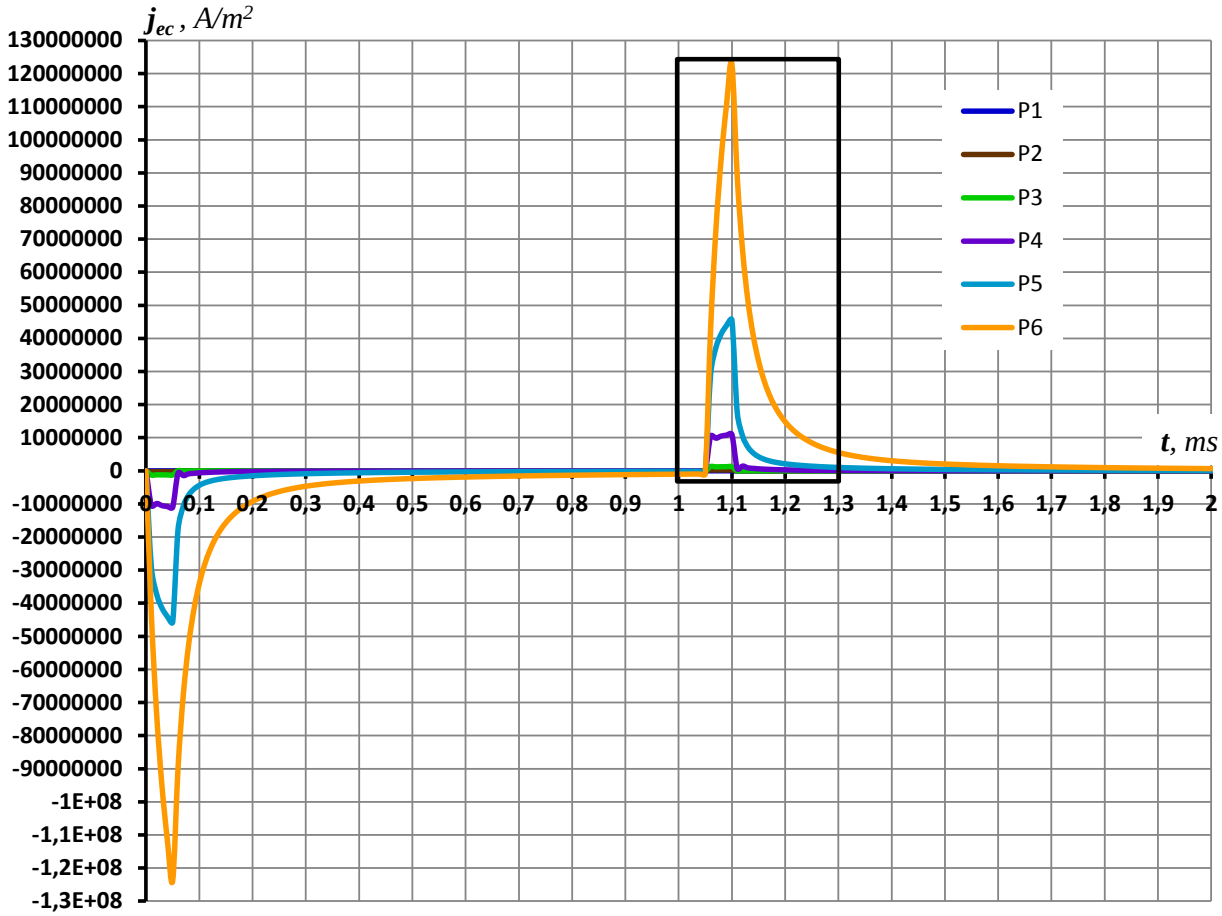
В средата на програмен продукт MagNet 7.4 е създаден е числен модел: образец (контролиран обект – КО), който е феромагнитен (μ=100) проводящ цилиндър

със специфична електрическа проводимост $\boldsymbol{\sigma}$, и ВТП. Вихровотоковият преобразувател е параметричен и представлява цилиндрична намотка от меден проводник. Той е разположен в непосредствена близост над КО и съосен с него (фиг.1). В модела е въведена параметризация по отношение на специфичната електрическа проводимост $\boldsymbol{\sigma}$ на контролирания обект. Изследва се формата на вихровите токове, индуктирани в образеца, за поредица стойности на специфичната електрическа проводимост $\boldsymbol{\sigma}$ на КО в диапазон – от 0,01 *MS/m* до 200 *MS/m*.

В среда на програмния продукт MagNet 7.4 [8] смесената задача (електрическа верига – полева задача) се решава по метода с крайните елементи.

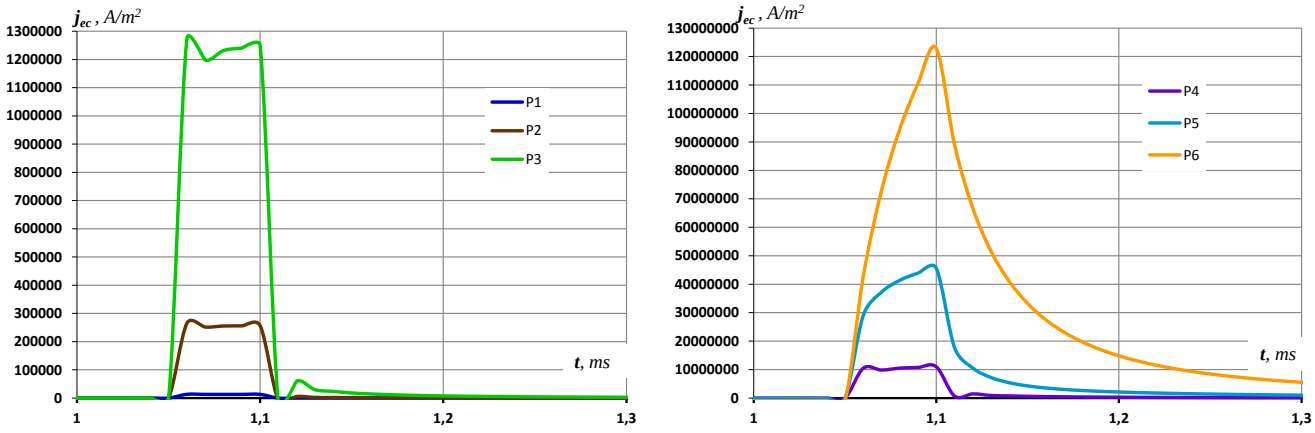
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Проведените числени експерименти показват, че формата на индуктираните в КО вихрови токове за различни стойности на специфичната електрическа проводимост се различават. На фиг.3 са показани осцилограми на плътността на вихровия ток в КО в точката с координати r = 8 mm и d = 0,01 mm при σ = 0,01 (P1); 0,2 (P2); 1 (P3); 10 (P4); 50 (P5); 200 (P6) MS/m.



Фиг.3.

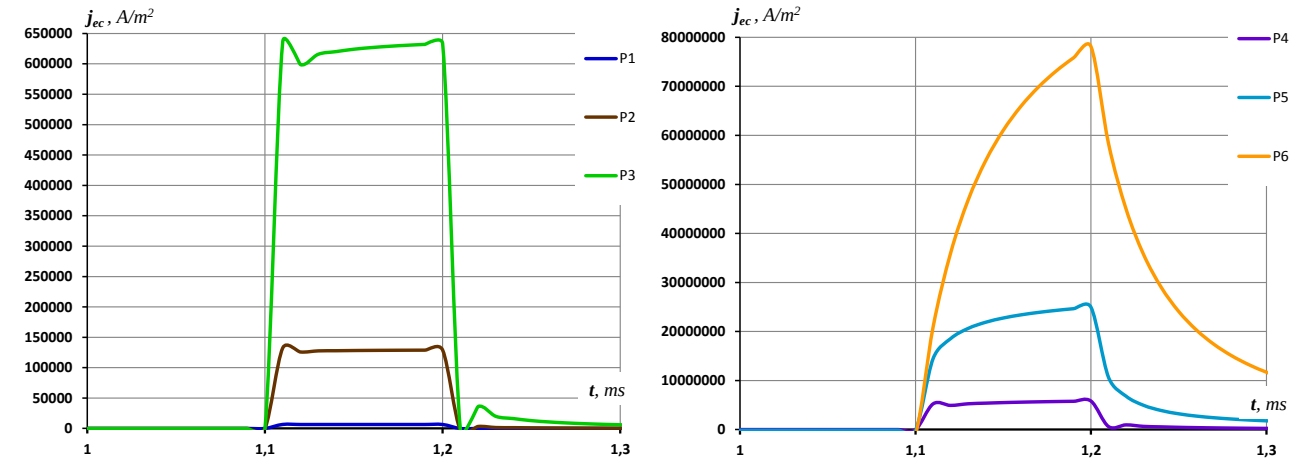
Тъй като амплитудата и формата на вихровите токове за различните стойности на специфичната електрическа проводимост значително се различават, на фиг.4 (фиг.4.а – P1, P2, P3; фиг.4.б – P4, P5, P6) е показан увеличен участъка от осцилограмата от фиг. 3, който е заграден в правоъгълник.



а б

Фиг.4.

Освен с възбудителен ток с правоъгълна форма на импулса от фиг.2, проведени са числени експерименти със същия модел, но формата на правоъгълните импулси на възбудителния ток са с по-широк фронт. Получените резултати, аналогични на тези от фиг. 4.а,б, са показани на фиг.5.а,б.



а б

Фиг.5.

4. АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Резултатите, получени от проведените числените експерименти може да се анализират така:

- При правоъгълен импулс на възбудителния ток (фиг.2) индуктираните в проводящия контролиран обект вихрови токове представляват еднакви по форма двуполярни импулси по време на фронтовете на тока;
- При малки и средни стойности на специфичната електрическа проводимост на КО (от 0,01 MS/m до 10 MS/m – P1÷P4) формата на импулсите на вихровите токове в началото и края на импулса на възбудителния ток е трапецовидна;
- При големи стойности на специфичната електрическа проводимост на КО (от 50 MS/m до 200 MS/m – P5, P6) формата на двуполярните импулси на вихровите токове в началото и края на импулса на възбудителния ток е приблизително триъгълна;

- Широчината на фронта на правоъгълния импулс на възбудителния ток влияе върху широчината на двуполярните импулси на вихровите токове, индуктирани в контролирания обект.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От проведените числени експерименти и направения анализ на получените резултати може да се направят следните изводи:

- При различни специфични проводимости на КО (в широк диапазон на изменение), когато се използва импулсен възбудителен ток с правоъгълна форма на импулса, за целите на вихровотоковия контрол като информационни параметри на индуктираните вихрови токове могат да се използват положителната и отрицателната амплитуди на двуполярните импулси;
- Влиянието на широчината на фронтовете на импулсите на възбудителния ток би могло да се използва, защото при по-широк фронт индуктираните вихрови токове могат да се характеризират и с параметри, свързани с площи на двуполярните импулси.

БЛАГОДАРНОСТ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор ДФНИ Е02/8 с Фонд „Научни изследвания“ при МОН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Цветков Д. и кол., Електромагнитна дефектометрия, ДИ „Техника“, София, 1981

[2] Zhou Deqiang, Binqiang Zhang, Guiyun Tian, Haitao Wang , Ping Wang, Hua Liang, Research on Surface Defect Detection Using Pulsed Eddy Current Testing Technology, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China

[3] Huang Chen, Xinjun WU, Shuqing Lin, Gongtian Shen, Development and Application of Pulsed Eddy Current Testing System for Ferromagnetic Pipes, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China

[4] Zergoug M., N.Boucherrou, Material Characterization by Pulsed Eddy Current,

[5] Preda Gabriel, Mihai Rebican, Florea Ioan Hantila, Pulse Eddy Currents Using an Integralfem Formulation for Cracks Detection, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 33 (2010), 1225–1229

[6] Smetana Milan, Tatiana Strapacova, Ladislav Janousek, Klara Capova, Pulsed Eddy Currents: A New Trend in Non-Destructive Evaluation of Conductive Materials, 17th Symposium IMEKO TC 4, 3rd Symposium IMEKO TC 19 and 15th IWADC Workshop Instrumentation for the ICT Era Sept. 8-10, 2010, Kosice, Slovakia, 238-243

[7] Menana Hocine, Mouloud Fe´liachi, Contribution to the Modeling of a Voltage Driven Pulsed Eddy Current Sensor for The Characterization of Conductive Plates, Analog Integr Circ Sig Process (2011) 69: 75–80

[8] www.infolytika.com

Автор: Калинка Тодорова, гл. ас. д-р инж., катедра "Обща електротехника" (ОЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ktodorova@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Стефчо Гунински

КОНСТРУКТИВНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВАКУУМНИ ПРЕКЪСВАЧИ ЗА ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ

Росен Танев, Валентин Матеев, Илиана Маринова

Резюме: *В статията са изследвани някои изменения на конструкцията на вакуумна дъгогасителна камера. Предложените конструктивни изменения са при: защитния екран, формата на контактните тела, пропорциите и габаритните размери на вакуумната камера. Използвани са числени модели за определяне на интензитета на електрическото поле в режим на изключване на камерата. Получените резултати се използват за определяне на конструкцията с най-ниско работно натоварване по отношение на интензитета на електрическото поле.*
Ключови думи: *Дъгогасителна камера, вакуумен прекъсвач, електрически модели, интензитет на електрическото поле*

CONSTRUCTIVE IMPROVEMENTS OF HIGH VOLTAGE VACUUM INTERRUPTERS

Rosen Tanev, Valentin Mateev, Iliana Marinova

Abstract: *In this paper are modeled six modification of arc-extinguishing vacuum chamber. The proposed structural changes are in: metal vapor condenser shield, shape of contacts, the proportions and dimensions of the vacuum chamber. Models are used for investigation of electric field intensity in switching off regime. The results are used to determine the construction with the lowest intensity of electric field in the chamber.*
Keywords: *arc-extinguishing vacuum chamber, vacuum interrupter, electrical models, intensity of electric filed*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

За изследване и оценка на ефективността, на дъгогасителната система на комутационните апарати за високо напрежение, в процеса на проектиране се използват статични и динамични числени модели [1-4]. Както е известно прекъсването на веригата под товар е съпътствано от появата на електрическа дъга в контактната система на комутиращото устройство, чието моделиране е затруднено поради наличието на множество, паралелно протичащи и взаимно свързани ефекти и процеси. Тези ефекти са динамични, възникват главно в кратковременния преходен процес при прекъсване на веригата, с продължителност до няколко

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

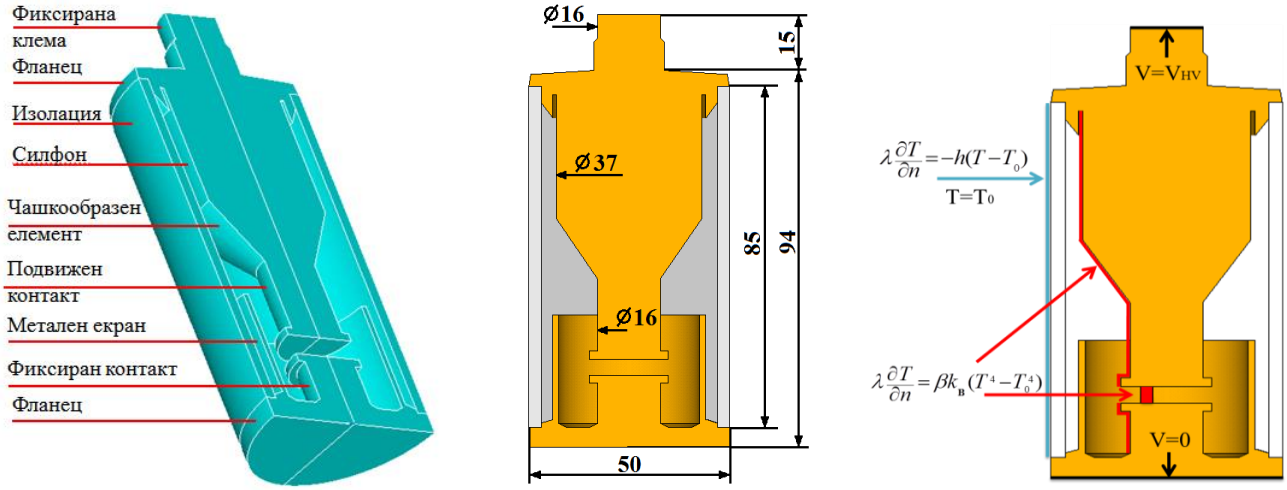
ISSN 1311-0829

милисекунди. Необходимо е съвместно изследване на електрически, топлинни, магнитни, механични и др. полета, при отчитане на промяната в материалните характеристики при високи температури, скорости и значителни механични усилия. Основна цел при тези изследвания е точното определяне на интензитета на електрическото поле, което се взема предвид при оценка на ефективността на конструкцията, пробивното напрежение, възстановяващото се напрежение, времето и условията за съществуване на разряда и др. Особено актуално стоят тези въпроси при вакуумните дъгогасителни системи. Също така посредством компютърното моделиране се постига съществено редуциране на времето за проучване, проектиране, разработка на такива комутационни системи и оценка на възможни конструктивни модификации в тях.

В настоящата работа е създаден компютърен модел на вакуумна дъгогасителна камера (ВДК) на прекъсвач за високо напрежение. Посредством модела са получени резултати за разпределението на интензитета на електрическото поле при изключване на прекъсвача. След изграждане на първоначалния модел и маркиране на областите с най-голямо натоварване са направени предложения за конструктивни изменения по дъгогасителната камера на прекъсвача. Основно са предложени изменения в контактната система и в защитния екран, като е направен и анализ на базовата конструкция при промяна на габаритните и размери. Получените резултати са систематизирани и анализирани.

2. БАЗОВ МОДЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНАТА ВАКУУМНА КАМЕРА

Обект на изследване е вакуумна камера, показана на фиг.1, с обявени работни данни: напрежение U = 12 kV, ток I = 400 A. [2-3].



а) конструктивни елементи б) размери в) гранични условия

Фиг.1. Вакуумна камера.

За определяне на интензитета на електрическото поле е използван динамичен модел в програмна среда ANSYS Multiphysics 12.1 [4]. Зададените гранични условия при моделиране на базовата конструкция на камерата са показани на фиг.1- в). На фигурата са отбелязани и граничните условия за топлинна задача [2-3].

Разпределението на електрическото поле във вътрешността на вакуумната камера при наличие на горяща електрическа дъга се описва с уравнението на Лаплас [5].

$$\nabla\left(\sigma_a \nabla V\right) = 0, \tag{1}$$

където σ_a е електрическата проводимост на дъгата, зависеща от интензитет на електрическото поле и температурата на дъгата, V- скаларният електрически потенциал. Интензитетът на електрическото поле се дефинира като

$$E = -\nabla V\,. \tag{2}$$

Плътността на тока в дъговия стълб J_a е

$$J_a = \sigma_a E\,. \tag{3}$$

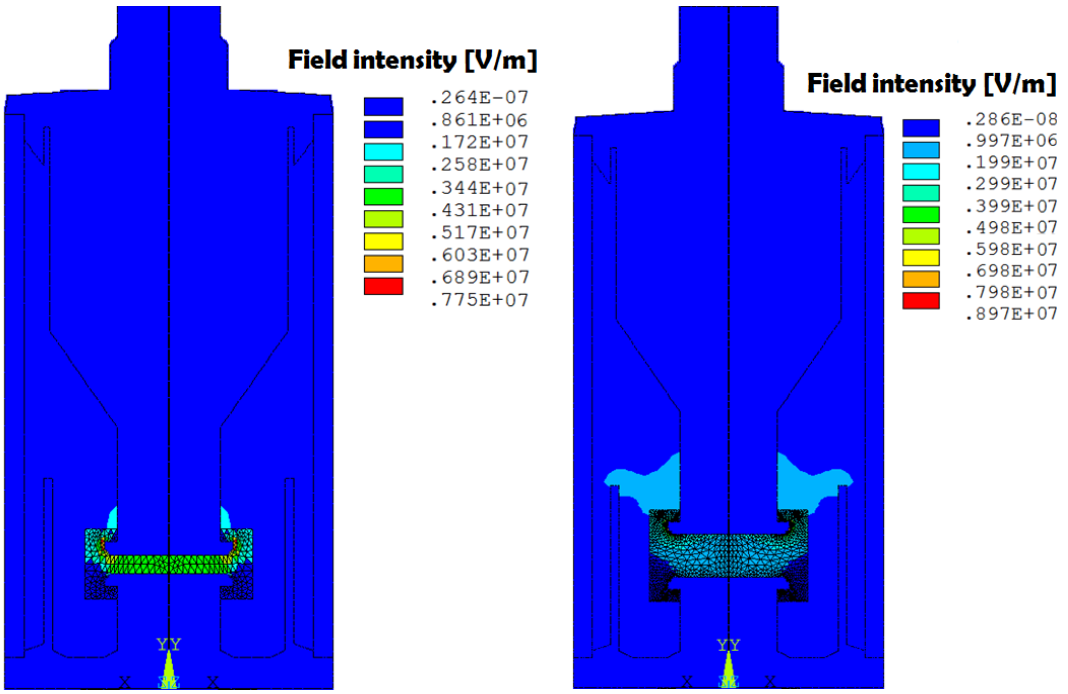
Електрическата проводимост на дъгата, зависеща основно от свободните електрони в зоната на разряда [6-7], се определя с помощта на израза

$$\sigma_a = ne\mu_e = \frac{ne^2}{m_e \nu_m}, \tag{4}$$

където n е брой свободни електрони, участващи в разряда, m_e -маса на електрона, ν_m -скорост на електрона, μ_e - мобилност на електрона и e - заряд на електрона. Средната скорост на електрон в областта на дъговия разряд е

$$\nu_m = -\frac{e}{m_e \nu_d} E\,, \tag{5}$$

където ν_d е скорост на дрейфа на електрона, която зависи от температурата в областта на електрическия разряд [8-9].



а) D = 3 mm **б)** D = 7 mm

Фиг.2. Интензитет на полето.

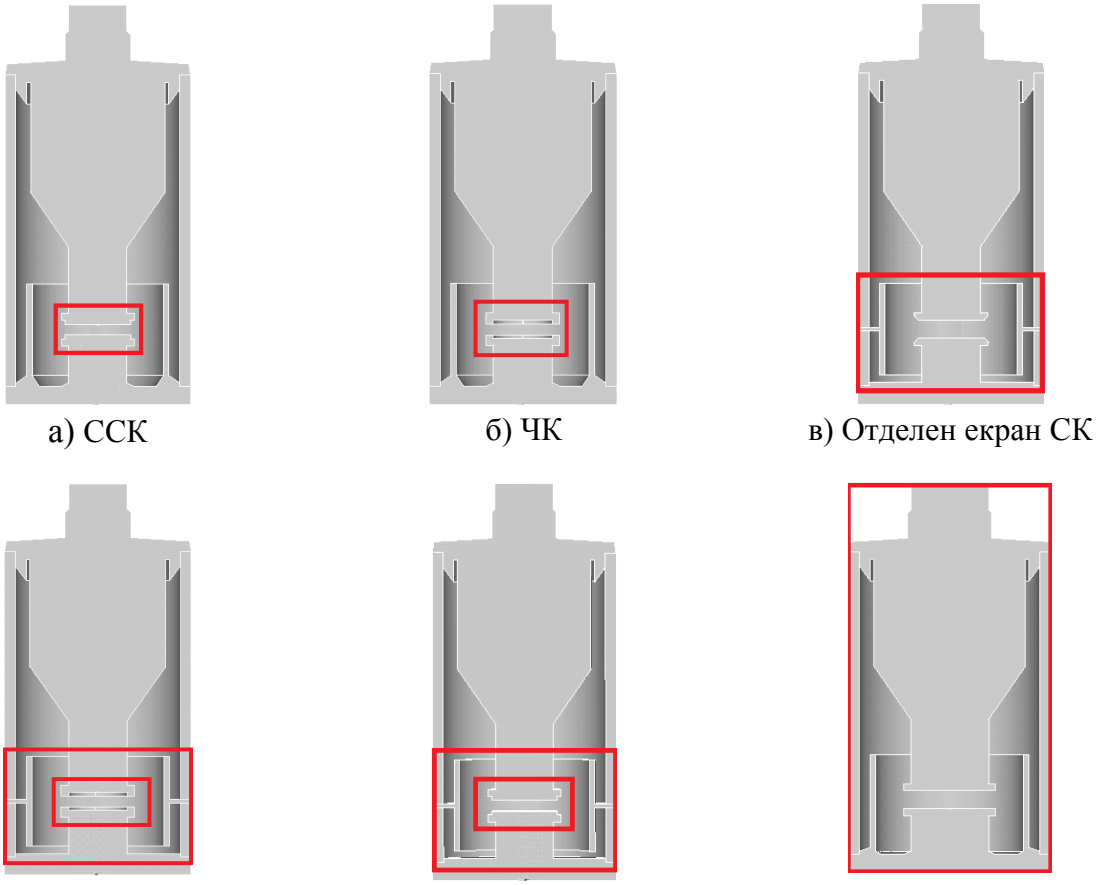
От получените резултати за базовият модел [2-3] се виждат някои особености и проблемни области на моделираната конструкция (фиг.2). Например наличието на високи стойности на интензитет в ръбовете на защитният екран, който е част от неподвижния контакт. Друга забелязана негативна особеност, е че при определен разтвор на контактната система, разстоянието между подвижният контакт и екрана е по-малко от това между двата контакта фиг.2-б, което при определени условия води до възможна нежелана поява на разряд в този участък.

За избягване на тези недостатъци са предложени конструктивни изменения като:

- Различни контактни системи, в който се очаква понижаване на максималните стойности на електрическия интензитет на полето.
- Конструкции при който се използва отделен защитен екран.
- Вакуумни дъгогасителни камери с променени габаритни размери.

3. ИЗСЛЕДВАНИ КОНСТРУКТИВНИ ИЗМЕНЕНИЯ

На фиг.3 са маркирани моделираните конструктивните изменения, спрямо първоначалния модел, на изследвания вакуумен прекъсвач (фиг.1).



а) ССК б) ЧК в) Отделен екран СК

г) Отделен екран ЧК д) Отделен екран ССК е) Увеличени ГР

Фиг.3. Предложени конструктивни изменения на ВДК

Представени са модели на конструкции с отделен от контактната система защитен екран фиг.3-в,-г,-д. Също модели с различни форми на контактните повърх-

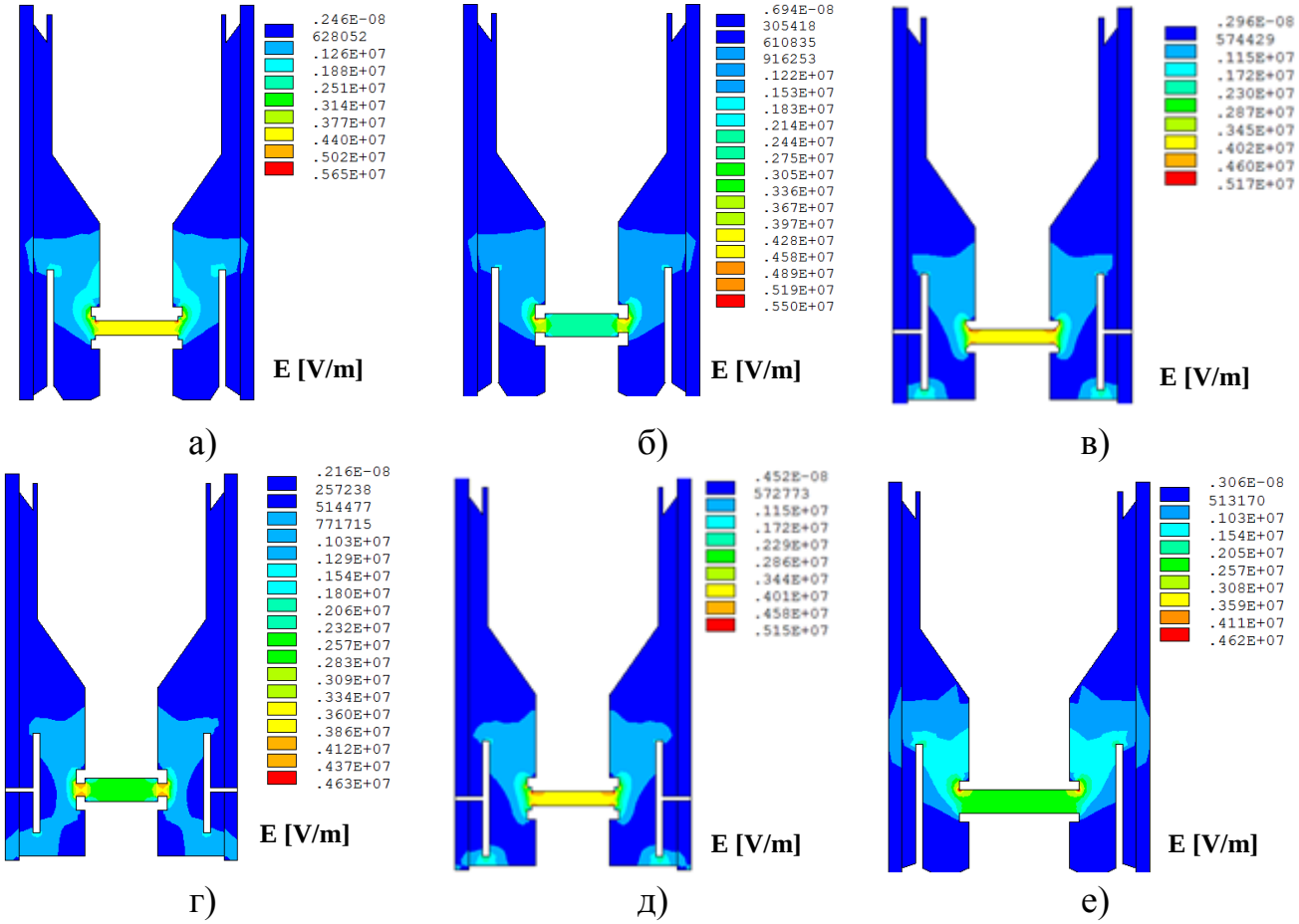
нини (в настоящата работа са изследвани три различни варианта за формата на контактните тела):

- фиг.3-а) Стъпаловидно скосени контакти (ССК)
- фиг.3-б) Чашкообразни контакти- (ЧК)
- фиг.3-в) Скосени контакти- (СК)

Моделирана конструкция с увеличение в габаритни размери (ГР) е показана на фиг.3-е.

4. РЕЗУЛТАТИ

На фиг.4 са показани резултатите от моделираните нови конструкции на вакуумна дъгогасителна камера. Резултатите са получени чрез програмна среда ANSYS за разтвор на контактната система D = 3 mm, която е критична при гасене на дъгата.



Фиг.4. Резултати за електрическия интензитет на полето за новите конструкции на ВДК

Максималните стойности на интензитета са по ръбовете на контактната система. Ниски максимални стойности на интензитета на електрическото поле се наблюдават на:

- Фиг.4-в), където е използван отделен защитен екран и контактна система със скосени ръбове.
- При конструкцията от Фиг.4-е). Тя е с отделен екран и малка контактна повърхност и стойности на E_{max} =4,63×10^6 V/m.
- Както и на Фиг.5-г), където е представена конструкция с по-големи габаритни размери , като за нея стойностите на интезитетета E_{max}= 4,62×10^6 V/m.

От разгледаните конструкции се вижда, че по-добра спрямо стойността на E_{max} е ВДК от Фиг.4–г), която е с отделен защитен екран и чашкообразни контактни тела.

За всички разгледани конструкции са налице по-ниски максимални стойности на интензитета на електрическото поле, спрямо резултатите от първоначално моделираната конструкция, фиг.2.

В табл.1 са представени разликите между максималните стойности на електрическия интензитет на полето E_{max} за анализираните конструкции на ВДК. Положителните стойности маркират с колко е по-нисък E_{max} в разглежданата конструкция, а отрицателните стойности означават, че се наблюдават повишени стойности E_{max}.

Таблица 1

Разлика в максималните стойности
на електрическия интензитет
на изследваните конструкции

Отделен защитен екран	**Отделен защитен екран**		
	Базова	Стъпаловидно скосени контакти	С чашкообразни контактни елементи
Базова	–	-0,02 kV/mm	-0,54 kV/mm
Стъпаловидно скосени контакти	0,02 kV/mm	–	-0,52 kV/mm
С чашкообразни контактни елементи	0,54 kV/mm	0,52 kV/mm	–
Със защитен екран свързан към неподвижния контакт			
Базова	2,58 kV/mm	2,6 kV/mm	3,12 kV/mm
Стъпаловидно скосени контакти	0,48 kV/mm	0,5 kV/mm	1,02 kV/mm
С чашкообразни контактни елементи	0,33 kV/mm	0,35 kV/mm	0,87 kV/mm
С увеличаване на габаритните размери	-0,55 kV/mm	-0,53 kV/mm	-0,01 kV/mm

5. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

След преглед и внимателен анализ на така структурираните резултати става ясно, че при използване на отделен екран се наблюдава понижаване на максималните стойности на интензитета. От разгледаните форми на контактите, най-добър резултат дава чашкообразния тип на контактната система, при която също има спад на стойностите на E_{max}. От табл.1 се вижда, също че при увеличаване на габаритните размери на ВДК E_{max} намалява. Същият е и резултата при налични: чашкообразен контакт и отделен защитен екран. Изхождайки от факта, че резултатите се доста близки за конструкциите от фиг.4-г и фиг.4-е и от увеличеното количество на материал (оскъпяване на ВДК), се достига до заключението, че конструкцията, показана на фиг.4-е е най-добър вариант, т.е. това е конструкцията с отделен екран и чашкообразна контактна система.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направен е анализ на модифицираните конструкции на ВДК и контактната ѝ система. Определена е най-добрата от разгледаните конструкции, съгласно дефинираните работни условия.

От получените резултатите, и след направен анализ се достига до заключението, че конструкцията с отделен екран и чашкообразна контактна система е с най-добри показатели от разгледаните варианти. Тази типова конструкция крие потенциал за бъдеща систематична оптимизация и провеждане на по-задълбочен анализ в динамичен режим. Следва и потвърждаване на получените резултати в експериментална среда.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор 142ПД0050-01, от Вътрешния конкурс на ТУ - София - 2014.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Cadick J. (2012), ***Predicting the remaining life of vacuum interrupters in the field***, Finley Ledbetter, Group CBS Alan Seidel, 2012

[2] В. Матеев, Р. Танев, И. Маринова, на тема "***Моделиране на преходни процеси във вакуумен прекъсвач за високо напрежение"***, в VI Научна конференция ЕФ 2014, pp.393-402

[3] Mateev V., R. Tanev, I. Marinova, ***Simulation of electric and thermal fields of high voltage interrupter vacuum chamber***, Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bulgaria, 2014, pp. 133-136

[4] ANSYS Inc., ANSYS Release 12.1**, Documentation Manual**. 2010

[5] Yatchev I., I. Marinova (2007), ***Numerical Analysis and modeling of circuits and fields***, Technical University of Sofia, 2007

[6] A. Piel, ***Plasma physics, an introduction to laboratory, space and fusion plasmas***, Springer, 2010

[7] K. Miyamoto, ***Fundamentals of plasma physics and controlled fusion***, NIFS-PROC.48, Sep. 2000

[8] H. Maecker, H. Popp, ***The electric arc: the physics of stationary gas discharges near thermal equilibrium***, Berg: Popp, 2009

[9] Nakano Y., H. Kojima, K. Tsuchiya, H. Okubol (2014), ***Pre-discharge and flashover characteristics of impulse surface discharge in vacuum, dielectrics and electrical insulation,*** IEEE transactions of Dielectrics and Electrical Insulation, vol.21, 2014, pp. 403-410

Автори: Росен Танев, маг. инж., докторант, катедра „Електрически апарати“ Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *rtanev@tu-sofia.bg*; Валентин Матеев, маг. инж. гл. ас., катедра „Електрически апарати“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vmateev@tu-sofia.bg*; Илиана Маринова, проф. дтн. инж., катедра „Електрически апарати“, Електротехнически Факултет, Технически университет - София, E-mail address: *iliana@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Никола Трифонов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ОТМЕСТВАНЕТО ВЪРХУ ИЗХОДНИЯ СИГНАЛ НА ВИХРОВОТОКОВ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНИ НАМОТКИ

Ивайло Долапчиев

Резюме: *Работата представя изследване на влиянието на отместването върху изходния сигнал на вихровотоков преобразувател с перпендикулярни намотки. Проведената числена симулация на взаимодействието между преобразувателя и обект с дефект показа минимално влияние на отместването върху изходния сигнал. Същевременно е установено, че при определено разположение на преобразувателя, реалната компонента на изходното му напрежение е пропорционална на дълбочината на дефекта.*
Ключови думи: *вихровотоков преобразувател, ефект на отместването, оразмеряване на дефект, числен анализ*

AN INVESTIGATION ON THE INFLUENCE OF THE LIFT-OFF EFFECT ON THE OUTPUT SIGNAL OF THE EDDY CURRENT SURFACE PROBE WITH PERPENDICULAR COILS

Ivaylo Dolapchiev

Abstract: *This work presents an investigation on the influence of the lift-off effect to the output signal of an eddy current surface probe with perpendicular coils. The conducted numerical simulation on the interaction between the probe and a specimen with a flaw show minimal lift-off noise in the output signal. In addition to that it was determined that in some particular probe positions the in-phase component of the signal is proportional to the flaw depth.*
Keywords*: eddy current probe, lift-off effect, crack sizing, numerical analysis*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Вихровотоковите методи за безразрушителен контрол се използват при повърхностен и подповърхностен контрол на метални изделия. Те са предпочитани заради голямата скорост на контрола, липсата на контакт с изследвания обект и заради възможността контролът да се провежда, както по време на експлоатация на съоръженията така и по време на тяхното производство.

Методите се основават на изследване на разпространението на вихровите токове индуцирани в повърхностния слой на изследвания обект. Всяка промяна в тяхното разпределение се дължи или на наличие на дефекти в структурата или на промяна в електромагнитните свойства на изследвания материал, което се регистрира от вихровотоков преобразувател (ВТП). За съжаление изходният сиг-

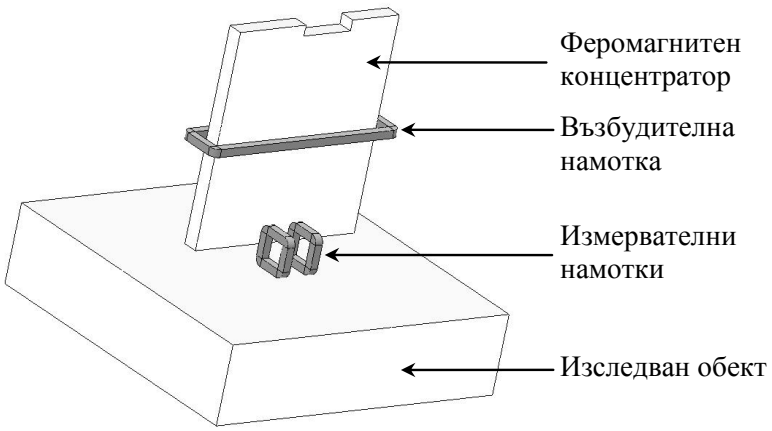
© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

нал на ВТП зависи не само от особеностите на изследвания обект, но и от разположението на преобразувателя спрямо неговата повърхност.
Конвенционалните ВТП притежават намотки, които са разположени паралелно на изследваната повърхност. Възбудителната им намотка създава променливо магнитно поле, което причинява протичане на вихрови токове в повърхностния слой на изследвания обект. Напрежението, индуктирано в измервателните намотки на ВТП, които са разположени върху повърхността на обекта, е пропорционално на плътността на вихровите токове. Ако не се променя магнитната връзка между намотките и изследвания обект, всяка промяна в индуктираното напрежение следва да се дължи на промяна на неговата хомогенност.
Практическото изпълнение на контрола е свързано с ръчно придвижване на ВТП по изследваната повърхност, което неизбежно променя разстоянието между обекта и ВТП. Това отместване изменя магнитната връзка и предизвиква случайни и съществени изменения в изходния сигнал на ВТП. Използваните методи за намаляване на влиянието на ефекта от отместване са свързани с модифициране на фазата на изходното напрежение на ВТП. Така за свойствата на изследвания обект следва да се съди само по амплитудата на изходния сигнала на преобразувателя, която зависи от всички характеристики на материала и от съществуващите в него нееднородности.
Измервателните намотки на идеалните ВТП следва да събират информация само за промяната на разпространението на вихровите токове, причинено от наличие на дефект. Един от съществените недостатъци на съществуващите конструкции на ВТП е влиянието на магнитното поле на възбудителната намотка върху изходния сигнал на преобразувателя. Неговото изменение под влияние на отместването наподобява наличие на дефект в изследвания материал, което съществено влошава качеството на безразрушителния контрол [1]. Този недостатък на ВТП може да се преодолее, ако възбудителната и измервателни намотки на преобразувателя се разположат в перпендикулярни равнини [2, 3].
Настоящата работа представя изследване на влиянието на отместването върху изходния сигнал на преобразувател, изграден на база приложението на споменатите по-горе принципи [4]. Той комбинира някои от конструктивните особености на известните “theta” и “plus” ВТП, но поради различното разположение на намотките, предлага възможност за определяне на някои параметри на дефектите при подходяща обработка на изходния сигнал.

2. ВТП С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНИ НАМОТКИ

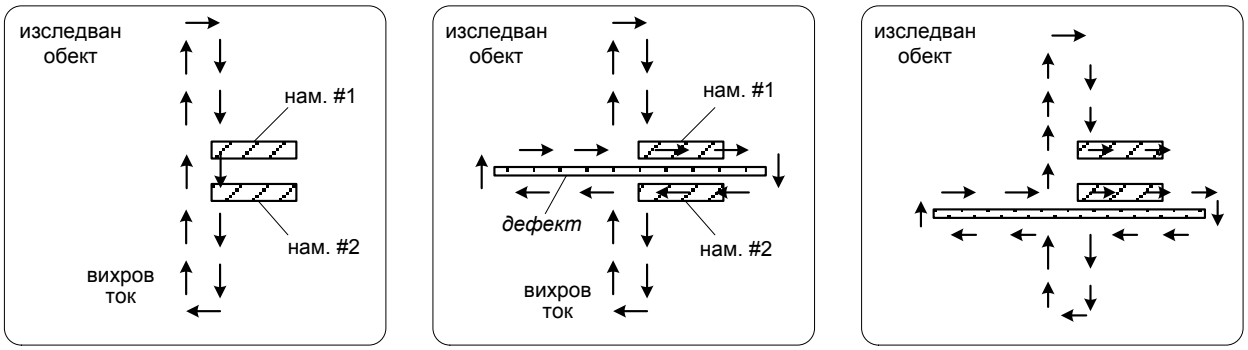
ВТП, предмет на настоящото изследване, се състои от правоъгълна по форма възбудителна намотка навита върху феромагнитен концентратор и две правоъгълни измервателни намотки, поставени тангенциално спрямо повърхността на изследвания обект и феромагнитния концентратор, фиг.1. С помощта на концентратора, създадените в изследвания обект вихрови токове се съсредоточават в участък от повърхността, която наподобява проекцията на възбудителната намотка върху изследвания обект. Разположението на възбудителната намотка е подбрано така, че да се гарантира голяма плътност на вихровите токове в достатъчно широк участък от повърхността на изследвания обект.



Фиг.1. ВТП с перпендикулярни намотки

Избраното разположение на измервателните намотки гарантира, че при липса на дефект в изследвания обект, вихровите токове протичащи по повърхността на материала ще се движат по оста на намотките и няма да индуктират напрежение в тях, фиг.2.а.

Наличието на дефект в изследвания обект, променя посоката на разпространение на вихровите токове, като част от тях, заобикаляйки дефекта, индуктират напрежение в измервателните намотки, фиг.2.б,в. Ако дефектът е разположен в пространството между намотките, индуктираните напрежения са в противофаза, фиг.2.б, а извън това пространство са във фаза, фиг.2.в. Така при серийно свързване на измервателните намотки, ВТП ще генерира изходен сигнал, пропорционален на разликата на индуктираните в тях напрежения, ако дефектът се намира между намотките. Извън тази област изходният сигнал ще е пропорционален на сумата на същите напрежения.



а) обект без дефект б) обект с дефект между намотките в) обект с дефект извън намотките

Фиг.2. Разпространение на вихровите токове в изследвания обект

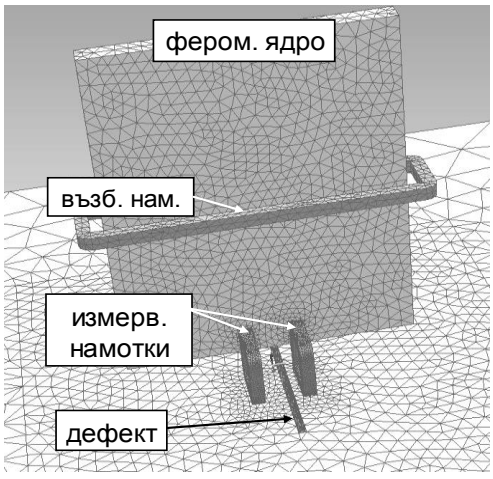
Предлаганата конструкция на ВТП предполага липса на изходен сигнал при отсъствие на дефект, съществено нарастване на амплитудата му в околностите на дефекта и спадане до нулеви стойности при разполагане на измервателните намотки на ВТП симетрично от двете страни на дефекта. Локализирането на де-

факти с подобен ВТП е свързано първоначално с регистриране на съществено нарастване на амплитудата на изходния сигнал, което отразява приближаване до област в материала, притежаваща някаква нееднородност. Последващото сканиране на тази област и установяване на минимална стойност на изходния сигнал позволява да се локализира дефектът.

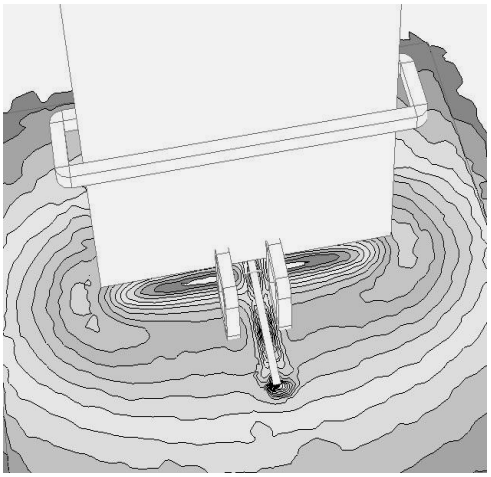
3. ЧИСЛЕН АНАЛИЗ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО ВТП – ИЗСЛЕДВАН ОБЕКТ

Изследването на взаимодействието на разглеждания ВТП с обект с дефект е извършено върху числен модел, който съдържа: феромагнитен концентратор с размери 2×23×27mm и относителна магнитна проницаемост 1000, възбудителна намотка и две измервателни намотки. Всички намотки са с напречно сечение $1mm^2$, като измервателните, които са разположени от едната страна на феромагнитния концентратор са с вътрешни размери 3×3mm, фиг.3.

Изследваните обекти са месингови плочи с дебелина 20mm, всяка една от които съдържа по един дефект с дълбочина 2, 4 или 6mm и широчини съответно 0,2; 0,4 или 0,6mm. Дължината на всички дефекти е 20mm. Дебелината на плочите е избрана да бъде три пъти по-голяма от стандартната дълбочина на проникване на вихровите токове, при използваната честота на тока във възбудителната намотка 20kHz. Сканирането на повърхността на плочите е извършвано перпендикулярно на дължината на дефекта.



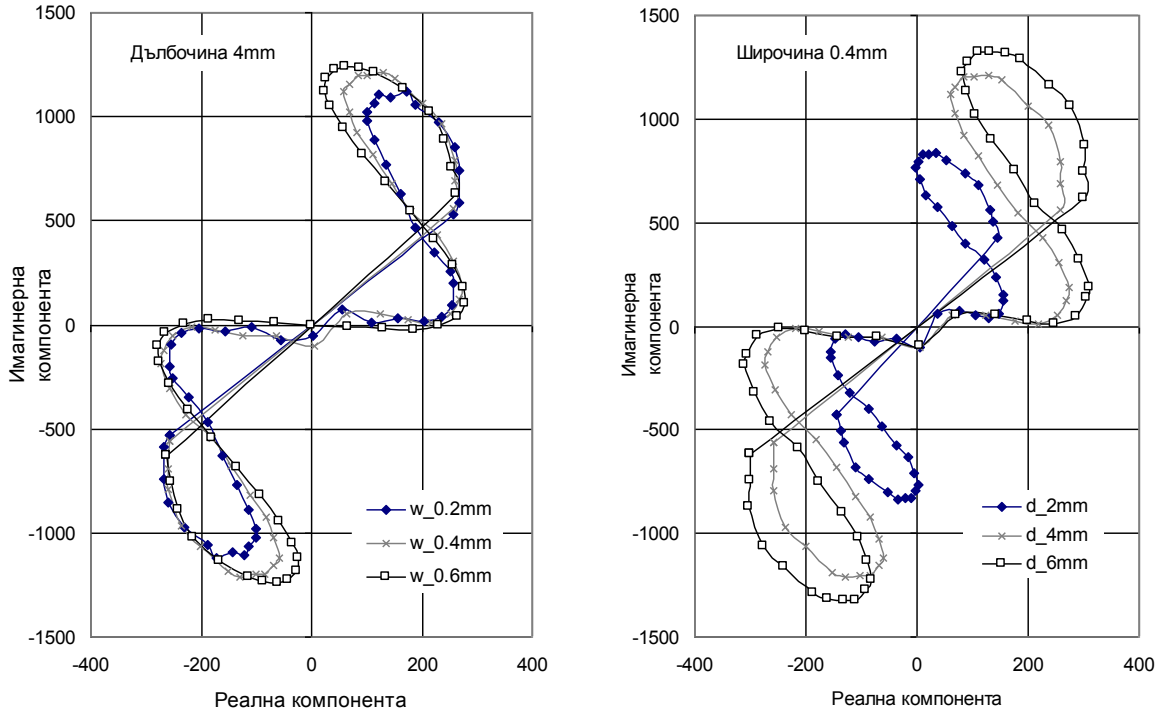
Фиг.3. Изчислителен модел



Фиг.4. Разпределение на вихровите токове по повърхността

Описаният модел е използван за провеждане на числена симулация на вихровотоков безразрушителен контрол. Анализът на електромагнитното взаимодействие между ВТП и изследвания обект с дефект, се основава на приложението на метода на крайните елементи. Задачата е решена като тримерна с използване на софтуерния пакет Magnet 7.4 [5]. Изчислените стойности на магнитния вектор потенциал във възлите на мрежата от крайни елементи позволяват, да се определи индуктираното напрежение във всяка измервателна намотка, да се изчисли изходния сигнал на ВТП и да се визуализира разпределението на вихровите токове в изследвания обект, фиг.4.

Симулирането на вихровотоковия контрол изисква решаване на електромагнитната полева задача за различни положения на ВТП, равномерно разпределени от двете страни на дефекта. Получените резултати за изходния сигнал на ВТП са представени в комплексната равнина, като са обединени резултатите за дефекти с еднаква дълбочина и широчина, фиг.5. С увеличаване на широчината на дефекта, кривата на изходния сигнал се деформира към имагинерната ос, т.е. реалната компонента на сигнала намалява, а имагинерната - слабо нараства. Точно противоположно е влиянието на дълбочината на дефекта, където с нарастване на дълбочината, нарастват и двете компоненти на изходния сигнал.



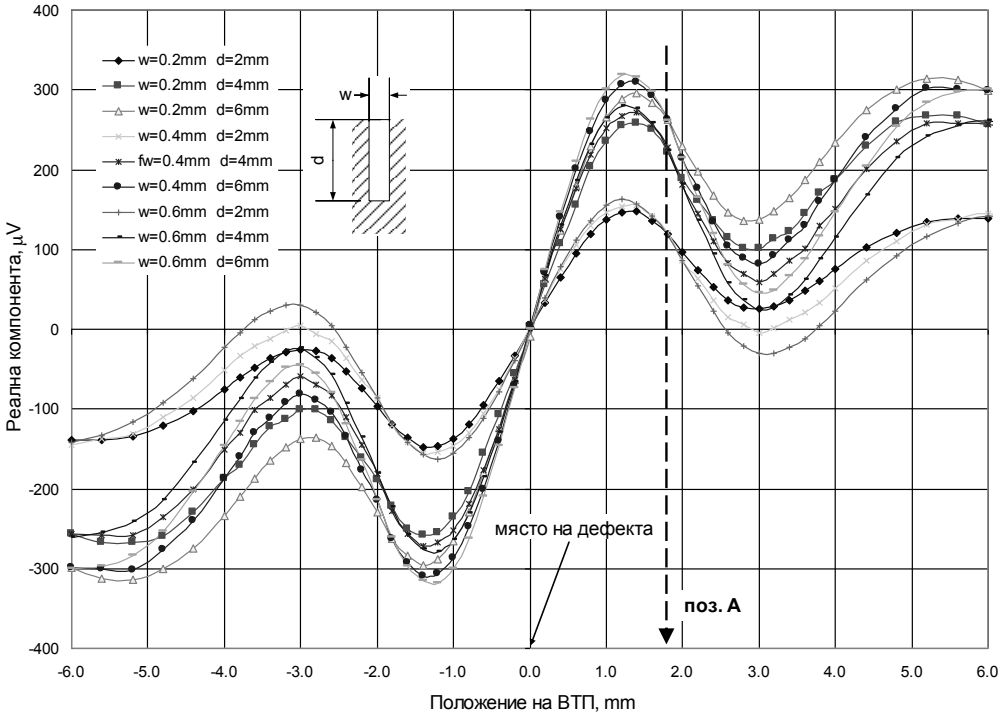
Фиг.5. Влияние на размерите на дефекта върху изходния сигнал на ВТП

Анализът на изменението на изходния сигнал на ВТП в процеса на сканиране показва, че при определени положения на преобразувателя спрямо дефекта, е възможно да се извлече информация за неговата дълбочина. Реалната компонента на сигнала приема нулева стойност, когато дефектът е равно отдалечен от двете намотки. При отклонение от това положение, тази компонента рязко нараства и при разполагане на една от намотките върху дефекта, характеристиката се стреми към локален екстремум, фиг.6. Излизането на дефекта от тази област предизвиква ново нарастване на реалната компонента, която след отдалечаване от дефекта, постепенно намалява до достигане на нулева стойност.

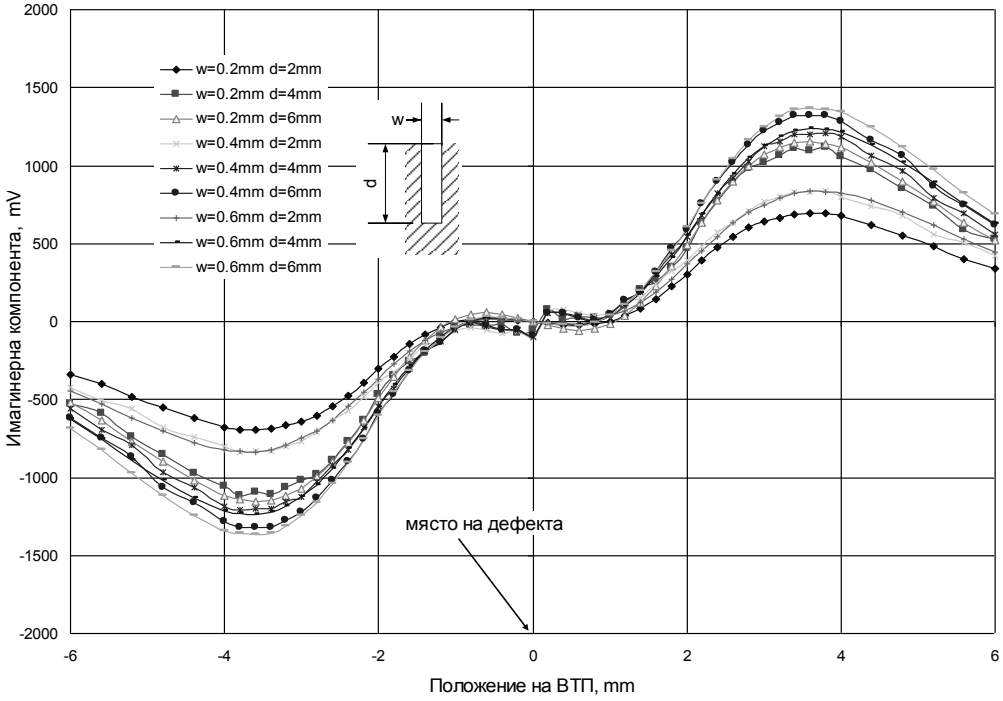
Проведените изследвания показват, че независимо от размера на дефекта, реалната компонента на изходния сигнал на ВТП приема нулева стойност, когато измервателните намотки на ВТП са разположени симетрично от двете страни на дефекта. Същевременно при навлизане на дефекта под една от измервателните намотки, разглежданата компонента на изходния сигнал не се влияе от широчината на дефекта, а само от дълбочината му (поз. А, фиг.6).

Въпреки своята значителна амплитуда, изменението на имагинерната компонента на изходния сигнал не предлага възможности за определяне на останалите

параметри на дефекта. Тя също приема нулева стойност, когато дефектът е разположен в средата на областта между измервателните намотки. Извън тази област, нейната амплитуда нараства, след което постепенно затихва с отдалечаване на дефекта от зоната на контрола, фиг.7.



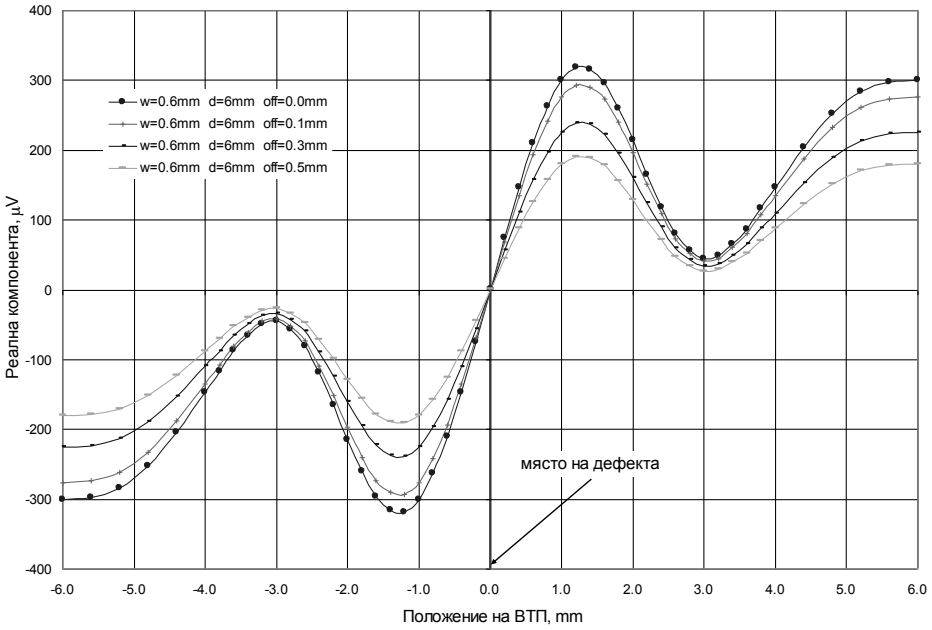
Фиг.6. Изменение на реалната компонента на изходното напрежение



Фиг.7. Изменение на имагинерната компонента на изходното напрежение
Изследваните дефекти са с дължина надвишаваща многократно размера на контролираната от ВТП област, поради което влиянието и не е анализирано.

4. ВЛИЯНИЕ НА ОТМЕСТВАНЕТО ВЪРХУ ИЗХОДНОТО НАПРЕЖЕНИЕ НА ВТП

Изследването на влиянието на отместването на ВТП е проведено чрез решаване на описаната електромагнитна полева задача за всичките образци с дефекти при промяна на разстоянието между ВТП и изследвания обект. Използваните стойности на отместването “ off ” са от 0,1mm до 0,5mm със стъпка 0,1mm. Отместването не променя характера на разпространение на вихровия ток, но предизвиква намаляване на неговата плътност, което съчетано с влошената магнитна връзка между образеца и ВТП намалява амплитудата на индуцираните в измервателните намотки напрежения. Получените резултати за изменение на реалната компонента на изходното напрежение за образеца, притежаващ дефект с най-големи размери, са представени на фиг.8.



Фиг.8. Изменение на реалната компонента на изходното напрежение при различни стойности на отместването “ off ”

Имагинерната компонента на изходното напрежение също намалява амплитудата си с отместване на ВТП, но запазва характерът си на изменение. И двете компоненти приемат близки до нулата стойности когато измервателните намотки на ВТП са разположени от двете страни на дефекта и са еднакво отдалечени от него. В околностите на дефекта, с нарастване на отместването, промяната на изходния сигнал на ВТП е по-слабо изразена.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работата представя резултатите от изследването на нов тип ВТП предназначен за повърхностен вихровотоков контрол на електрически проводящи обекти. Предложената конструкция на преобразувателя гарантира минимално влияние на отместването при локализиране на нееднородности в материалите. Използваната комбинация от малки по размери измервателни намотки, съчетана с наличие на феромагнитен концентратор във възбудителната намотка, ограничава

разпространението на вихровия ток в материала и намалява влиянието на дължината на дефекта върху изходния сигнал. Същевременно разполагането на двете измервателни намотки в различни равнини, променя съществено характера на изменение на изходния сигнал ВТП при наличие на дефект.
Представеният ВТП притежава характеристики, които съществено го отличават от използваните преобразуватели. Конвенционалните ВТП регистрират наличието на дефекти при рязка промяна в амплитудата на изходното си напрежение, което ги прави силно зависи от отместването. В разглеждания ВТП промяната в изходното напрежение настъпва при приближаване на областта от изследвания обект съдържаща дефект. Локализирането на дефекта съответства на намиране на такова положение на ВТП, при което изходния му сигнал е близък до нула. В това положение, точността на идентификация на дефекта не зависи от големината на реализираното отместване.
Избраната конструкция на ВТП предлага и някои предимства при обработката на изходния сигнал с цел определяне на определени размери на откритите дефекти. Очаква се, че при подходяща оптимизация на тази конструкция, могат да се създадат преобразуватели, които ще повишат надеждността и ще подобрят качеството на вихровотоковия безразрушителен контрол.

ЛИТЕРАТУРА

[1] H. Jansen, ***Eddy Current Testing: Profiled eddy current probes for complex shape inspection***, 18-th World Conference on Nondestructive Testing, South Africa, April 2012.

[2] H. Hoshikawa, K. Koyama, and H. Karasawa, ***A new ECT surface probes without lift-off noise and with phase information on flaw depth***, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 20, pp. 969-976, 2001.

[3] H. Hoshikawa, K. Koyama, and M. Meada, ***A new ECT surface probe for short flaws with minimal lift-off noise***, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 22, pp. 413-418, 2003.

[4] I. Dolapchiev, ***A new eddy current surface probe with perpendicular coils***, JAPMED'9 9^{-th} Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Super-conducting, Multifunctional and Nanomaterials, Sofia, Bulgaria, July 2015

[5] *http://www.infolytica.com/en/products/magnet/*

Автор: Ивайло Драгомиров Долапчиев, доц. д-р, катедра "Обща електротехника", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *ivailodo@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Стефчо Гунински

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ НА АКТИВНАТА ЧАСТ НА МАСЛЕН ТРАНСФОРМАТОР С МКЕ

Валентин Матеев, Райна Ценева, Емил Мечков, Иван Ячев

Резюме: *В настоящата статия е реализиран електромагнитен модел на активната част на маслен трансформатор 160kVA, за което са използвани метода с крайни елементи и програмния продукт Ansys. Чрез създадения модел е получена картината на полето със стойности на магнитната индукция. Изчислени са и Джауловите загуби. Сравнени са два варианта на модела - без казан и с казан.*
Ключови думи: *електромагнитно поле, трансформатор, метод с крайни елементи, моделиране*

ELECTROMAGNETIC FIELD MODELING OF THE ACTIVE PART OF OIL - IMMERSED TRANSFORMER WITH FEM

Valentin Mateev, Raina Tzeneva, Emil Mechkov, Ivan Yatchev

Abstract: *The electromagnetic field of the active part of oil-immersed transformer 160kVA has been modelled in the present paper. Finite element method and ANSYS program have been employed for the field modelling. Based on the created model, the field distribution with values of the magnetic flux density has been obtained, as well as the Joule losses have been calculated. Two variants of the model - with and without tank are studied and compared.*
Keywords: *electromagnetic field, transformer, finite element method, modeling*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Работата в този труд е продиктувана от все повече нарастващите нужди на производителите на трансформатори у нас и по света да отговорят на изискванията на пазара, като постигнат най-добра комбинация на факторите цена и качество. Разбира се това се залага още в етапа на конструирането. Безспорно голям тласък в тази насока се дава от вече доста широко навлезлите специализирани софтуерни пакети, които са създадени на базата на някои числени методи. Тяхното използване води до: намаляване времето за проектиране; повишаване качеството на проектните решения; възможност за пълно интегриране на функциите на проектанта и компютъра; възможност за изпитване на изделие, още нереализирано материално, което намалява разходите. Като цяло компютърното проектиране значително повишава конкурентоспособността на изделията и затова всички водещи производители в света го използват в работата си. Един от най-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

често прилаганите числени методи в тази сфера е методът с крайни елементи (МКЕ), по който работи програмата Ansys®, използвана при настоящото моделиране.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

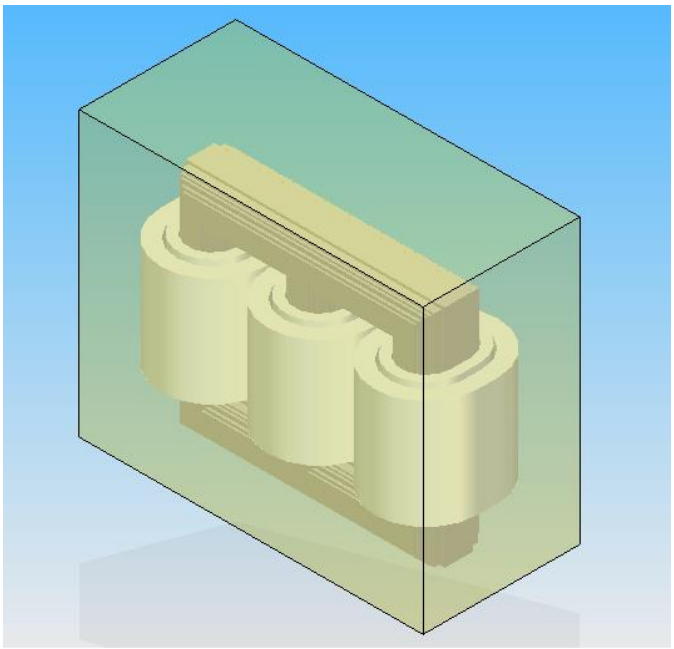
на изследването е маслен трансформатор с номинална мощност 160kVA, коефициент на трансформация 10/0,4kV и група на свързване Yyn0, производство на „ЕЛПРОМ ТРАФО СН“ АД гр. Кюстендил. Магнитопроводът е от отделни ламели студено валцована анизотропна силициева ламарина. Намотките са от алуминиеви проводници.

Електромагнитното поле е анализирано с квазистационарна A–V формулировка [1, 2, 3]:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = \mathbf{J}_S \qquad (1)$$

където **A** е магнитен вектор потенциал; σ – електрическа проводимост; t – време; V – електрически скаларен потенциал; $\mathbf{J}_s$ – вектори на токовата плътност на източниците, изчислени с моментните стойности на фазовите токове.

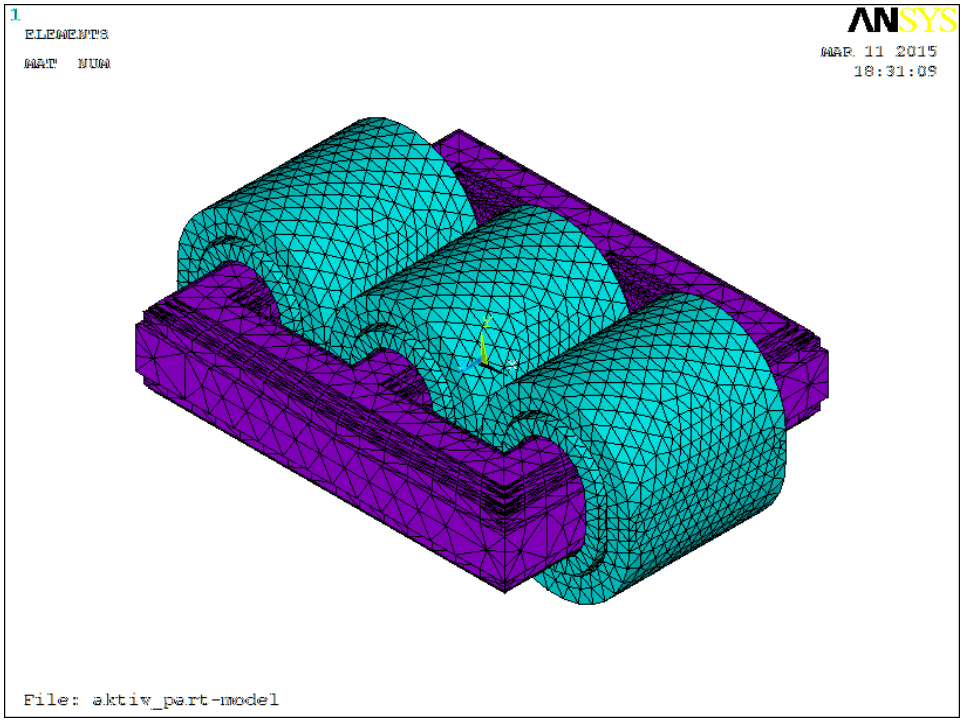
За моделиране на електромагнитното поле е създаден 3D модел на геометрията на активната част на горепосочения трансформатор с реалните размери и някои опростявания, не влияещи на изследването, в средата на софтуерния CAD продукт Solid Edge [4] (фиг.1).



Фиг.1. Геометрия на активната част на трансформатора с буферна зона

За моделиране на електромагнитното поле на активната част на трансформатора е използвана програмата Ansys® [5]. Решена е нелинейна задача при преходен режим за промишлена честота 50Hz. При дефиниране на характеристиките на материала за магнитопровода е зададена B-H кривата на силициевата ламарина тип H0 Carlite DR, от която е произведен реалният трансформатор, обект на настоящото изследване.

Направено е омрежване на модела, което е показано на фиг.2, като за нагледност е скрита областта с маслото, респективно казана. Използван е елементът SOLID 97, който е тетраедър с осем възела и с пет степени на свобода за всеки възел.



Фиг.2. Мрежа от крайни елементи със скрита област на маслото

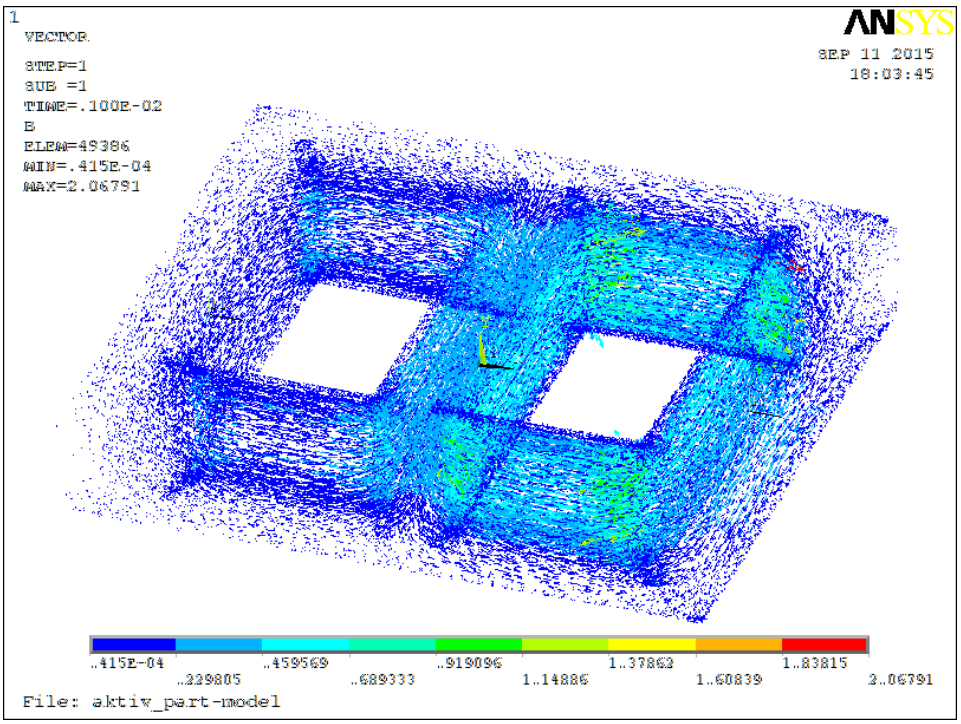
Като източници на полето са зададени токови плътности в цилиндрична координатна система за всяка намотка от първичната (1099018 A/m^2) и вторичната страна (1720070 A/m^2). За да се симулира товар на трансформатора с cosφ под 1, токовите плътности на двете намотки са дефазирани на 20° помежду си

Като хомогенно гранично условие на Дирихле е зададена нулева стойност на магнитния вектор потенциал по външната обвивка на изследваната област.

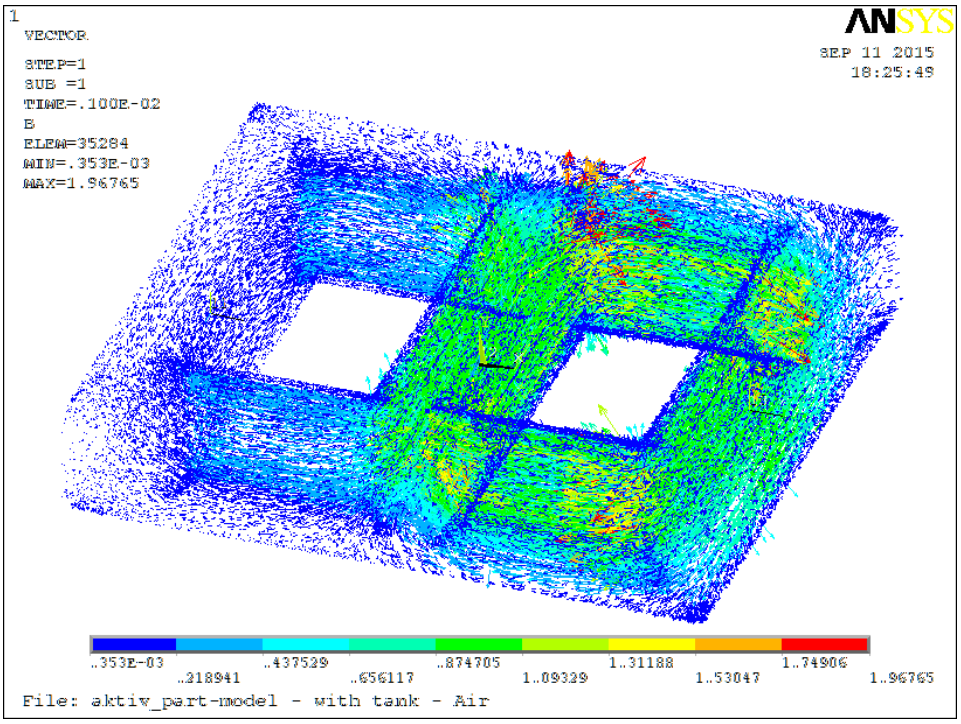
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

Получени са следните резултати:

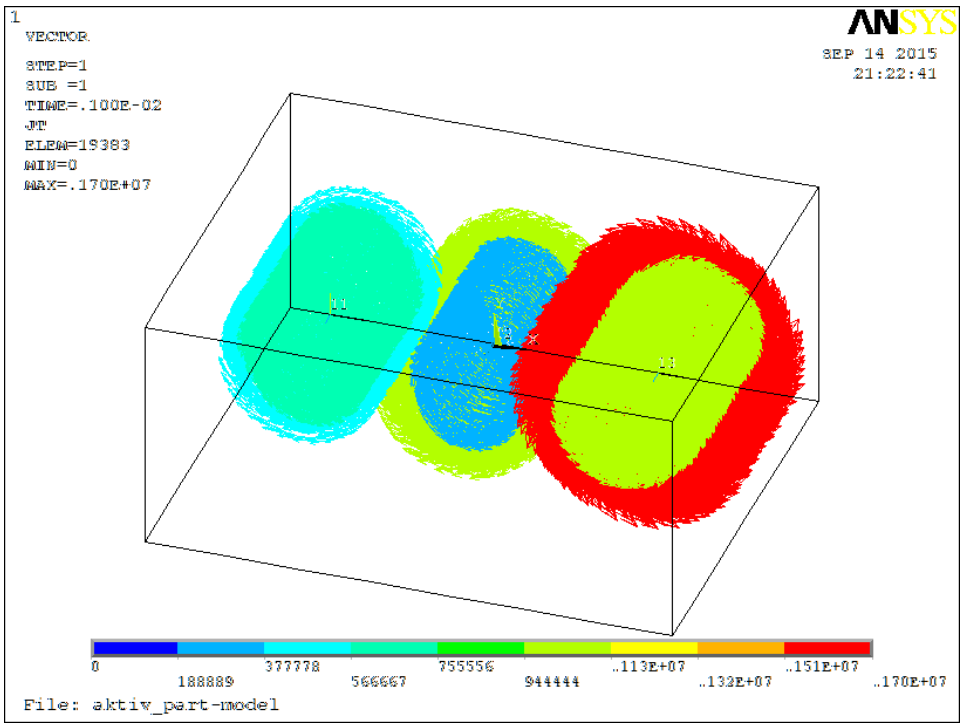
- картина на полето на активната част на масления трансформатор в определен момент от времето със стойности на магнитната индукция за двата варианта на модела - без казан (фиг.3) и с казан (фиг.4)
- картина на зададената като източник на полето токова плътност на активната част на масления трансформатор в определен момент от времето, еднакви за двата варианта на модела (фиг.5)
- числени стойности за Джауловите загуби, еднакви за двата варианта на модела (фиг.6).



Фиг.3. Картина на електромагнитното поле в определен момент от времето със стойности на магнитната индукция за модела без казан



Фиг.4. Картина на електромагнитното поле в определен момент от времето със стойности на магнитната индукция за модела с казан



Фиг.5. Картина на зададената като източник на полето токова плътност в определен момент от времето

```
_____ SUMMARY OF POWER LOSS CALCULATION _____

Load step =   1.   Substep =   1.   Freq.=  0.5000E+02

Time average power loss = 1004.96212 Watts.

Parameter defined for power loss: PAVG.
Element table item for power loss density: PLOSSD.
```

Фиг.6. Резултати за Джауловите загуби

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Използването на 3D модели е особено полезно в процеса на конструиране на електромагнитни изделия, където много лесно може да се изследва промяната на даден параметър при промяна на геометрия, материал и др.

2. От така получената картина на електромагнитното поле може много добре да се видят участъците от магнитопровода с максимална индукция. Това е невъзможно да се постигне толкова лесно и нагледно с аналитично пресмятане, а е от голяма важност за конструиране на електромагнитни изделия.

3. При сравняване на картината на електромагнитното поле за двата варианта на модела - без казан и с казан се вижда, че наличието на казан в близост до активната част на трансформатора, не влияе на стойностите на магнитната индукция. Резултатът е проверен и е потвърдена неговата вярност, чрез измерване на една и съща стойност на загубите на празен ход (т. е. една и съща магнитна индукция при непроменени други параметри на системата) на същия трансформатор без казан и с казан.

4. Полученото разпределение на магнитната индукция в активната част на трансформатора позволява оптимизиране на конструкцията и последващи топлинни изчисления.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Александров А., ***Компютърно проектиране на електрически апарати***, С., Авангард Прима, 2004.

[2] Ячев И., Маринова Ил., ***Числени методи и моделиране на вериги и полета***, ч. I, С., Издателство на ТУ-София, 2007.

[3] Da Silva J., Bastos J.-P., Sadowsky N., Leite J. (2014), ***"Electromagnetic and thermal simulation of an oil insulated power transformer"***, Proc. 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2014, Bourgas, Bulgaria, 2014, pp. 193-196.

[4] ***Solid Edge documentation***, version ST1, 2008.

[5] ***ANSYS 12 documentation***, Ansys, Inc., 2009.

Автори: Валентин Матеев, гл. ас. д-р. инж., катедра „Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vmateev@tu-sofia.bg;* Райна Ценева, проф. д-р. инж., катедра „Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *tzeneva@tu-sofia.bg;* Емил Мечков, маг. инж., докторант, катедра „Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *emil_pm@abv.bg;* Иван Ячев, проф. дтн. инж., катедра „Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *yatchev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. дтн. Илиана Маринова

ИЗТОЧНИЦИ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ С НЕКЛАСИЧЕСКА ФОРМА ЗА МАГНИТОРЕЗИСТИВНИ СЕНЗОРИ С МОСТОВИ СХЕМИ НА СВЪРЗВАНЕ

Иван Костов, Стефчо Гунински

Резюме: *В работата е извършен подбор на форми на тънкослойни намотки, предназначени за магниторезистивни сензори. Направени са сравнителни експериментални измервания в активните зони на намотки с форма меандър, проведени с магниторезистивен преобразувател, който притежава координатна чувствителност в слаби магнитни полета.*
Ключови думи: *магниточувствителен сензор, магниторезистор, меандър*

NONCLASSICAL SHAPE EMF SOURCES FOR MAGNETORESISTIVE SENSORS IN BRIDGE CIRCUITS

Ivan Kostov, Stefcho Guninski

Summary: *The work has selected forms of thin coils for Magneto sensors. Made comparative experimental measurements in active zones of coils shaped meander conducted with magnetoresistive converter that has coordinate sensitivity in weak magnetic fields.*
Keywords: *magneto-sensitive sensor, magnetoresistor, meander-form*

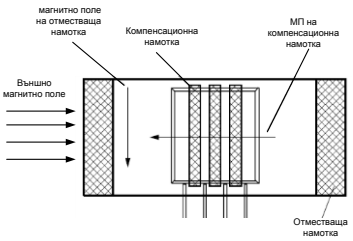
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на съвременните измервателни и управляващи системи стремително се увеличава благодарение на ролята на т.н. интелигентни сензори като конструктивни елементи на индустриалната автоматизация. Интелигентните сензори се състоят от три компонента: чувствителен елемент (преобразува физичните и химични величини в електрически сигнал); изчислителен (с включен аналого-воцифров преобразувател) и комуникационен интерфейс. Чувствителните елементи, използващи магниторезистивни ефекти в последните десетина години, с навлизането на нанотехнологиите и наноматериалите позволиха значително да се увеличи диапазона на областите на приложение на сензорите, а също и да се създадат съвършенно нови типове сензори. [1,2,3].

Източници на електромагнитно поле (ЕМП) за магниторезистивни чувствителни елементи, освен постоянните магнити, са токопроводящи намотки с различна форма. Използването на новите технологии налага разработката на тънкослойни намотки с некласическа форма (под класическа форма разбираме соленоидна и тороидна намотка) като възбудители на ЕМП.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829



Фиг.1. Схема за използване на сензор KMZ за магнитно поле със соленоидни намотки

2. СЪЩИНСКА ЧАСТ

2.а. ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

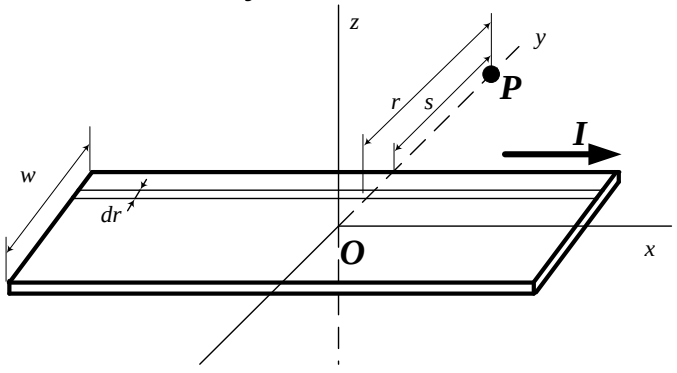
За аналитичното описание на свойствата на магнитни полета (МП) могат да се използват диференциалните уравнения за силовите линии, които в правоъгълна Декартова координатна система имат вида [1] :

$\frac{dx}{B_x} = \frac{dy}{B_y} = \frac{dz}{B_z}$, където B_x, B_y и B_z са проекциите на вектора $\vec{B}(\vec{r},t)$ по осите Ox, Oy, Oz а x, y, и z съответно проекциите на радиус-вектора $\vec{r}$ върху тези оси за момент от време $t > t_0$.

В [1,7] е показано как с помощта на обобщени функции и метода на интегралните трансформации може аналитично да се определи магнитното поле на намотка,чиято форма е геометрична фигура, съставена от отсечки.

Пълната система уравнения на Максуел позволява еднозначно да се определи полето във всяка точка от пространствената област, ако за момента от време са зададени началните условия, стойностите на вектора $\vec{B}$ във всички точки на тази област, а така също и стойностите на нормалните съставки на повърхността, ограничаваща разглежданата област от пространството[2].

За целите на микромагнитоелектрониката в хибридни интегрални схеми могат да се използват за източници на магнитни полета мрежи от тънкослойни намотки. Елемент от тези намотки може да се разгледа като безкрайно дълга тънка метална лента със ширина ***w*** в равнината ***xy*** , през която протича ток I по направление ***+x*** както е показано на фиг. 2. [3]. Търси се магнитното поле, представено чрез вектора на плътността на магнитния поток $\vec{B}$ в точка P , отдалечена на разстояние ***s*** от лентата по оста ***y*** .



Фиг.2.

Разглеждаме елементарна част от лентата с ширина ***dr***, успоредна на посоката на тока и на разстояние ***r*** от т. ***P*** (фиг.2). Елементарният ток е

$$dI = I\left(\frac{dr}{w}\right)$$

Съгласно закона на Ампер този ток създава магнитно поле

$$dB = \frac{\mu_0}{2\pi r} I\left(\frac{dr}{w}\right).$$

След интегриране на този израз получаваме:

$$B = \int_s^{s+w} \frac{\mu_0 I}{2\pi w}\left(\frac{dr}{r}\right) = \frac{\mu_0 I}{2\pi w}\ln\left(\frac{s+w}{s}\right).$$

Посоката на вектора на магнитната индукция в т.P съвпада с $+\mathbf{z}$ оста, или

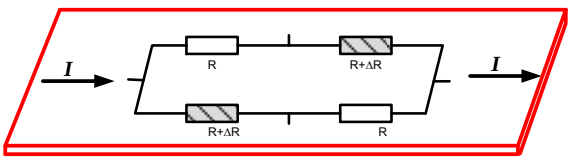
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi w}\ln\left(\frac{s+w}{s}\right)\hat{k}$$

В случаите, когато широчината е пренебрежимо малка, $w << s, \ln(1+w/s) \approx w/s$, може да се опрости изразът за магнитното поле на тънка метална лента.

Базов елемент в сензорите за магнитно поле е магниторезистор, който се изработва също като лента от феромагнитен материал, например пермалой (*20%Fe,80%Ni*). Нека приемем, че когато липсва външно МП вектора на намагнитването е с посока паралелна на тази на тока, протичащ през пермалоевата лента. При прилагане на външно МП, успоредно на равнината на феромагнитната лента, но перпендикулярно на протичащия през нея ток, то векторът на намагнитването на магниторезистора ще се завърти на определен ъгъл, зависещ от големината на външното МП. В резултат на това съпротивлението на пермалоевата лента се променя като функция на полето, създадено от външен източник, в случая от описаната по-горе метална токопроводяща лента.

2.б. ФОРМИ НА ТЪНКОСЛОЙНИ НАМОТКИ съдържащи магниторезистори в мостова схема:

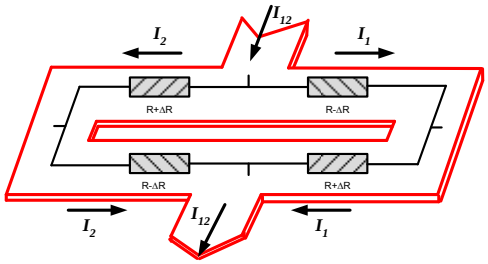
- еднолентова намотка (фиг.3)



Фиг.3.

В този случай се използва мостова схема с два линейни резистора и два магниторезистора, на които съпротивлението нараства с увеличение на приложеното магнитно поле, функция на тока през лентата. (недостатък-нелинеен и малък изходен сигнал)

- лентова намотка с О-образна форма (фиг.4)

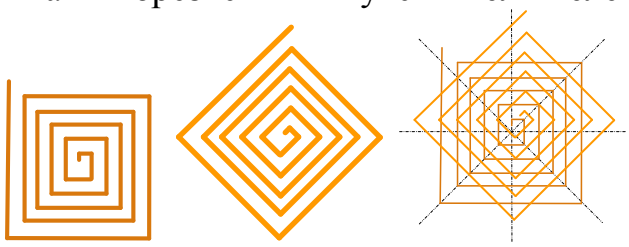


Фиг.4.

Мостовата схема е от четири магниторезистора, като двата в диагонала на моста са с положително нарастване, а другите два са с отрицателно нарастване на съпротивлението при увеличение на приложеното магнитно поле.

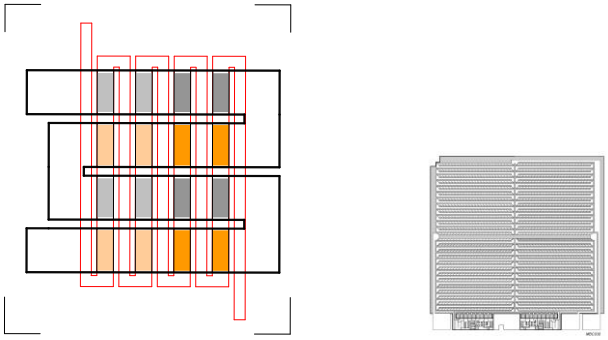
●намотки с квадратна форма (фиг.5)

Четирите магниторезистора са разположени в четирите сектора на квадратната намотка и технологично се изработват от феромагнитни ленти. Възможно е, с помощта на още една квадратната намотка, разместена на 90 градуса, да се създаде МП с друго въздействие върху магниторезисторната схема. Превключването се извършва от външна електронна схема. Предимството се състои във възможността за смяна на знака на изходния сигнал, т.е. напрежението в измервателния диагонал на мостовата схема. Съществува и доста сложен вариант с две мостови схеми от магниторезистивни чувствителни елементи.



Фиг.5.

● спомагателна и компенсационна намотка с форма „меандър“(фиг.6)

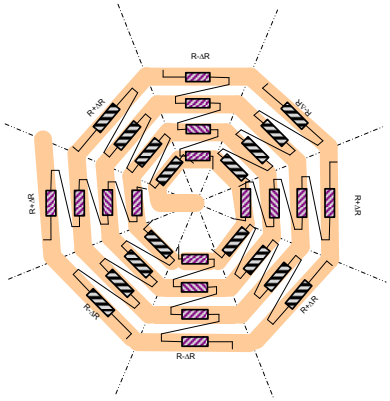


Фиг.6.

В [6] KMZ серията от магниточувствителни елементи четирите магниторезистора са ленти от пермалой, подредени във форма „меандър“ и след това свързани в мостова схема за получаване на двойно по-голяма чувствителност. При тези сензори за измерване на МП или измерване на електрически ток посредством полето,което той създава, се прилага метод на компенсация. Магнитното поле, създадено от компенсационната намотка, е равно по големина, но противоположно по посока на измерваното МП. Използвайки този метод на обратна връзка имаме директна мярка за измервания неизвестен ток или например земното магнитно поле. Предимството на метода, особено при измерване на слаби

МП, е висока точност поради липса на смущения, зависещи от температурата, нелинейности в елементите на сензора и паразитни външни магнитни полета.

При двуфазни сензори като например сензор за ъглово преместване [4] , подобни сензори за скорост, ускорение и позициониране [5], магнитното поле се създава от наслагване на постоянно МП от въртящи се магнити и спомагателни намотки. Тези спомагателни намотки се захранват обикновено с импулсни напрежения с различна форма и коефициент на запълване и в редуване, определено от електронна схема.



Фиг.7. Спомагателна намотка с осмоъгълна форма и две магниторезистивни мостови схеми

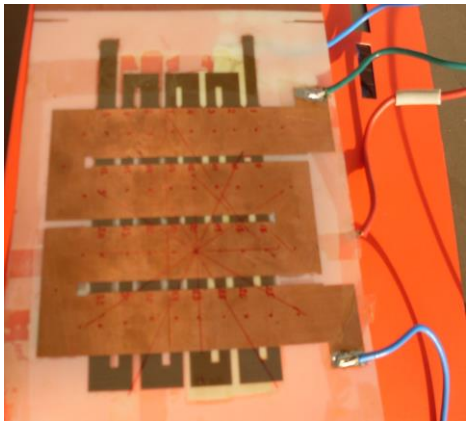
Магнитния поток на един елемент от осмоъгълната спомагателна намотка е в радиална посока и в равнина над магниторезисторите. Електронна схема за управление дава възможност на сумарния магнитен поток рязко да сменя своя фазов ъгъл (по посока на часовниковата стрелка или обратна. Спомагателната намотка с осмоъгълна форма за две магниторезистивни мостови схеми позволява да се получат същите характеристики както при две квадратни спирали. По този начин се избягва увеличаването на размера на сензора и се намаляват производствените разходи.

3. ЕКСПЕРИМЕНТ

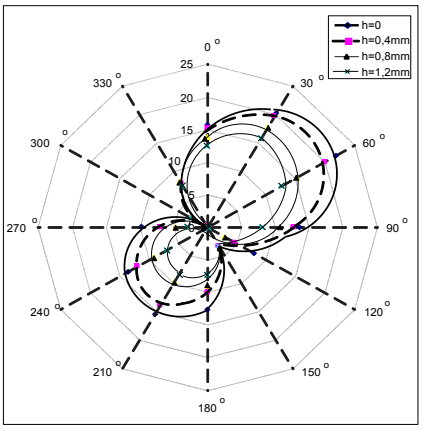
Този тип сензори могат да се използват в качеството на векторни магнитометри, като в този случай магнитната ос на сензора е твърдо свързана с неговия корпус и паралелна на равнината, в която са разположени магниторезисторите. Тъй като AMP-сензора има пренебрежимо малка дебелина е прието, че се измерва тангенциалната съставка на полето, понеже тази проекция съвпада с магнитната ос . Смущенията от нееднородност на полето по отношение на координатата z са пренебрежимо малки. Когато AMP-сензора е ориентиран така, че магнитните силови линии съвпадат с магнитната му ос, изходният сигнал има максимална положителна стойност.

За изследване влиянието на посоките и съотношението на големините на полетата на двете намотки, от наслагването на които се получава резултантното МП е прието съотношението на токовете в ОВН и КВН да е 2:1 , а чрез промяна на

поляритета на захранващите източници на ток са определени още нива на изменение на този фактор.



Фиг.8.а



Фиг.8.б

При снемане на данните е приет за неизменен ъгъла θ = 45º на ориентация на сензора за всички активни области.

За изследване влиянието на пространственото разположение на АМР-сензора е записвана стойността на изходния сигнал при завъртане на сензора на определен ъгъл θ (0 < θ < 360º) през 30º. Освен това е извършвана промяна на отстоянието h на сензора от повърхността на ОВН. Резултатите от тези изследвания са показани графично като ориентационни диаграми при параметър h (фиг.8.б.) .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сканиращи и измервателни модули, съставени от така описаната мрежа от намотки с форми меандър и осмоъгълна форма и АМР - сензори с линейна или матрична организация могат да бъдат използвани в електромагнитните безразрушителни методи за контрол.

БЛАГОДАРНОСТ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор ДФНИ Е02/8 с Фонд „Научни изследвания“ при МОН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Guninski S., *Output Signal of Electromagnetic Transduser with Perpendicular Windings at Present of Relative Movement:* Proceedings of the Technical University – Sofia, vol. 53, 2003, pp. 191-199.

[2] V.Panin, B.Stepanov: ”*Measurement of the impulse magnetic and electrical fields”*, Energoatomisdat, 1987, Moscow.

[3]http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-013-electromagnetics-and-applications-spring-2009/readings/MIT6_013S09_notes.pdf

[4]http://www.researchgate.net/publication/226743739_360degree_Rotation_Angle_Sensor_Consisting_of_MRE_Sensors_with_a_Membrane_Coil. T.Ina, K.Takeda, T. Nakamura,O.Shimomura, T.Ban, T.Kawashima.

[5] www.bosch.de/aa/de/fachliteratur/index.htm

[6] Philips Semiconductors Technical Note ,"*Magnetic Field Sensors "*, 1999, 8 p.

[7] Гунински С., И. Петров, ***Изходен сигнал на електромагнитен преобразувател със спирална форма,*** Научни известия на НТС по Машиностроене, год. XII, бр. 1 (79), юни 2005 год., Дефектоскопия'2005. XX Национална конференция по безразрушителен контрол с международно участие, Созопол, 13-15 Юни 2005 г., с. 243-247

Автори: Иван Костов, доц. д-р инж., катедра „Обща електротехника", Електротехнически факултет, Технически Университет – София, E-mail adress: *igkostov@tu-sofia.bg* ; Стефчо Гунински, доц. д-р инж., катедра „Обща електротехника", Електротехнически факултет, Технически Университет – София, E-mail adress: *sgg@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл.ас. д-р Калинка Тодорова

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВИЖЕНИЕТО НА ЕЛЕКТРОМАГНИТ ЗА БРАЙЛОВ ЕКРАН ЧРЕЗ ВИСОКОСКОРОСТНА КАМЕРА

Йоско Балабозов, Кръстьо Хинов, Николай Стоименов, Станислав Гьошев, Димитър Карастоянов

Резюме: *Проведеното експериментално изследване с високоскоростна камера има за цел да определи скоростта на подвижната част на прототипи на новоразработен електромагнитен модул за Брайлов екран. Получените резултати от това изследване се използват за да се направи сравнение (верификация) с резултати получени от компютърно моделиране на динамичните характеристики по метода с крайни елементи и с резултати получени от предходен експеримент проведен с помощта на акселерометър.*
Ключови думи: *електромагнит, високоскоростна камера, акселерометър, скорост, компютърно моделиране, Брайлов екран.*

STUDY OF THE MOTION OF A BRAILLE SCREEN ACTUATOR USING HIGH SPEED CAMERA

Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Nikolay Stoimenov, Stanislav Gioshev, Dimitar Karastoyanov

Abstract: *The experimental study with high speed camera aims to determine the speed of movable part of new developed prototypes of electromagnetic module for Braille screen. The results obtained from the experiment are used to compare with results, received from computer modeling and results from an earlier experiment with accelerometer.*
Keywords: *electromagnet, high speed camera, accelerometer, speed, computer modeling, Braille screen.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Най-общо Брайловият екран е устройство, чрез което се визуализира Брайлова азбука или графична информация за хора със зрителни проблеми. По-подробна информация за този тип устройства има в предходни разработки по темата [1-6], както и в литературни източници [7-11].

Изследването е продължение на няколко предишни работи, в които е разработена и оптимизирана нова конструкция на електромагнит за приложение в Брайлов екран. За тази нова конструкция са направени редица компютърни изследвания, както и реални експерименти с прототипи. Резултатите от тях са пуб-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

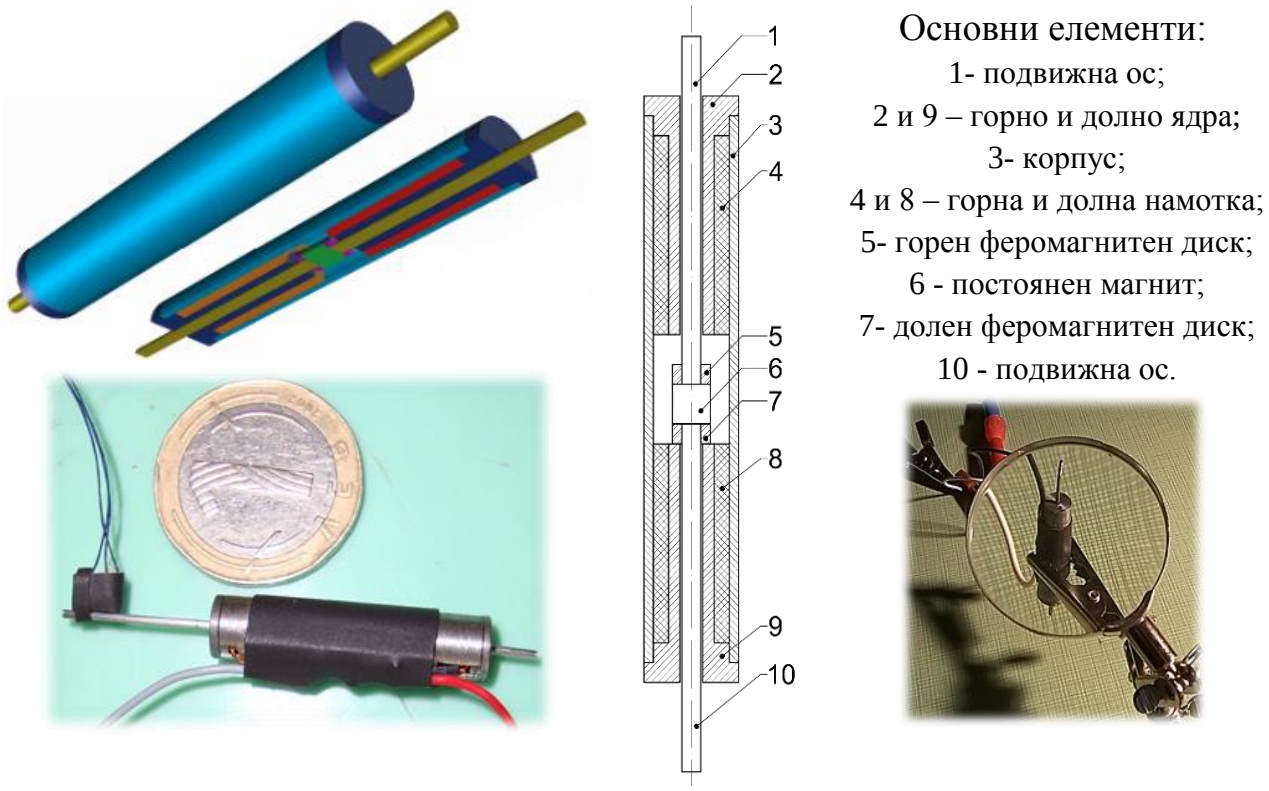
ликувани в [1-6] и доказват работоспособността на модула при използването му в посоченото приложение.

От съществено значение при компютърното моделиране на електрически апарати е получените резултати да бъдат доказани екпериментално или да бъдат сравнени с вече потвърдени резултати от други изследвания на сходни устройства.

Целта на настоящата разработка е да определи експериментално скоростта при движението на подвижната част на изследвания електромагнит, чрез използване на високоскоростна камера. Получените резултати ще позволят да се потвърди и докаже достоверността на резултатите за динамичните характеристики, получени от компютърното моделиране. Резултатите ще се сравнят и с резултати, получени чрез използване на акселерометър (сензор за ускорение) от предходни експериментални изследвания на електромагнитния модул.

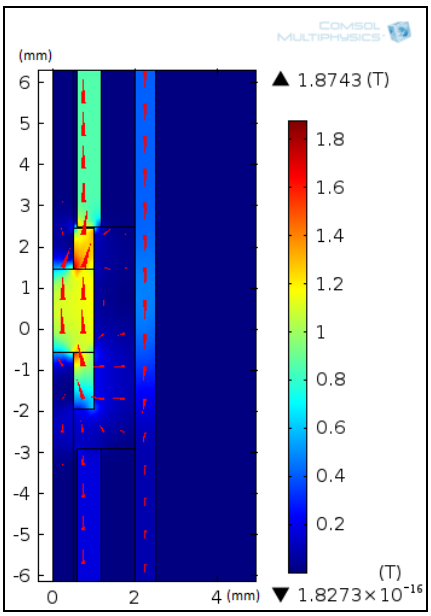
За постигането на целта е направена опитна постановка, включваща прототипи на електромагнита, захранващо и управляващо устройство, високоскоростна камера и компютър за анализ на резултатите.

2. ИЗСЛЕДВАН ЕЛЕКТРОМАГНИТ

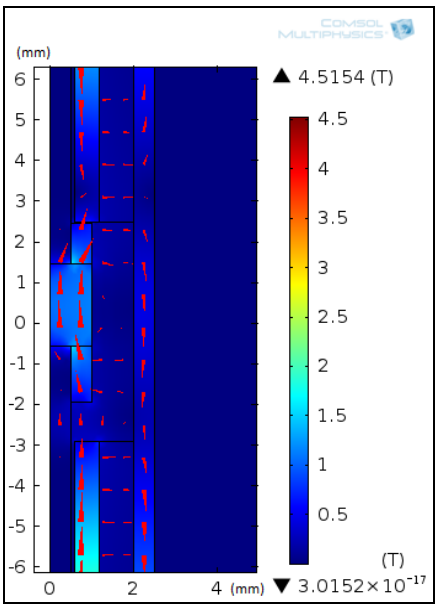


Фиг.1. Конструкция и външен вид на изследвания електромагнит.

На фиг.1 е показана конструкцията и външният вид на изследвания прототип на електромагнитния модул с описание на всички основни елементи. Принципът му на работа многократно е описван в предходните изследвания [1-6].



а) при незахранени намотки



б) при захранени намотки, така че се създава сила надолу

Фиг.2. Разпределение на магнитната индукция от компютърното моделиране по метода с крайни елементи.

Разпределението на магнитната индукция показано на фиг.2 е получено от компютърното моделиране чрез метода с крайни елементи в програмния продукт Comsol Multiphysics.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ ЧРЕЗ ВИСОКОСКОРОСТНА КАМЕРА

При провеждането на експеримента е използвана високоскоростна камера „MEMRECAM HX-6“, чийто основни характеристики са дадени на фиг.3. Тя има два основни режима на работа - „режим висока резолюция“ и „режим висока скорост“. Те позволяват по-прецизното й използване в най-различни типове изследвания и приложения.

MEMRECAM HX-6 High Resolution Mode		
Max Res (pixels)	2560 X 1920	
Optical Format	35.20 mm	
fps @ Max Res	1,000	
	Mono	Color
ISO Rating	10,000	2,000

MEMRECAM HX-6 High Speed Mode		
Max Res (pixels)	1280 X 960	
Optical Format	35.20 mm	
fps @ Max Res	3,840	
	Mono	Color
ISO Rating	40,000	8,000

Фиг.3. Основни характеристики и външен вид на камера модел MEMRECAM HX-6.

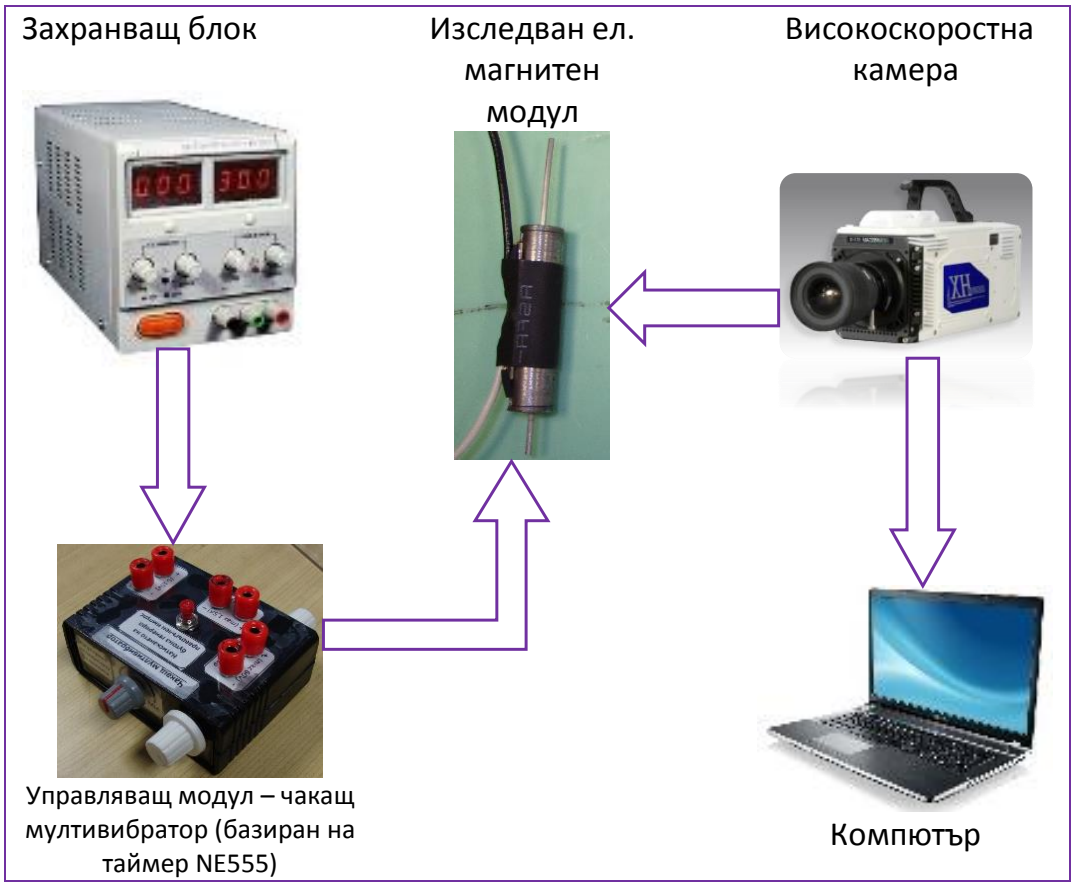
На фиг.4 е показана блоковата схема на опитната постановка. За нейната реализация и за провеждането на експеримента са използвани:

- Лабораторен захранващ блок, позволяващ регулиране на изходящото напрежение и ток;

- Управляващ блок – разработен специално за използване с изследваните електромагнитни модули. Основни елементи в реализираната схема са таймер NE555 и мощен краен транзистор, през който се осъществява захранване към изследваното устройство. Възможно е и регулирането на продължителността на захранващия електрически импулс;

- 10 броя прототипи на изследвания електромагнит;

- Висикоскоростната камера и компютър.



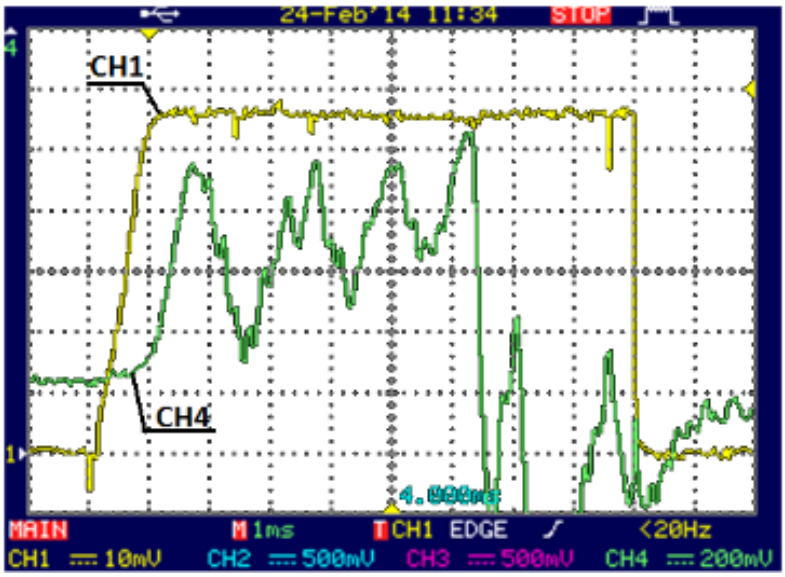
Фиг.4. Блокова схема на опитната постановка.

След поставянето на подходящ маркер върху подвижната ос на модула, така че да се осигури правилната работа на високоскоростната камера, са направени по два опита (в двете посоки на преместване – от долно и в горно и обратно) с 10-те прототипа на изследвания електромагнит за Брайлов екран.

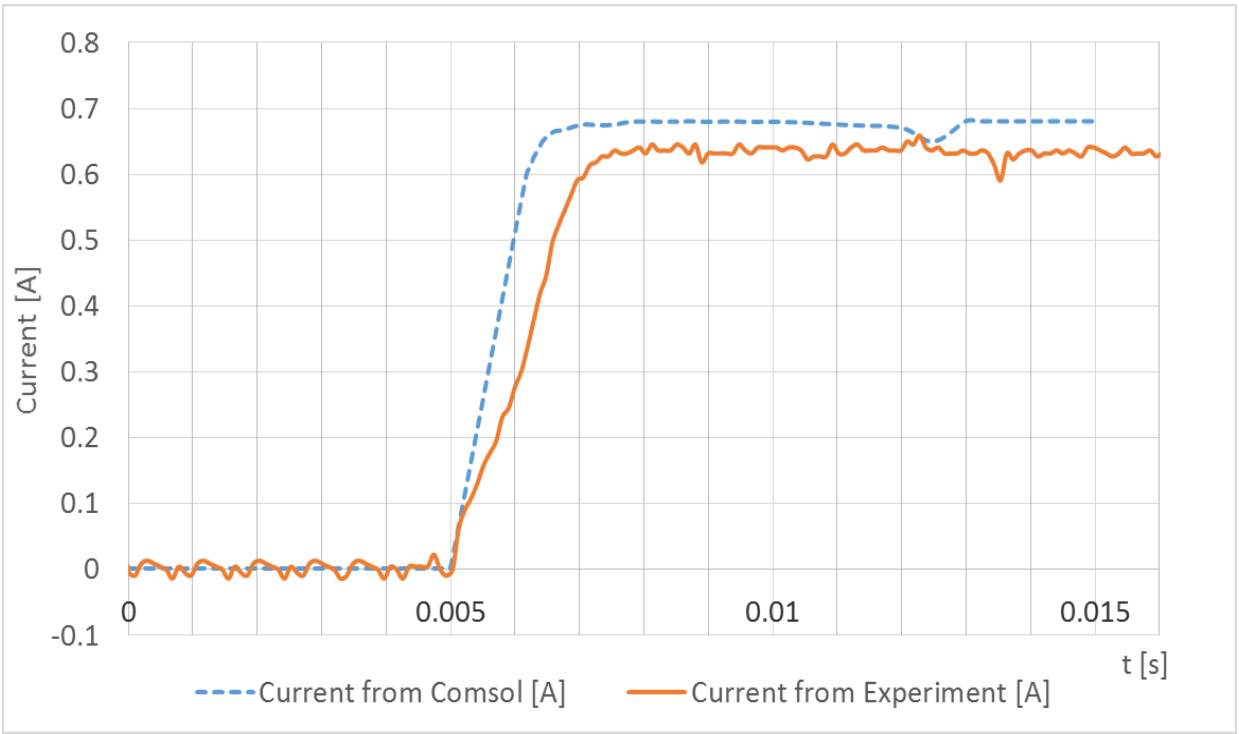
При провеждането на експеримента данните от камерата се прехвърлят автоматично към компютър, където се обработват в подходящ вид.

4. СРАВНЕНИЕ НА РЕЗУЛТАТИ ОТ КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ И ЕКСПЕРИМЕНТ

На фиг.5 са дадени резултати, получени експериментално при предходно изследване на модулите, чрез акселерометър и токова сонда за прототип номер 2. Основните резултати от този експеримент са публикувани в [6].



Фиг.5. Резултати за тока (CH1) и ускорението от акселерометъра (CH4).

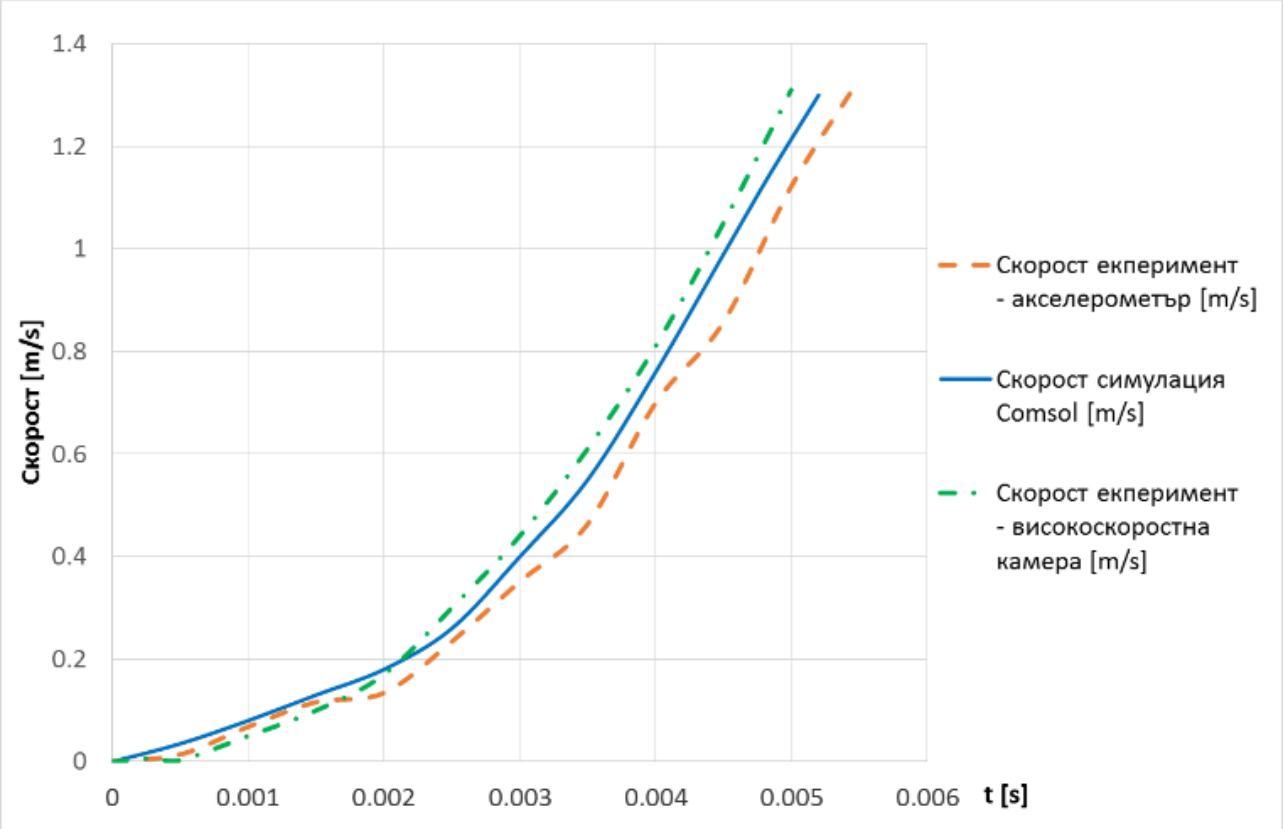


Фиг.6. Изменение на тока през намотката на изследвания прототип, получен от компютърните симулации и експериментално определен.

На фиг.6 е визуализирано изменението на тока във времето през намотките на един от изследваните прототипи. Сравняването на резултатите за тока, получен

експериментално при изследване чрез токова сонда и тока, получен при компютърно моделиране на динамичните характеристики, показва че характерът на изменението на тока е един и същ. Максималната разлика при двете изследвания е в границите на 13%.

На фиг.7 са показани резултатите за скоростта на подвижната част на един от изследваните електромагнити, получени експериментално по два различни метода (с акселерометър и чрез високоскоростна камера) и резултатите от моделирането по метода с крайни елементи. От графиката става ясно, че и по трите метода характеристиките са сходни, като изследваната величина достига една и съща максимална стойност (1,31 m/s). Максималното отклонение в резултатите от компютърното моделиране и експериментално получените, по отношение на времето за движение е в границите на 4%.



Фиг.7. Изменение на скоростите, получени от компютърните симулации и експериментално определените чрез акселерометър и чрез високоскоростната камера.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направените експериментални изследвания с високоскоростната камера потвърждават предходно получените резултати от компютърните модели, направени в Comsol, както и достоверността на резултати от акселерометъра, получени в предходно изследване на прототипите на електромагнита.

Разликите в резултатите от трите вида изследвания се дължат на натрупване на грешка от мрежата с крайни елементи в компютърните модели и от липсата на стабилизатор на напрежение в батерийното захранване на акселерометъра.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Yatchev I., Hinov K., Balabozov I., Gueorgiev V., Karastoyanov D., ***Finite element modeling of electromagnets for Braille screen***, 10-th International Conference on Applied Electromagnetics - PES 2011, September 25-29, 2011, Nis, Serbia

[2] Yatchev I., Hinov K., Balabozov I., Krasteva K., ***Static Force Characteristics of Electromagnetic Actuators for Braille Screen***, Facta Universitatis (NIS) ser.: Elec. Energ. vol. 24, no. 2, August 2011, 157-167

[3] Balabozov I., Yatchev I., Hinov K., Karastoyanov D., ***Influence of different factors on the static force characteristics of a permanent magnet linear actuator for braille screen***, XVII-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies - SIELA 2012, May 28-30, 2012, Bourgas, Bulgaria

[4] Yatchev I., Balabozov I., Hinov K., Gueorgiev V., Karastoyanov D., ***Optimization of Permanent Magnet Linear Actuator for Braille Screen***, 15-th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, September 16-19, 2012, Graz, Austria

[5] Хинов К., Балабозов Й., Ячев И., ***Изследване на електромагнит за Брайлов дисплей с подобрени характеристики***, V-та Научна конференция ЕФ, Септември 02-05, 2013, Созопол, България

[6] Balabozov I., Yatchev I., Hinov K., ***Computer Modeling and Experimental Verification of Dynamic Characteristics of Permanent Magnet Linear Actuator for Braille Screen***, 12-th International Conference on Applied and Theoretical Electricity, October 23-25, 2014, University of Craiova, Romania, 978-1-4799-4161-2/14/$31.00 ©2014 IEEE

[7]. Kawai Y., F. Tomita, ***Interactive tactile display system – A support system for the visually disabled to recognize 3D objects***, ASSETS'96, pp. 45-50, 1996.

[8]. Kawai Y., N. Ohnishi, N. Sugie, ***A support system for the blind to recognize a diagram***, Systems and Computers in Japan, vol. 21, No. 7, pp.75-85, 1990.

[9]. Lewis D., ***Three-dimensional visualization display device***, Thesis for the award of degree of Master of Science, University of Florida, 2004.

[10]. Shinohara M., Y. Shimizu, A. Mochizuki, ***Three-dimensional tactile display for the blind***, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, vol. 6, No. 3, 1998.

[11]. Agam Ch. A., ***Design of Hardware for the Operation of a Braille Teaching Device***, McMaster University, Dep. of Electrical and Computer Engineering, 2010.

Автори: Йоско Балабозов, маг. инж. ас., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *i.balabozov@gmail.com*; Кръстьо Хинов, доц. д-р инж., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *k_hinov@tu-sofia.bg*; Николай Стоименов, докторант инж., БАН, E-mail address: *nikistoimenow@gmail.com*; Станислав Гьошев - докторант инж., БАН; Димитър Карастоянов, проф. д-р, Институт по информационни и комуникационни технологии в БАН, E-mail address: *dkarast@iinf.bas.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: гл. ас. д-р Валентин Матеев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА СИЛАТА ВЪРХУ КОНТАКТНОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ МЕЖДУ МЕДНИ ШИНИ

Иван Хаджиев, Диан Маламов, Иван Ячев

Резюме: *В работата е изследвано влиянието на силата върху контактното съпротивление между медни шини. Дадени са резултати от експериментални изследвания на контактното съпротивление между медни шини с различни размери. От получените експериментални данни са определени емпирични зависимости на контактното съпротивление от силата за различни размери медни шини. Направено е сравнение на контактните съпротивления изчислени чрез получените емпирични зависимости и някои от основните формули в литературата.*
Ключови думи: *контактно съпротивление, контактна сила, медни шини*

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FORCE ON THE CONTACT RESISTANCE BETWEEN COPPER BUSBARS

Ivan Hadzhiev, Dian Malamov, Ivan Yatchev

Abstract: *The influence of the force on the contact resistance between copper busbars has been studied in the paper. Results from experimental studies of the contact resistance between copper busbars of various dimensions have been given. Empiric dependences of the contact resistance on the force have been defined based on the obtained experimental data for copper busbars of various dimensions. A comparison has been drawn between the contact resistances calculated by means of the obtained empiric dependencies and some of the basic formulas in the literature.*
Keywords: *contact resistance, contact force, copper busbars*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В комплектните комутационни устройства (ККУ) за ниско напрежение типичен функционален елемент са шинните системи, които се характеризират със сложни конфигурации и връзки. Това обуславя и значителен брой контактни съединения. Наличието на контактни съединения е предпоставка за увеличаване на съпротивлението и прегряване на електрическото съоръжение. Един от проблемите при изследване на загряването на тоководещите вериги е задаването на стойностите на контактното съпротивление. Известно е, че контактното съпротивление зависи от сложни физически процеси, голяма част от които имат случаен характер [1], [2]. В [3] са предложени формули, в които влиянието на микро и макро геометрията и твърдостта на контактните повърхности е отразена

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

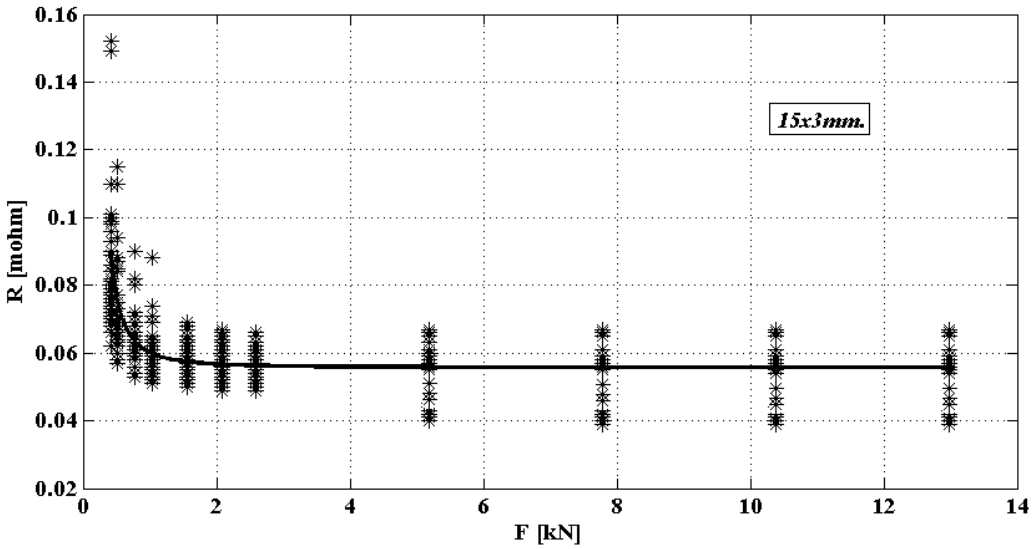
чрез емпирични коефициенти. Диапазонът на изменение на тези коефициенти е голям, което води също до незадоволителна точност на получените резултати. Освен това предложените формули не отразяват специфичните конструктивни особености на контактните повърхности. В настоящия доклад е изследвано експериментално влиянието на контактната сила върху контактното съпротивление между медни шини при различни размери. От получените данни са определени емпирични зависимости на контактното съпротивление от силата. Направено е сравнение на контактните съпротивления изчислени чрез получените емпирични зависимости и известните в литературата формули.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОНТАКТНОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ МЕЖДУ МЕДНИ ШИНИ

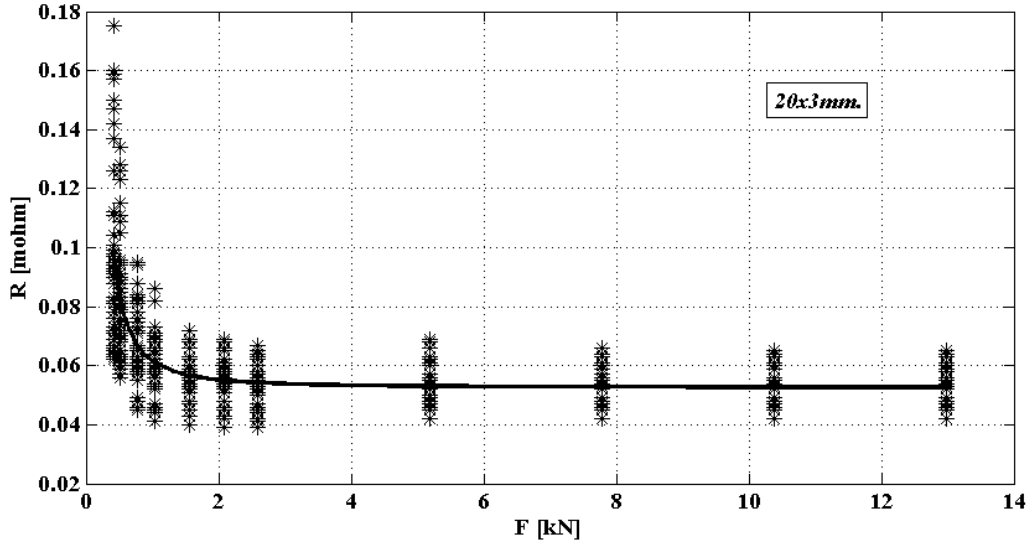
За определянето на контактното съпротивление между шините е избран сравнителният метод даден в [4]. Експерименталната уредба заедно с изследвано контактно съпротивление е показана на фиг.1.

Фиг.1. Външен вид на експерименталната уредба.

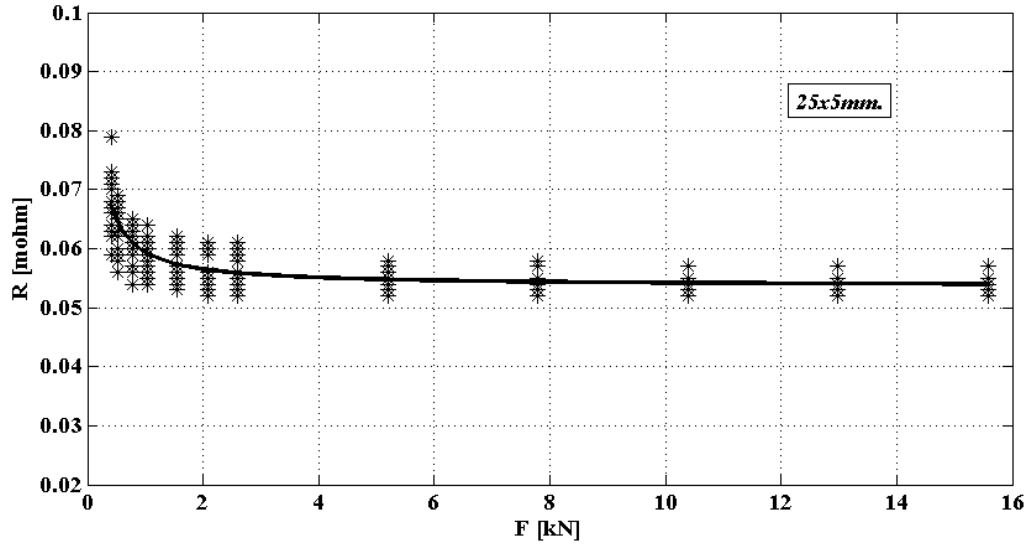
Експерименталните изследвания са проведени върху различни размери медни шини без допълнителна обработка на повърхността. За всеки размер медна шина са изработени по пет образеца, върху които са направени по десет независими опити. От получените експериментални данни са построени графичните зависимости на контактното съпротивление от контактната сила показани на фиг.2, фиг.3, фиг.4 и фиг.5.



a)

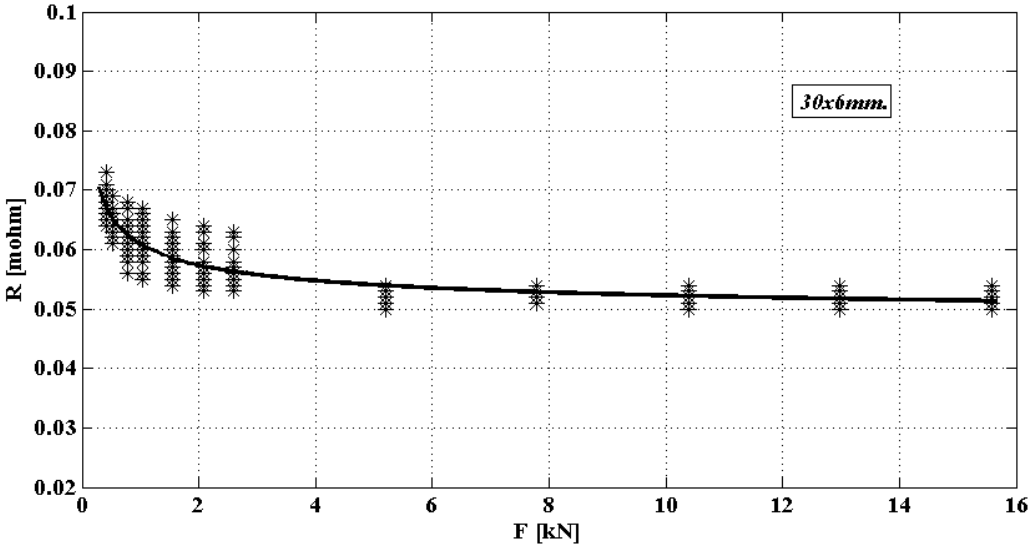


b)

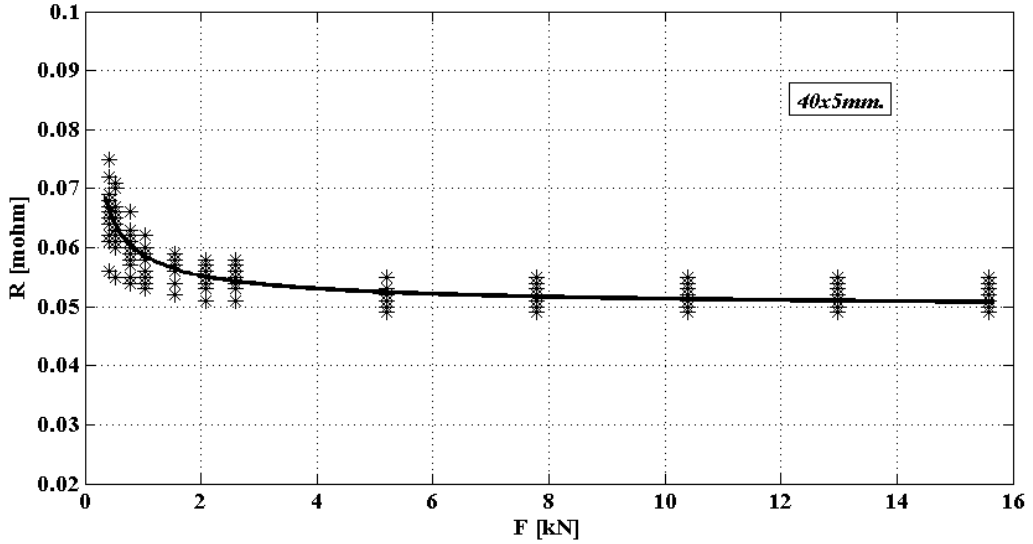


c)

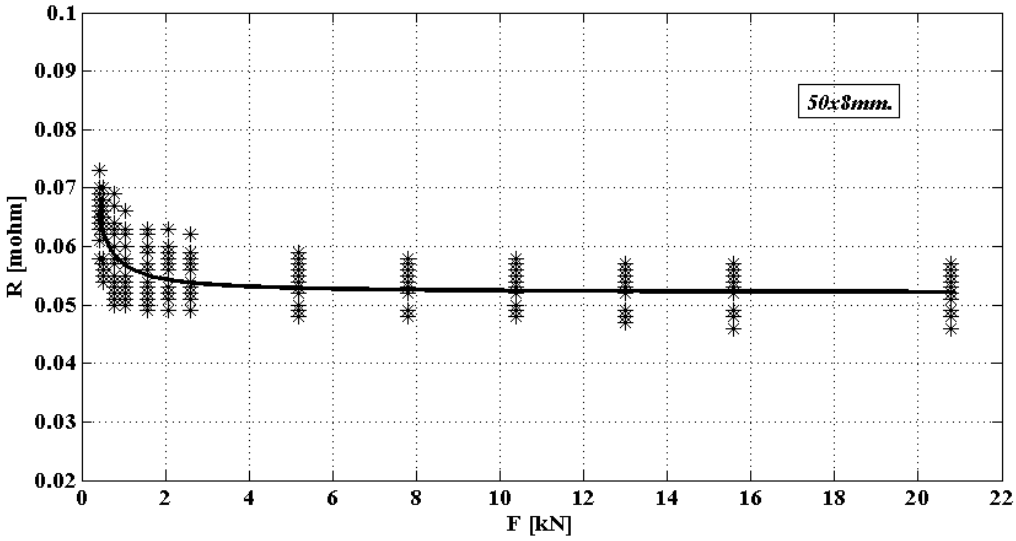
Фиг.2. Зависимост на средната стойност на контактното съпротивление R от контактната сила F между медни шини с размери: a) - 15x3mm; b) – 20x3mm; c) – 25x5mm.



a)

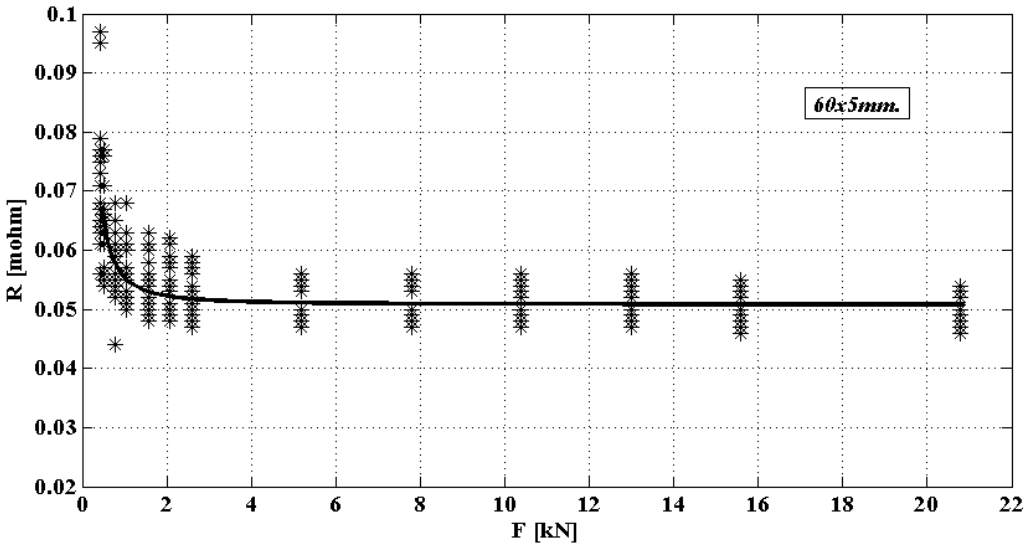


b)

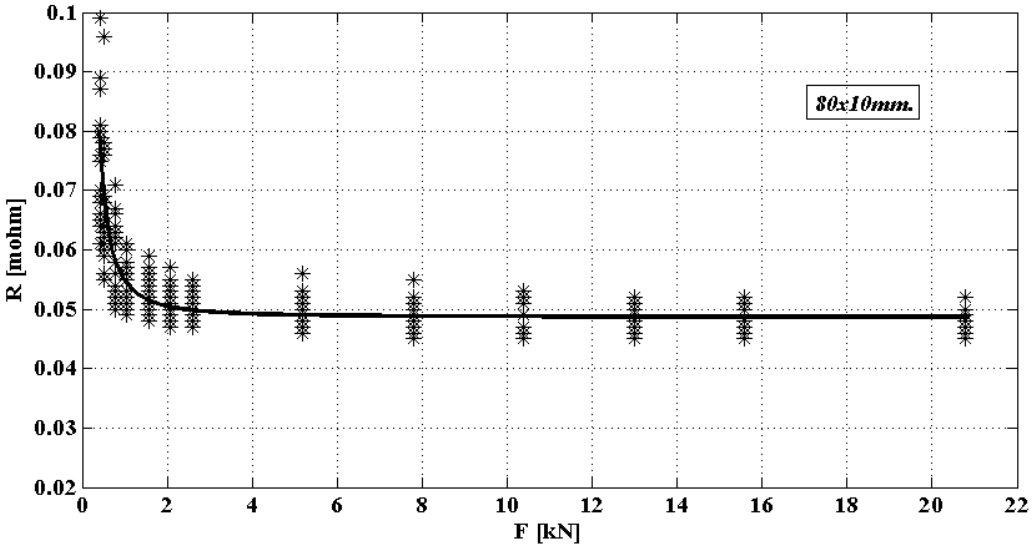


c)

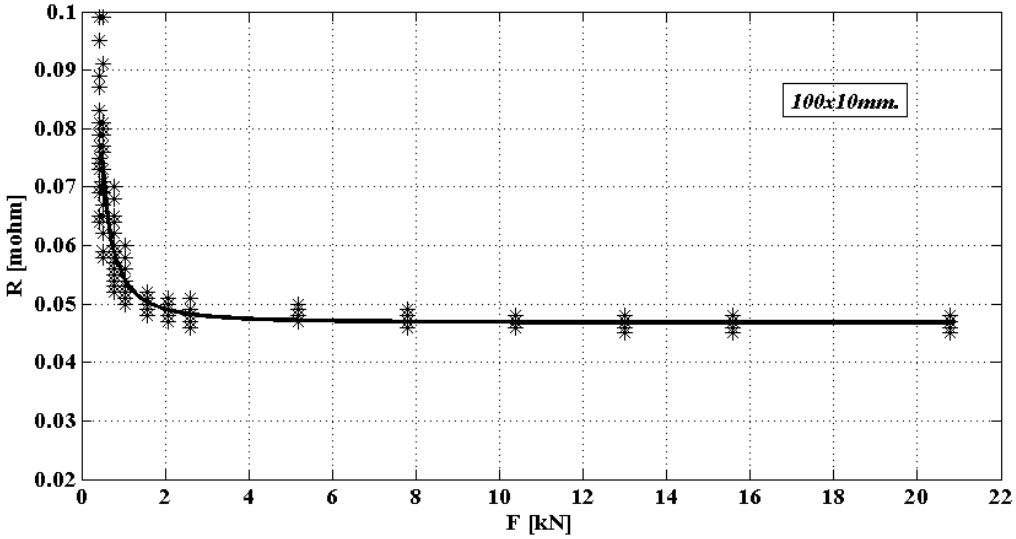
Фиг.3. Зависимост на средната стойност на контактното съпротивление R от контактната сила F между медни шини с размери: a) - 30x6mm; b) – 40x5mm c) – 50x8mm.



a)

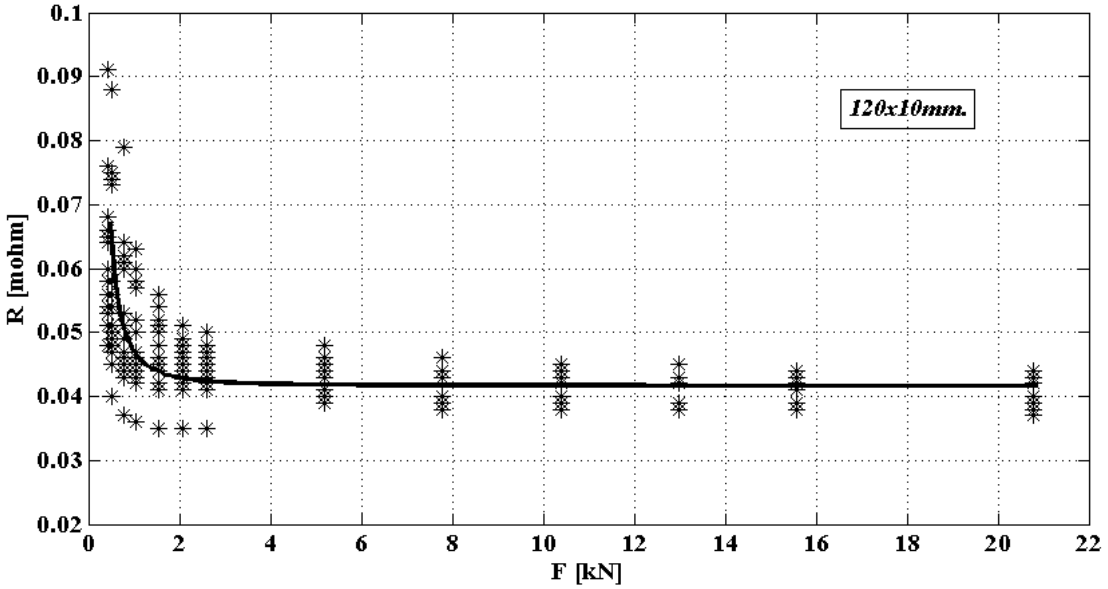


b)



c)

Фиг.4. Зависимост на средната стойност на контактното съпротивление R от контактната сила F между медни шини с размери: a) - 60x5mm; b) – 80x10mm; c) – 100x10mm.



Фиг.5. Зависимост на средната стойност на контактното съпротивление R от контактната сила F между медни шини с размери 120x10mm.

Чрез обработка на експериментални данни е получена следната емпирична зависимост на контактното съпротивление от контактната сила и размерите на шините:

$$R_{cp} = a.10^{-3}.F^{-b} + c.10^{-2}\ [m\Omega] \qquad (1)$$

където: R_{cp} – средна стойност на контактното съпротивление $[m\Omega]$; F – контактна сила $[kN]$; a, b, c – коефициенти, дадени в табл. 1 за различните размери медни шини.

Таблица 1

Стойности на коефициентите a, b и c във формула (1)

Размери на медни шини [mm]	***a***	***b***	***c***
15x3	4,01	2,068	5,569
20x3	8,968	1,8	5,259
25x5	5,762	0,9731	5,36
30x6	13,96	0,4155	4,691
40x5	9,461	0,6657	4,928
50x8	4,956	1,081	5,203
60x5	4,585	1,654	5,08
80x10	6,182	1,752	4,867
100x10	7,864	1,738	4,674
120x10	5,361	2,076	4,165

3. ТЕОРЕТИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОНТАКТНОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ МЕЖДУ МЕДНИ ШИНИ

Разгледани са следните основни типове модели за определяне на контактното съпротивление:

- вариант 1 – съгласно [5]

$$R = k_1 F^{-0,6} + k_2 \sigma_o F^{-1} \tag{2}$$

където: σ_o – специфично повърхностно съпротивление, което за изследваните медни шини съгласно [5] е $3.10^{-11}\Omega.m^2$; κ_1, κ_2 – коефициенти, които за изследваните медни шини съгласно [5] са съответно 90.10^{-6} и 247.10^6; F – контактна сила.

- вариант 2 – съгласно [6]

$$R = \frac{K_o}{(0,102F)^n} \tag{3}$$

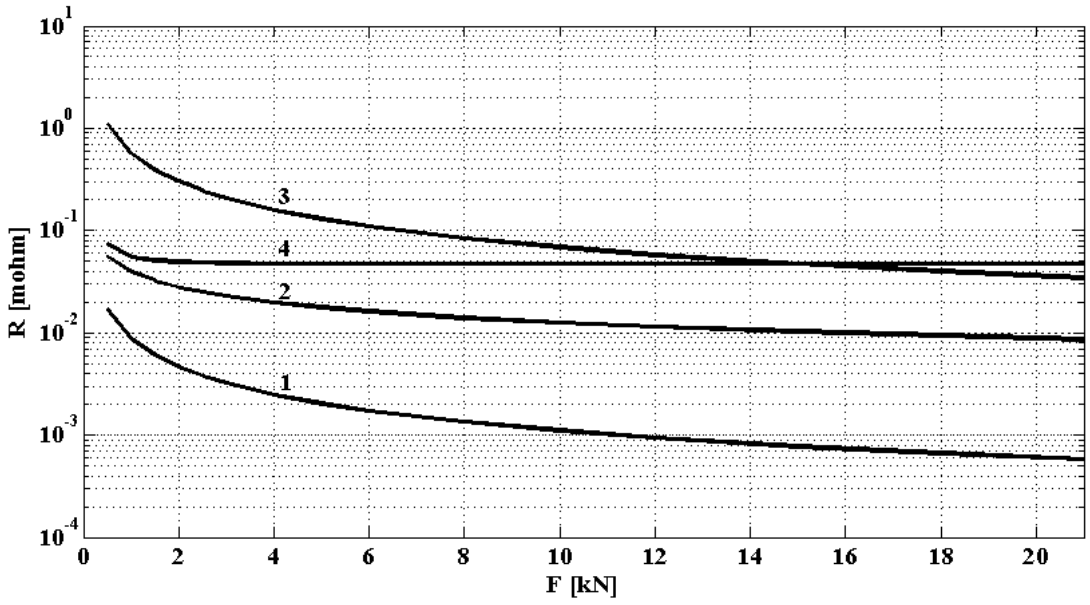
където: K_o, n – коефициенти, които за изследваните медни шини са съответно 400μΩ/N и 0,5 съгласно [6].

- вариант 3 – съгласно [7]

$$R = \frac{0,9}{F^{0,92}\left(10^6 S_{np}\right)^{0,11}} \tag{4}$$

където: S_{np} – привидна контактна площ на контактното съединение [m^2].

На фиг.6 са показани получените графични зависимостти на контактното съпротивление от силата за вариант 1, вариант 2, вариант 3 и формула (1).



Фиг.6. Зависимост на контактното съпротивление R от контактната сила F между медни шини 100x10mm. съгласно: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2; 3 – вариант 3; 4 – формула (1).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Зависимостта на контактното съпротивление от контактната сила за медни шини е съществена до около 2kN. Посочената стойност на силата е по-ниска от силата, получена при номиналния въртящ момент на болта съгласно стандарта.

2. Контактното съпротивление зависи слабо от привидната контактна площ.

3. При големи контактни сили, които са характерни за болтови контактни съединения, резултатите изчислени съгласно вариант 3 са най-близки до експерименталните.

4. При малки контактни сили, резултатите получени съгласно вариант 2 са най-близки до експерименталните.

5. Вариант 1 и вариант 2 не са приложими за изчисляване на болтови контактни съединения.

6. Предложената емпирична зависимост е приложима за изчисляване на контактното съпротивление между медни шини с болтова връзка.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Александров А., Ячев И., ***Електрически апарати - част II***, Авангард Прима, София, 2010г.

[2] Ценева Р, ***Електрически контакт***, София, 2004г.

[3] Дзекцер Н.Н., Висленев Ю. С., ***Многоамперные контактные соединения***, Ленинград Енергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987г.

[4] Маламов Д., Хаджиев И., ***Експериментално изследване на контактно съпротивление между шини***, IV научна конференция - ЕФ 2012 том 1, Созопол, България, стр. 99-105.

[5] IEC/TR 60943 – ***Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals***.

[6] Розанов Ю. К., ***Электрические и электронные аппараты - Часть первая - Электромеханические аппараты***, Москва, 2000.

[7] Адоньев Н. М., Афанасьев В. В., Борисов В. В., ***Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов***, Ленинград, 1988.

Автори: Иван Хаджиев, ас., катедра „Електротехника”, ТУ-София, филиал Пловдив, докторант, кат. „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *hadzhiev_tu@abv.bg*; Диан Маламов, доц. д-р, катедра „Електротехника”, ТУ-София, филиал Пловдив, E-mail address: *deanmalamov@abv.bg*; Иван Ячев, проф. дтн, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *yatchev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. дтн Илиана Маринова

СЪВРЕМЕННИ МЕТОДИ ЗА БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ НА СЪСТОЯНИЕТО НА КАБЕЛНИ ЛИНИИ

Емилия Димитрова

Резюме: *Този доклад се фокусира върху методите за оценка на състоянието на кабелни линии. По-голямата част от повредите и прекъсванията в кабелите са свързани с вътрешни дефекти, а останалите са резултат от външните въздействия. Кабелните линии са положени в земята, така че единственият възможен физически достъп до тях е в краищата им и основната практическа възможност за диагностика е откриване на дефекти чрез електрически методи. Мястото на повредата по дължината на кабела може да се локализира чрез ехо-импулсни рефлектометри. Принципите на тяхната работа са базирани на съвременни методи за безразрушителен контрол (NDT) на състоянието на кабела.*
Ключови думи: *кабелни мрежи, безразрушителен контрол, рефлектометрия*

CONTEMPORARY METHODS FOR NONDESTRUCTIVE TESTING (NDT) OF THE STATE OF CABLE LINES

Emiliya Dimitrova

Abstract: *This paper is focusing on the methods of condition assessment of the cable lines. The majority of the faults and outages in the cables are related to internal defects, while the rest are related to the external influences. The cable lines are directly buried, so the only possible physical access to them is at the terminations and electrical defect detection is the main practical possibility for diagnostics. The location of the fault along the cable length can be found by Time Domain Reflectometers. The principles of their operation are based on contemporary methods for nondestructive testing (NDT) of the cable state.*
Key words: *cable lines, nondestructive testing, reflectometry*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Безпроблемната работа на всички кабелни мрежи се определя на първо място от актуалното състояние на кабелната изолация, като от съществено значение е периодичното контролиране на амортизационните показатели.

При провеждане на изпитанията на кабели с пластмасова изолация възниква и проблем, свързан с техния ограничен срок на експлоатация, когато са поставени в стандартни условия на работа. Правилният избор на стойностите на напрежение на тестване и продължителността на изпитанията се явяват важен компромис между значимостта на теста и възможното разрушаване на кабела. Налице е

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

необходимостта от специфични методи на тестване, чрез които да се извърши квалифициран анализ за цялостното състояние на даден участък, да се определи степента на стареене на изолацията и прогнозира вероятният остатъчен живот на участъка. Новосъздадените методи за диагностика позволяват да се извърши анализ на състоянието на мрежата така, че да може да се отговори подробно на въпросите, касаещи експлоатационната надеждност, качествата на изолационния материал, интегралната остатъчна годност и дали при повреда на даден участък е разумно той да се ремонтира или подмени [1, 2]. Тъй като около 90% от наличностите в мрежата са положени и въведени в експлоатация преди повече от 20 години, се препоръчва измервателно-техническо наблюдение и поддръжка на място по време на целия остатъчен живот [1, 3]. В този случай е неизбежно използването на диагностичен метод, който не натоварва кабелната мрежа, за да не се влоши вероятното ѝ критично състояние [1-5].

2. ИМПУЛСНИ ИЗМЕРВАНИЯ ЗА ОТКРИВАНЕ НА ПОВРЕДИ ПО МЕТОДА НА ОТРАЖЕНИЕ

Импулсният метод за откриване на повреди в кабелните линии се основава на отражението на импулса, след като е претърпял изменение в мястото на неоднородност в хомогенната верига. Тази нееднородност всъщност се изразява в промяна на вълновото съпротивление на кабела. Подаден в кабела импулс се отразява в началото му, срещайки тази промяна. От времето за разпространение на импулса може да се измери разстоянието l_x до мястото на отражение, ако се знае скоростта на разпространение на импулса в кабела:

$$l_x = t\frac{V}{2}, \text{ m} \tag{1}$$

Изменения във вълновото съпротивление настъпват при късо съединение между жилата, прекъсване или серийни повреди. За осъществяване измерването в кабела се подават токови (напрежителни) краткотрайни импулси. Имат правоъгълна или камбанообразна форма. Използват се също синусоидални и косинусоидални импулси, с голям брой компоненти променливо напрежение с различни честоти. Те се проявяват в съответствие с техните фази и амплитуди.

Затихването в кабела зависи от честотата, той се проявява като ниско-честотен филтър, поради което импулсът променя формата си. Вълновото съпротивление z на кабел е съпротивлението, което се измерва в началото на един безкрайно дълъг кабел:

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}}, \Omega \tag{2}$$

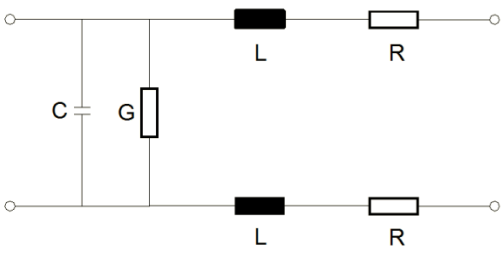
В далекосъобщителни кабели с малък диаметър затихването е по-голямо, поради което вълновото съпротивление зависи не само от дължината и се вземат предвид следните отклонения [1]:

$$z = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}, \Omega \tag{3}$$

Обяснението на тази зависимост може да се изрази чрез представяне схемата на един кабел (фиг.1).

При кабели с малък диаметър (0,4; 0,5; 0,6 mm) серийното съпротивление влияе

най-много и вълновото съпротивление се определя от него. При хомогенни (изправни) кабели проводимостта G се приема за константна и не оказва влияние.



C - Паралелен капацитет,
G – Проводимост,
L - Серийна индуктивност,
R - Серийно съпротивление

Фиг.1. Заместваща схема на кабел

Скоростта на разпространение на електрическите сигнали по кабели е равна приблизително на половината от скоростта на светлината и се приема за условно независима от измервателната честота. Това условие се има предвид при кабели с малък диаметър и с дължина над 1km, когато дисперсията не може да се пренебрегне.

За локализиране на повреди се използва половината от скоростта - V/2, която зависи от вида и конструкцията на изолационния материал (ε_{rel}) и от скоростта на светлината *c* [1]:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon_{rel}}} \qquad (4)$$

Времето за разпространение на импулса до края на кабела и връщането му обратно се измерва в μs. Оттук се изчислява и разстоянието до мястото на отражение (повреда) по формула (1) [2]. Ориентировъчни стойности за V/2 при различни кабели, както и допустимите отклонения от разсейване на сигнала, могат да бъдат взети от таблици [1].

Дисперсията в далекосъобщителните кабели се дължи на честотно зависимото групово време за разпространение и се отразява като промяна на скоростта като функция на разстоянието.

За ***затихването*** при непупинизирани кабели при използване на импулсния метод за измерване са валидни формулите [3]:

за високочестотните компоненти (при $\omega L \geq R$): $a(ca)=\frac{R}{2Z}+\frac{GZ}{2}$, Np/km (5)

за нискочестотните компоненти (при $\omega L \leq R$): $a(ca)=\sqrt{\frac{R\omega C}{2}}$, Np/km (6)

В случая активната компонента определя в голяма степен затихването в кабела. При кабели с диаметър на жилото 0,4 mm затихването е значително по-голямо, отколкото при тези с диаметър 1,2 mm.

Нарушаването на хомогенната структура на кабела в определено място от дължината му води до изменение в индуктивността или капацитета, както и на проводимостта G, а оттам и на вълновото съпротивление. Така част от преминаващият импулс се отразява обратно в източника. Остатъчният импулс продължава да напредва до следващата нехомогенност, след което се връща обратно към началото на кабела.

Отразеното импулсно напрежение се определя посредством ***коефициента на***

отражение в проценти [1]:

$$r = \frac{-z}{2R_f+Z}, \% \quad (7)$$

където r - коефициент на отражение;

R_f - съпротивление на повредата;

Z - вълново съпротивление на кабела

Формула (7) е валидна при паралелни повреди, при които отразеният импулс променя полярността си. При серийни повреди (прекъсвания, изолации и др.) импулсът има положителна полярност и е в сила следната формула [3]:

$$r = \frac{R_f}{R_f+2Z}, \% \quad (8)$$

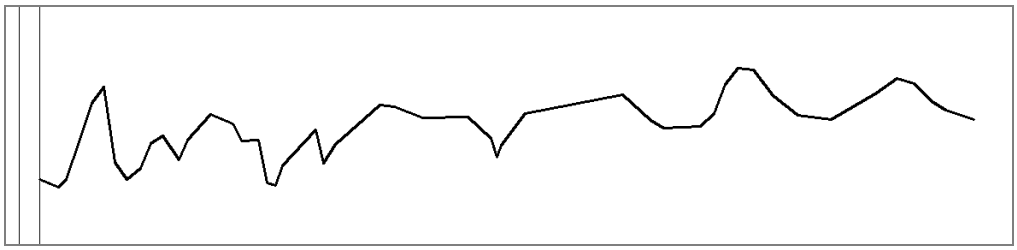
Справка за стойностите на коефициента на отражение в зависимост от съпротивлението на повредата и вълновото съпротивление може да бъдае направена от таблици [5].

3. ПРАКТИЧЕСКО ИМПУЛСНО-ЕХОВО ИЗМЕРВАНЕ

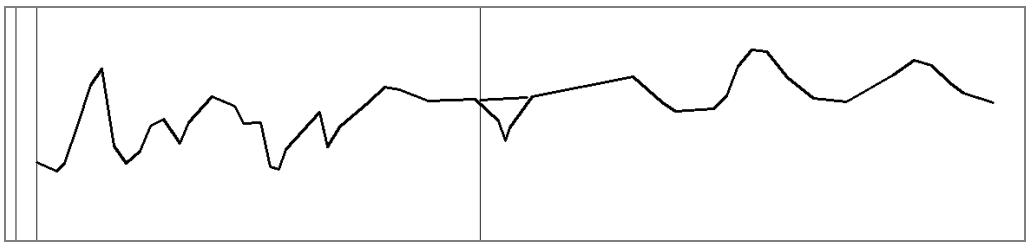
Импулсно-отражателните (ехови) измервания се делят на три категории: директно измерване, сравнително измерване и измерване на разлика

При ***директно измерване*** към повредения кабел се свързват само два измервателни проводника. За точността на измерването тук се разчита на хомогенността на кабела. Повреди като „сплитане", „земя", „изолация" се измерват успешно. При нехомогенни кабели или такива с Т-муфи (деривации) измерването се осъществява трудно. На фиг.2 е дадена ехограма на такъв кабел, при който са свързани различни дължини от различни видове кабели, поради което възникват голям брой отражения. Мястото на повредата е много трудно да се определи.

При ***сравнително измерване в реално време*** към изхода на рефлектометъра се включват изправна и повредена двойка жила, които се превключват посредством реле. Сравняват се ехограмите на жилата. На фиг.3 е дадена такава ехограма.



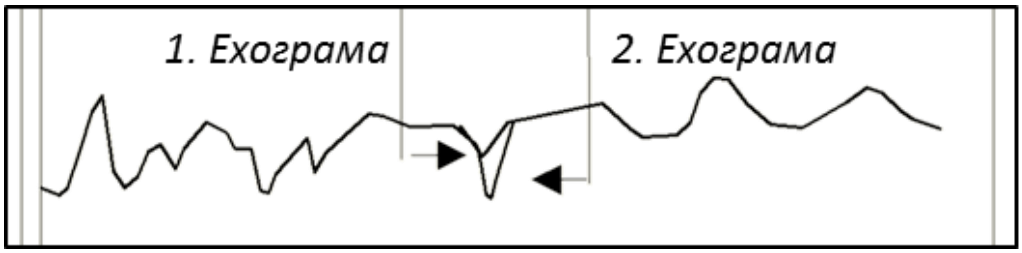
Фиг.2. Ехограма на нехомогенен кабел при директно измерване: *U =f(l)*



Фиг. 3 Измерване със сравнение на жила

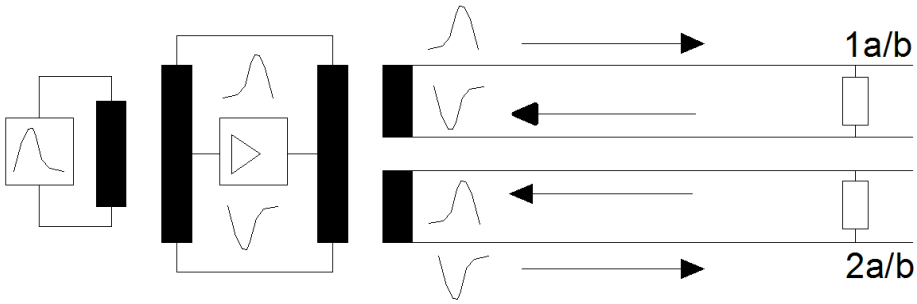
За осъществяване на ***сравнително измерване, изместено във времето,*** е необходимо да се разполага със запаметяващо устройство, каквото притежават всички съвременни ехометри. Първо се запаметява ехограмата на кабелната отсечка

(фиг.4). Чрез щосгенератор или посредством прегарящо устройство повредата в тази отсечка се трансформира в нискоомна. Прави се втора ехограма за мястото на прогаряне. При сравнение ясно се вижда мястото на повредата.

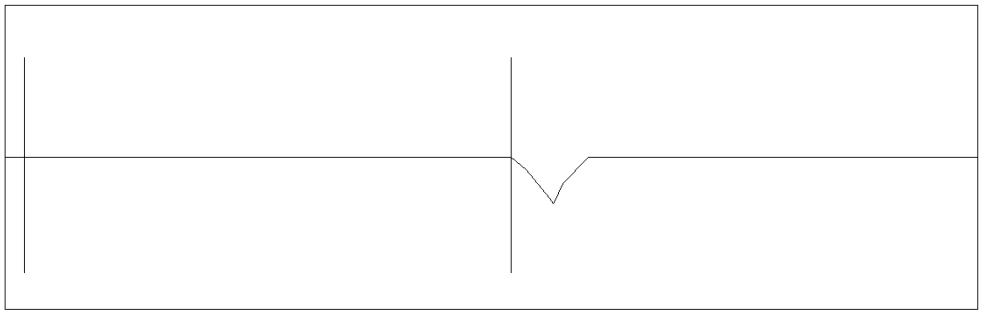


Фиг.4. Сравнително измерване с изместване във времето

При прилагане на метода ***Измерване на разлика*** всички нехомогенности, възникващи в едно и също място, се неутрализират и остава видима само действителната разлика, т.е. самата повреда (фиг.5 и фиг.6). При измерване на кабели с Т-муфи този метод може да се приложи успешно.

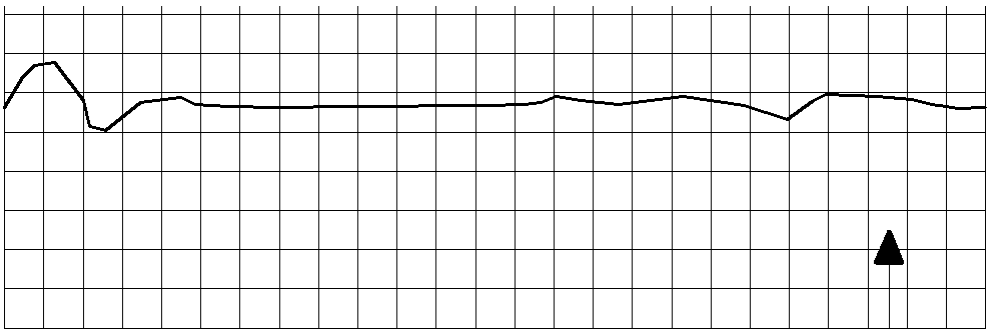


Фиг.5. Измерване на разлика при симетрични далекосъобщителни кабели



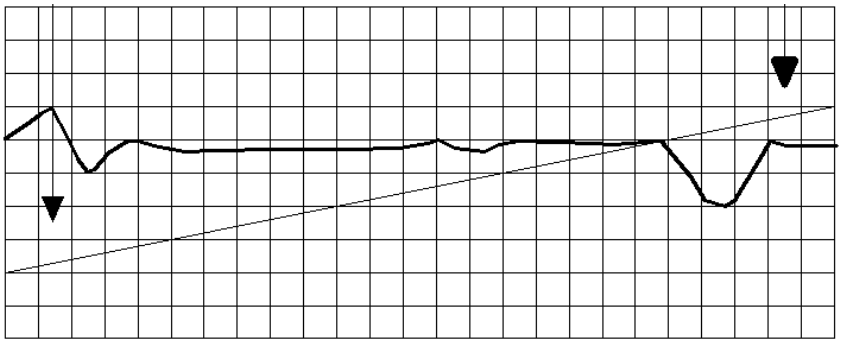
Фиг.6. Ехограма при измерване на разлика

При дълги кабели затихването на импулса от повредата е голямо, при което и относително нискоомни повреди трудно се различават. Необходимо е прилагане на методи с усилване. На фиг.7 са показани ехограми на измерване по-дълъг кабел. При уреди с усилване като функция на разстоянието е засилено отражението на повредата.



Фиг.7-а Ехограма с линейно усилване

Фиг.7-б Ехограма при прекалено голямо усилване



Фиг.7-в Ехограма при усилване като функция на разстоянието

4. ДИАГНОСТИЦИРАНЕ НА СТАРЕЕНЕТО

Актуалните методи за диагностициране на стареенето при изолирани с ВПЕ кабели за осигурителни линии могат да се разделят на три групи според последствията за проверяваната отсечка:

- Разрушителна проверка с вземане на проба;
- Методи, съкращаващи експлоатационния живот;
- Безразрушителна диагностика.

Един критичен анализ на методите показва, че въпреки голямата динамика на развитие на техниките за диагностициране, досега не е познат метод, който да може да удовлетвори едновременно толкова различни изисквания като:

- сигурна оценка на остатъчния експлоатационен живот,
- локализиране на областите с най-висока степен на стареене,
- безразрушителна проверка на положените кабелни отсечки.

Към диагностиката и в бъдеще ще принадлежи стратегията на диагностициране, с която се прилагат различни техники по определени критерии и резултатите се оценяват на базата на наличния опит.

Разрушителни изпитания:

Най- изчерпателните резултати за диагностициране на стареенето и днес дава лабораторната проверка на кабелен образец. Най-често се вземат кабелни проби с дължина от 10 до 20 m от отсечката и се дава характеристика с прилагане на електрични и неелектрични методи за проверка. Към тях се числят измерванията на частичния разряд и коефициента на загубите, както и определяне на остатъчната здравина с променливо напрежение при стъпков тест, включително определяне на причината за разряда .

Допълнителни заключения дава детайлната проверка на структурата, проверка за пропускливост, за да се направи преценка на изолационния слой и за повърхността на вътрешния проводящ слой, както и за микроскопичен анализ на картината на "water tree" на оцветени тънки слоеве. Обобщението на всички резултати прави възможна, в смисъла на диференциацията от по-горе, оценка както на глобалното, така и на локалното стареене.

Методи, които съкращават експлоатационния живот:

Традиционно и доказало се средство за определяне наличието на остатъчен живот на кабели е проверката с напрежение. Тъй като отделните феномени на стареенето при изолирани с ВПЕ (омрежен полиетилен - VPE, XLPE) кабели реагират различно на формата на изпитващото напрежение, остава актуален въпросът доколко надеждни са данните, получени от различните изпитания и необходимите за дискусията амплитуди. Сравняват се най-вече постоянното напрежение с променливо напрежение с мрежова (50 Hz) и по-ниска (0,1 Hz) честота.

Проверката само с напрежение позволява предимно преценка за състоянието на кабела според локалните феномени на стареенето, тъй като сингулярните проявления като "водни дървета" реагират особено чувствително на повишаване напрежението повече от работното напрежение. Независимо от конкретния модел на стареене на изолационната система, всички натоварвания с напрежение с ниво над работното водят до повишено изразходване на остатъчния живот.

За решаване на формулираните тук цели описаните до сега методи не са подходящи, тъй като намират само ограничаваща продължителността на живота сингулярност при определен изпитван обект.

Безразрушителна диагностика:

Продължителното стареене на полимерните изолационни системи зависи от морфологичните промени в частично кристалните обемни изолатори от структурата на граничните повърхности към проводящите слоеве. Към това се числят локални феномени като „водни дървета", които могат да бъдат оптично открити, както и физико-химични, трудно откриваеми глобални промени, които обаче се проявяват в един забележим спад на електрическата здравина. Един от безразрушителните методи за диагностициране е с помощта на ***измерване на***

коефициента на загубите. Той е подходящ по принцип за локално измерване на маслено-хартиени изолации, но не е удачно приложим при оценка на овлажняването. Този метод на изпитване се реализира с помощта на трептящи вълни при работно напрежение. Чрез подаване на постоянен ток обектът се зарежда до работно напрежение, след което се създава поредица от резонансни кръгове от обекта на изпитване и бобина с въздушна сърцевина с помощта на превключвател с бързо време на включване. Този кръг започва да трепти при резонансна честота, равна на:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{9}$$

Индукцията на въздушната сърцевина се избира така, че резонансната честота да е близка до честотата на обслужващото напрежение. Изолацията на кабел за средно напрежение обикновено има сравнително нисък коефициент на разсейване. Това в комбинация с ниския коефициент на загуби на бобината води до създаване на резонансен кръг с висок качествен фактор.

В резултат се появява трептяща вълна при резонансна честота f с време на затихване от 0,3 до 1s.

Това води до създаване на няколко десетки цикъла на захранване на изпитвания образец, в резултат на което се генерира частичен заряд. Измервателната верига открива всички импулси на частичния разряд, които възникват по време на трептящите вълни.

Локализирането на импулсите на частичния заряд става по метода на бягащата вълна.

Стойностите на капацитета ѝ могат да се изчислят на базата на времето на трептящата вълна и честотните характеристики.

Един от най-малко познатите до сега и едновременно екстремно чувствителни индикатори е ***методът на електрическата поляризация*** на изолационната система, който може да се регистрира например с промяната на поведението при разряд (деполяризация/ формиране) след дефинитивно зареждане (поляризация/ формиране) с постоянно напрежение. Необходимата амплитуда на формиращото напрежение по принцип може да бъде избрана толкова ниска, че всяко допълнително увреждане на кабела може да бъде изключено. Тъй като големината на измервателния сигнал значително се влияе от остарелия интегрален обем, при възможностите за диагностика тук се набляга на откриването на глобални феномени. В момента при изолационни системи с ВПЕ се използва за контрол в голяма степен ***IRC-анализът***, който почива на измерване и проверка на изотермичния ток на релаксация при константна температура. Методът е разработен при диагностициране на остарели в реален режим на работа кабели с ВПЕ изолация, сравнени с нови кабели и се е доказал при оценката на голям обем изолационен материал. Определяне степента на стареене чрез проверка на релаксационното поведение се базира на изотермично токово измерване в интервала от 5 до 1800s след формирането с постоянно напрежение. Натоварването на диелектрик с електрическо поле (формиране) води до поляризация чрез ориентиране в една посока на диполите, изместване и акумулиране на зарядите, които влияят на диелектрическите свойства на материала. След изключване на

електрическото поле в полимера протичат процеси на изравняване на зарядите като функция на времето. Те се определят във време $t>5s$ предимно чрез термично освобождаване на носители на заряд (деполяризация, релаксация). Всеки процес на стареене при полимера предизвиква обикновено разграждането му и така променя структурата и морфологията на диелектрика. От това следват промени в характера на релаксационните свойства.
Релаксационните процеси при разреждане на кабели, изолирани с ПЕ/ ВПЕ, след формиране с постоянно напрежение водят до релаксационен ток, които в зависимост от съответния механизъм на стареене има различни компоненти за време и ток. Тези компоненти могат да бъдат използвани за осъществяване на безразрушителен анализ на състоянието на диелектрика посредством съвременна апаратура и компютърен анализ на резултатите.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диагностицирането на стареене и повреди на кабели се определя от специфичните условия на работа и продължителността на експлоатацията.

Съвременните методи за диагностика на положен кабел се свеждат до квалифициран анализ за цялостното състояние на участъка, определяне степента на стареене на изолацията и прогнозиране на вероятния остатъчен живот.

Принципът на действие на съвременните уреди за локализиране на повреди по кабелни линии се базира на импулсния метод, който се основава на отражение на подаден в кабела импулс, след като е претърпял изменение в мястото на неоднородност в хомогенната верига. В доклада са разгледани основните величини, които са необходими за провеждане на измервания с цел откриване на повреди по метода на отражение.

Методите за диагностика на стареенето на кабела (IRC анализ, затихване с връзка по напрежение), както и методът на отражение, са особено ефективни в случаите, при които поради напреднала фаза на стареене на кабелната изолация високоволтовите тестове не дават желаните резултати и предразполагат към допълнително разрушаване на кабела. Чрез метода за безразрушителна диагностика посредством измерването на изотермичния ток на релаксация (IRC анализ) става възможна количествената оценка за сигурността на експлоатация, прогнозата за продължителността на живота и преценката на качеството на изолационния материал.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Николов, Н., „Кабелна съобщителна техника“ ч.III: „Измервания за локализиране на повреди по съобщителни кабели“, Нови знания, София 2000.

[2] Wester F., *Condition Assessment of Power Cables using Partial Discharge Diagnosis at Damped AC Voltages - OWTS the advanced technology for PD-diagnosis,*

Optima Grafische Communicatie, Rotterdam, The Netherlands, 2004.

[3] Тодоров, К., Н. Николов, „Кабелна съобщителна техника“, 1998.

[4] Електрически изпитвателни прибори, Продуктов каталог, Megger, 2014.

[5] Test and Measurement, Catalogue, Seba KMT, 2012

Автор: Емилия Андонова Димитрова, ас. д-р, катедра „Съобщителна и осигурителна техника и системи”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“ - София, E-mail address: *edimitrova@bitex.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Стефчо Гунински

ПОВИШАВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА МОДУЛ ЗА ШИРОЧИННО ИМПУЛСНА МОДУЛАЦИЯ

Кръстю Кръстев, Радка Кръстева

Резюме: *При преобразуване на напрежението от постоянно в трифазно, с използване на широчинно импулсна модулация, се предава част от входната мощност. За повишаване на тази мощност се използват различни методи. В тази статия се предлага метод за повишаване на ефективността на инвертора, чрез модифициране на синусоидалната функция с добавяне на трети хармоник.*
Ключови думи: *модул за широчинно-импулсна модулация*

INCREASING EFFICIENCY MODULE PULSE WIDTH MODULATION

Krastyu Krastev, Radka Krasteva

Abstract: *During the conversion the voltage from constant (DC) to three-phase, using a pulse width modulation, is transmitted a part of the input power. For increasing that power is used different methods. In this article is proposed a method for increasing the efficiency of the inverter by modifying the sine function with addition a third harmonic.*
Key words: *module pulse width modulation*

1. УВОД

За постигането на високи скорости на асинхронния двигател (АД) трябва да се преодолеят редица проблеми при създаването на инвертора. Използването на широчинно-импулсна модулация (ШИМ) изисква честотата му да е поне 21 пъти по-висока от честотата на първия хармоник на напрежението на изхода на ШИМ. Високата честота води до повишаване броя на комутациите и застъпванията (dead time) на транзисторите за единица време. Всичко това намалява ефективността на инвертора. За нейното повишаване, трябва да потърсим други методи.

Най-често използваният алгоритъм за ШИМ при инверторите е пространствено-векторната ШИМ (SV-PWM), който се смята за най-ефективен. При него ефективната стойност на изходното напрежение е с 15% по-висока от тази на синусоидалния ШИМ (SPWM).

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

$$U_{SVM} = U_{Sin}.\frac{2}{\sqrt{3}} = U_{Sin}.1.1547, \quad (1)$$

където U_{SVM} и U_{Sin} са ефективните стойности на напреженията съответно на SV-PWM и SPWM.

Основен недостатък на SV-PWM е, че колебанието на напрежението на звездния център около нулата е в рамките на ±15%, което го прави опасен при управление на двигатели при много висока скорост.

Подходящ за висока скорост е синусоидалният ШИМ, тъй като при него напрежението на звездния център е 0V, и това няма да доведе до биене на вала при висока скорост. Начин за повишаване на ефективността при SPWM е добавяне на трети хармоник към основния. В статията ще бъде изследвана ефективността на този алгоритъм.

2. СИНУСОИДАЛНА ШИРОЧИННО-ИМПУЛСНА МОДУЛАЦИЯ С ИНЖЕКТИРАН ТРЕТИ ХАРМОНИК

Ако синусоидалният ШИМ извежда напрежението u_{Sin}, то синусоидал-ният ШИМ с инжектиран трети хармоник извежда напрежението u_{Sh}.

$$u_{Sin} = U_m.\sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

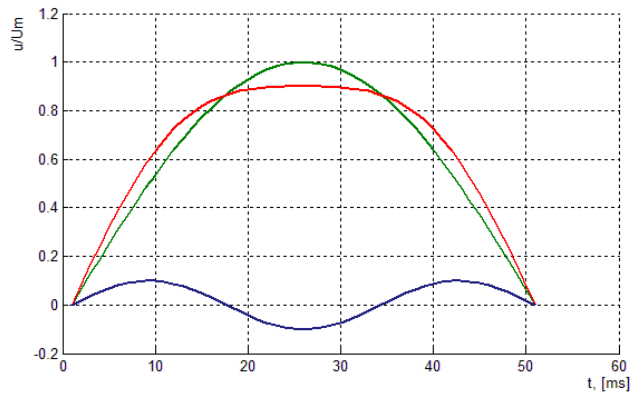
$$u_{Sh} = U_m.\sin(\omega t + \varphi) + m.U_m.\sin(3\omega t + \varphi), \quad (3)$$

където U_m е амплитудата, а фазовото отместване е φ=0°, 120°, 240°. Коефициентът m е индекс на модулация и приема стойности между 0 и ½, тъй като при m>1/2 максималната стойност $u_{Sh_{\max}} > 1$ (фиг.1, фиг.2). Може да се покаже, че сумата от напреженията (3) по трите фази е нула, което означава, че напрежението на звездния център е 0V.

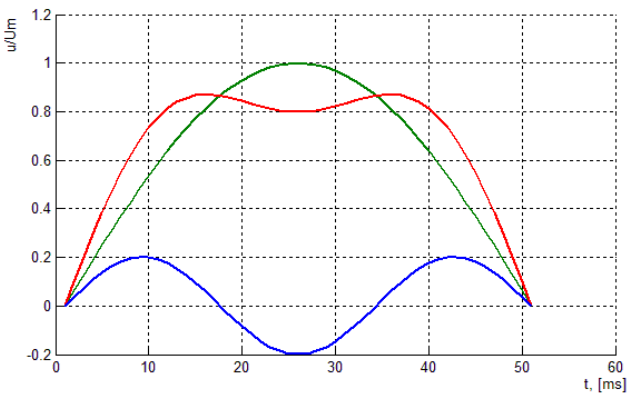
Ефективните стойности на напрежения u_{Sin} и u_{Sh} са:

$$U_{Sin} = \sqrt{\frac{1}{T}.\int_0^T U_m^2.\sin^2(\omega t + \varphi)dt} = U_m \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$U_{Sh} = \sqrt{\frac{1}{T}.\int_0^T \left(U_m.\sin(\omega t + \varphi) + mU_m.\sin(3\omega t + \varphi)\right)^2 dt} = U_m \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1+m^2} = U_{Sin}\sqrt{1+m^2} \quad (5)$$



Фиг.1. *Графики на синусоидален сигнал, трети хармоник и сума от двата сигнала при m=1/9.*



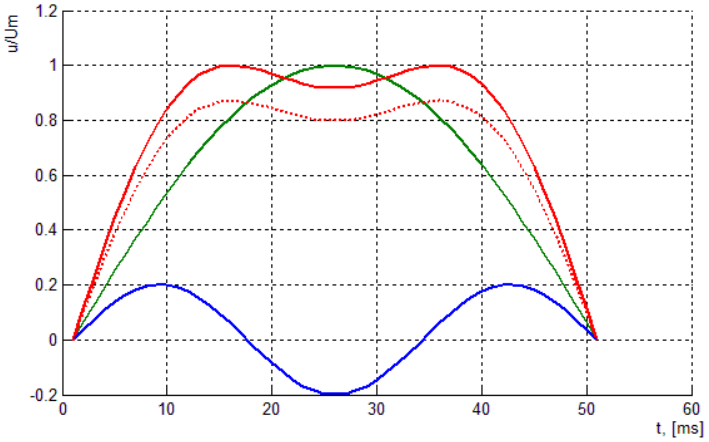
Фиг.2. *Графики на синусоидален сигнал, трети хармоник и сума от двата сигнала при m=1/5.*

От (5) се вижда, че напрежението с инжектиран хармоник U_{Sh} е по-голямо от U_{Sin} и зависи от модулационния индекс m. Може да се намери максималната стойност, която ще достигне в един полупериод напрежението u_{Sh}. За тази максимална стойност $u_{Sh_{\max}}$ се получава израза $u_{Sh_{\max}} = U_m g(m)$, където $g(m)$ е функцията:

$$g(m) = \begin{cases} (1-m), m \in \left(0, \frac{1}{9}\right) \\ \sqrt{\frac{3m+1}{3m}}\left(m+\frac{1}{3}\right), m \in \left[\frac{1}{9}, \frac{1}{2}\right] \end{cases} \quad (6)$$

3. СИНУСОИДАЛНА ШИРОЧИННО-ИМПУЛСНА МОДУЛАЦИЯ С ИНЖЕКТИРАН ТРЕТИ ХАРМОНИК И УВЕЛИЧЕНА АМПЛИТУДА

В границите в които се изменя m в (6) се вижда, че $g(m) < 1$. Това означава, че максималната стойност на напрежението не достига до напрежението на постояннотоковия източник $u_{Sh_{\max}} < U_m = U_{DC}/2$ (фиг.1, фиг.2). Следователно, сигналът може да се умножи по коефициент k така, че $u_{Sh_{\max}}$ да достигне максималната стойност за нарастване в рамките на ШИМ-а U_m (фиг.3).



Фиг.3. *Графики на синусоидален сигнал, трети хармоник и сума от двата сигнала при m=1/5, умножен по k.*

Така се получава сигнала u^*_{Sh}

$$u^*_{Sh} = k\left(U_m.\sin(\omega t + \varphi) + mU_m.\sin(3\omega t + \varphi)\right). \quad (7)$$

Следователно максималната стойност $u^*_{Sh_{\max}}$ ще бъде:

$$u^*_{Sh_{\max}} = k.u_{Sh_{\max}} = kU_m g(m) = U_m \quad (8)$$

От (8) може да се намери стойността на k.

$$k = \frac{1}{g(m)} \tag{9}$$

Тогава след заместване се получава

$$u_{Sh}^{*} = \frac{1}{g(m)}\left(U_m.\sin(\omega t + \varphi) + m.U_m.\sin(3\omega t + \varphi)\right) = \frac{1}{g(m)}u_{Sh} \tag{10}$$

Ефективната стойност на u_{Sh}^{*} е

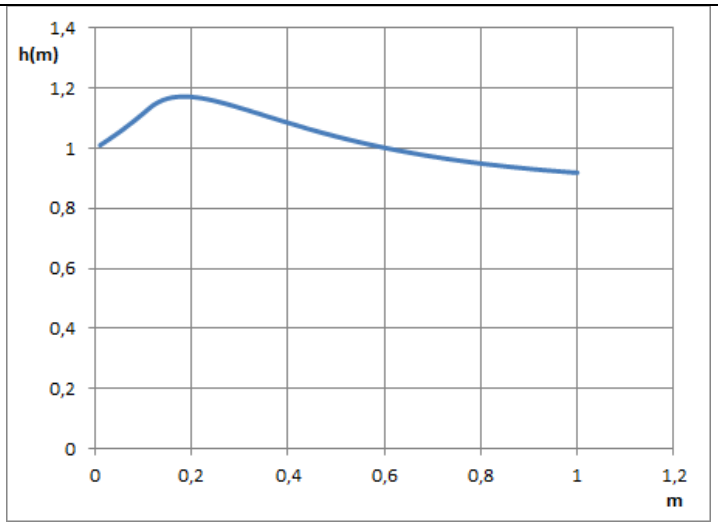
$$U_{Sh}^{*} = \frac{1}{g(m)}U_{Sh} = U_{Sin}\frac{\sqrt{1+m^2}}{g(m)} = U_{Sin}.h(m) \tag{11}$$

Функцията $h(m)$ представлява ефективността на синусоидалния ШИМ с инжектиран трети хармоник и умножена по k амплитуда, спрямо синусоидалния ШИМ (фиг.3). Затова тази функция ще бъде изследвана, за да се оцени ефективността на предложения алгоритъм.

$$h(m) = \frac{\sqrt{1+m^2}}{g(m)} = \begin{cases} \dfrac{\sqrt{1+m^2}}{1-m}, m \in \left(0, \dfrac{1}{9}\right) \\ \dfrac{\sqrt{1+m^2}}{\sqrt{\dfrac{3m+1}{3m}}.\left(m+\dfrac{1}{3}\right)}, m \in \left[\dfrac{1}{9}, \dfrac{1}{2}\right] \end{cases} \tag{12}$$

Тъй като $h(m)$ зависи от индекса на модулация m може да се намери такава стойност за m при която функцията (12) приема максимална стойност $h_{\max}$, фиг.4. След извършване на необходимите изчисления се получава, че при

$m = 1 - \sqrt{\frac{2}{3}}$ има максимум $h_{\max} = \frac{3\sqrt{2}}{10}\sqrt{1-\sqrt{\frac{2}{3}}\left(4+3\sqrt{\frac{2}{3}}\right)} = 1.172151.$



Фиг.4. *Изменение на ефективността h(m) при различни стойности на индекса на модулация m.*

Това означава, че синусоидалният ШИМ с инжектиране на трети хармоник и увеличена амплитуда е със 17% по-ефективен от синусоидалния.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Променливотоковите електродвигатели са предвидени да работят със синусоидално трифазно захранващо напрежение. По тази причина изходното напрежение от преобразувателя трябва да е максимално близко до синусоидалното, а напрежението в звездния център да е 0V. Управлението на тези двигатели изисква симетричност на трите ШИМ синусоиди. SV-PWM е с добра ефективност с 15% по-висока от ефективността на SPWM, но и с колебания на звездния център около нулата, което достига до ±15%. Показахме вече, че максималната ефективност на синусоидалния ШИМ с инжектиран трети хармоник и увеличена амплитуда може да достигне 17%, т.е. по-висока е от тази на SV-PWM, като напрежението на звездния център се запазва 0V.
Затова смятаме, че за управление на асинхронен двигател, особено при висока скорост (около 30 000мин$^{-1}$) е добре да се използва синусоидална ШИМ, с инжектиран трети хармоник.
Като недостатък на метода можем да посочим по-сложните изчисления, които трябва да се изпълнят, но при използване на съвремени микроконтролери, това не е проблем.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Cavallini A., Davide Fabiani, Gian Carlo Montanari,* A Novel Method to Diagnose PWM-fed Induction Motors, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, p. 1313-1321, Vol. 15, No. 5; October 2008.*
[2] *Gowri K.S., T.B. Reddy, Ch. S. Babu,* GDPWM Algorithm for Direct Torque Controlled Induction Motor Drive Using the Concept of Imaginary Switching Times, *ICGST-ACSE Journal, ISSN 1687-4811, Volume 8, Issue III, January 2009, p. 37-44.*
[3] *Hobraiche J., J.P.Vilain, M. Chemin,* A comparison between pulse width modulation strategies in terms of power losses in a three-phased inverter – Application to a starter generator, www.utc.fr/lec/Publications/2004/epe_jh.pdf
[4] *Komar K.V., Prowin Angel Michael, Joseph P.John, Dr.S.Suresh Kumar,* Simulation and comparison of SPWM and AVPWM control for three phase inverter, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol 5, № 7, July 2010, p.61-74, ISSN 1819-6608.*

Автори: Кръстю Кръстев, гл. ас. д-р, кат. ЕЕА, ИПФ-Сливен, ТУ-София, E-mail address: *krystev_kr@abv.bg*; Радка Кръстева, инж. E-mail address: *talos@iradeum.com*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Людмил Стоянов

РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ЗАГУБИТЕ ПРИ ВИСОКА СКОРОСТ В АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С КАФЕЗЕН РОТОР

Кръстю Кръстев, Радка Кръстева

Резюме: *В статията са разгледани механичните и електрическите загуби при висока скорост на въртене на асинхронния двигател с кафезен ротор. Разгледани са отделните съставки на загубите в скоростния диапазон до 32000min^{-1}. Определена е степента на влияние на всяка съставка от загубите при висока скорост. Показани са аналитично и експериментално получени резултати. Направено е разпределение на загубите в изследвания скоростен диапазон на базата на експериментално получени данни.*
Ключови думи: *асинхронен двигател с кафезен ротор, висока скорост, загуби на мощност*

ALLOCATION OF LOSSES AT HIGH SPEED INDUCTION MOTOR WITH SQUIRREL CAGE ROTOR

Krastyu Krastev, Radka Krasteva

Abstract: *The article presents the mechanical and electrical losses at high speed induction motor with cage rotor. The individual components of the losses in the speed range up to 32000min^{-1} are discussed. Is determined the degree of impact of each component of the losses at high speed. Analytical and experimental results are shown. It is made allocation of losses in the studied speed range based on experimental data.*
Keywords: *induction motor with squirrel cage rotor, high speed, power losses*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Разглеждането на загубите в АД е важно не само за определяне на ефективността на машината, но също така и за оценяване на надеждността и топлинния режим на двигателя.

Важно е също така да се разбере при какви скорости какви загуби надделяват за да се вземат мерки за преодоляването им.

Загуби, които обикновено се пренебрегват при едни скорости, при други могат доминират.

Загубите в асинхронния двигател могат да се разпределят в 5 групи: - електрически загуби в статорната намотка P_{se}; - загуби в желязото (магнитопровода) P_{Fe}; - електрически загуби в роторната намотка P_{re}; - механични загуби P_m; - допълнителни загуби P_{∂}.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

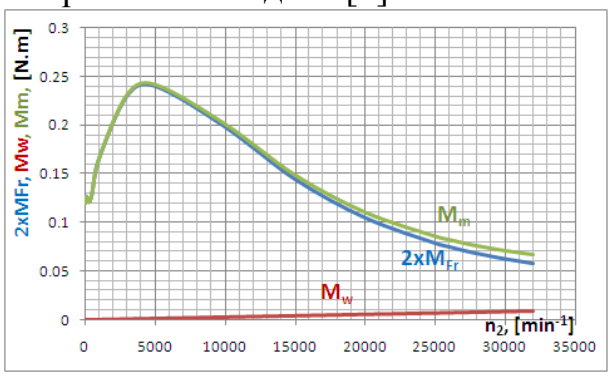
ISSN 1311-0829

2. ЗАГУБИ В АСИНХРОННИЯ ДВИГАТЕЛ С КАФЕЗЕН РОТОР ПРИ ВИСОКА СКОРОСТ

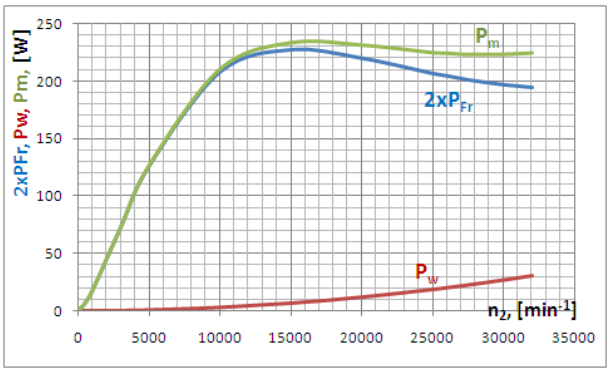
Механични загуби

Механичните загуби P_m, често се споменават като загуби от триене и от съпротивление на въздуха. Общите механични загуби се определят чрез опит на празен ход на двигателя.

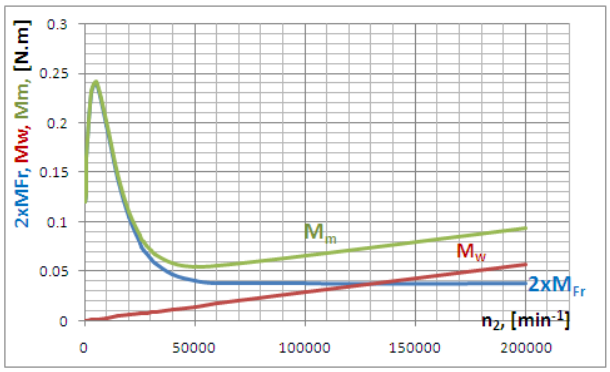
С опита за свободно спиране могат да се определят механичните загуби $2P_{sl}+P_w$, като $2P_{sl}$ са загубите от плъзгане в двата лагера на двигателя, а P_w са вентилационните загуби само във въздушната междина, тъй като двигателят е без перка за охлаждане [5].



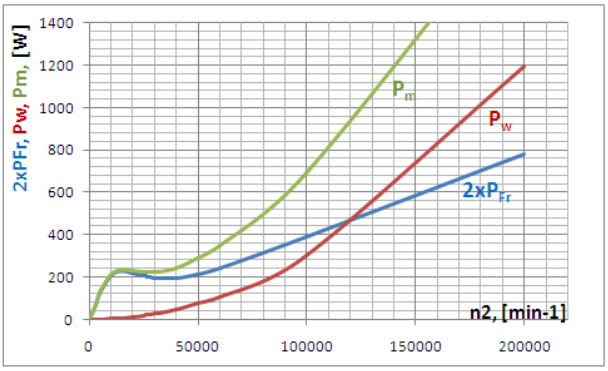
Фиг.1. *Аналитично получени графики на механичния съпротивителен момент в двигателя за скоростен диапазон от* $0min^{-1}$ *до* $32000min^{-1}$.



Фиг.2. *Аналитично получени графики на механичните загуби на мощност в двигателя за скоростен диапазон от* $0min^{-1}$ *до* $32000min^{-1}$.



Фиг.3. *Аналитично получени графики на механичния съпротивителен момент в двигателя за скоростен диапазон от* $0min^{-1}$ *до* $200\ 000min^{-1}$.



Фиг.4. *Аналитично получени графики на механичните загуби на мощност в двигателя за скоростен диапазон от* $0min^{-1}$ *до* $200000min^{-1}$.

Механичният съпротивителен момент $M_m = 2.M_{Fr} + M_w$ е момента, създаден от механичните загуби, които от своя страна се делят на момент създаден от механичното триене в двата лагера $2\times M_{Fr}$ и вентилационен съпротивителен момент M_w, създаден във въздушната междина между статора и ротора. При двигателите, работещи с висока скорост няма перка за охлаждане към вала, а двигателят се охлажда от отделен вентилатор. За този габарит двигатели, работещи с мрежова честота вентилационните загуби във въздушната междина са много малки (0.268W при $3000min^{-1}$) и могат да се пренебрегнат.

На фиг.1 са показани аналитично получени графики на механичния съпротивителен момент M_m в двигателя за скоростния диапазон от 0min^{-1} до 32000min^{-1}. Стартовият механичен съпротивителен момент е 0.11983N.m. При 5000min^{-1} той нараства до 0.24024N.m, а след това намалява до 0.05796N.m при скорост на ротора 32000min^{-1}. След тази скорост (32000min^{-1}), до края на изследвания скоростен диапазон M_m нараства линейно (фиг.3) до достигане на 0.09N.m.

На фиг.2 са показани аналитично получени графики на механичните загуби на мощност P_m в двигателя за скоростен диапазон от 0min^{-1} до 32000min^{-1}, като при достигане на тази скорост механичните загуби нарастват до 194.38W, а до края на изследвания скоростен диапазон (фиг.4) те достигат до 1304.5W. От фиг.4 се вижда, че до скорости от 32000min^{-1} загубите от триене са значително по-големи от вентилационните, при 120000min^{-1} се изравняват, а над тази скорост преобладаващи са вентилационните загуби във въздушната междина, като в края на диапазона те са 1.5 пъти по-големи от загубите от триене в лагерите.

При захранването на двигатели с мрежова честота 50/60Hz, при скорости от 700 до $3000/3600\text{min}^{-1}$ може да се счита, че загубите са предимно от триене в лагерите и техният момент нараства почти линейно (фиг.1). Може би затова при математичните модели в Matlab среда е прието линейно нарастване на съпротивителния момент от скоростта на въртене. При скорости до $4000\,\text{min}^{-1}$, с цел опростяване на изчисленията е оправдано приемането на това приближение. При високи скорости се вижда, че този модел е неприложим.

Загубите от триене се преодоляват с използването на керамични или магнитни лагери, а вентилационните загуби се намаляват с използването на флуид с по-малък динамичен вискозитет във въздушната междина [4], [5].

Електрически загуби

Електрически загуби в статорната намотка P_{se} са причинени от тока, преминаващ през намотките на статора и ротора при натоварване. Те зависят приблизително от квадрата на товарния ток. Загубите в статорната намотка са

$$P_{se} = 3R_S I_S^2 \tag{1}$$

Загубите в желязото P_{Fe} се състоят основно от вихрови загуби и загуби от хистерезис. Тези загуби зависят от магнитния поток, който от своя страна е почти пропорционален на напрежението.

За определяне на загубите в желязото ще се използва израза

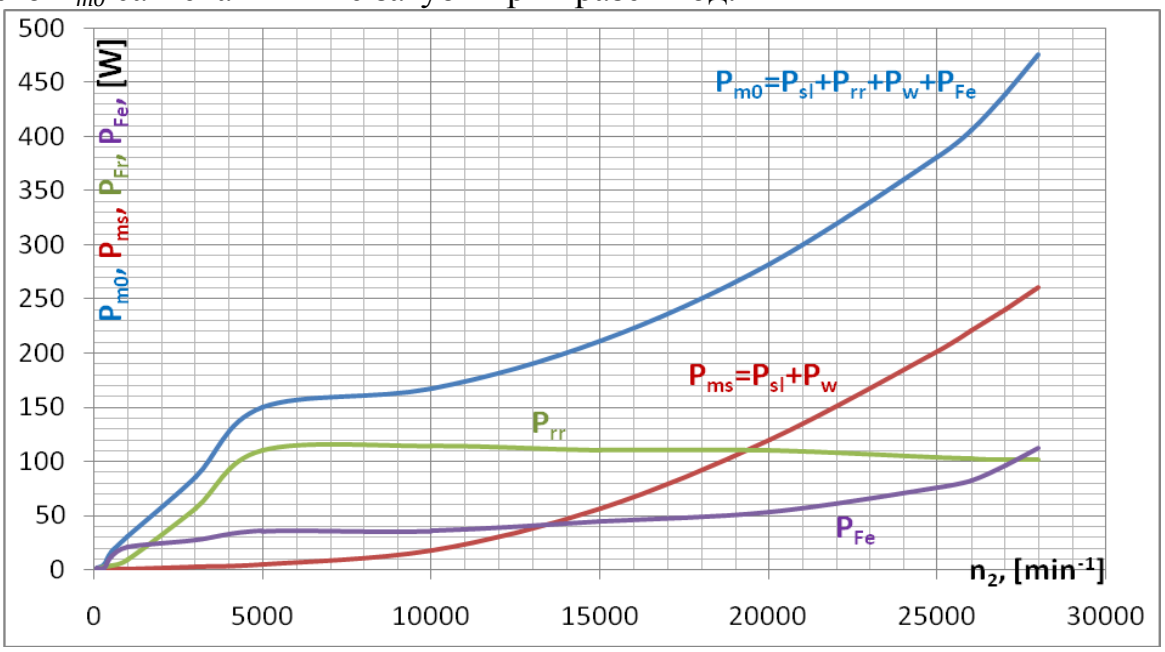
$$P_{Fe} = k_h \psi_m^v f + k_e \psi_m^2 f^2 \tag{2}$$

където k_h е коефициент на загуби от хистерезис в използваното желязо, k_e е коефициент на загуби от вихрови токове за материала и зависи и от дебелината на ламелите на магнитопровода, $\psi_m = L_m.I_m$ е потокосцеплението във въздушната междина и f е честотата на основния хармоник. Коефициентите k_h и k_e се дават от производителя.

Загубите от хистерезис ($k_h \psi_m^v f$) са пропорционални на честотата и на ψ_m и за-

висят от степента на насищане. Загубите от вихрови токове ($k_e\psi_m^2 f^2$) са пропорционални на квадрата на честотата f и на квадрата на потокосцеплението във въздушната междина ψ_m. Тези загуби зависят от честотата и могат да се вземат от опита на празен ход, за няколко различни честотни диапазона.

На фиг.5 е дадено как са определени загубите в желязото P_{Fe} в четириполюсния двигател ATF 80 E4 IM B3 при движение на празен ход със скорост от 0min^{-1} до 28000min^{-1}. Тези загуби са получени, като от загубите на мощност, от опита на празен ход, се извади мощността от опита при самоспиране и изчислените загуби на мощност от триене при търкаляне P_{rr} (фиг.2), т.е. $P_{Fe} = P_{m0} - P_{sl} - P_{rr}$, където P_{m0} са механичните загуби при празен ход.



Фиг.5. *Графика за определение на загубите в магнитопровода P_{Fe} при движение на четириполюсния двигател ATF 80 E4 IM B3 на празен ход.*

При ускоряване на двигателя механичните загуби са от триене при търкаляне P_{rr}, от триене при плъзгане P_{sl} и вентилационни загуби във въздушната междина P_w. При ускоряване на двигателя след скорост 5000min^{-1} (фиг.2) загубите от триене P_{rr} започват да преминават в загуби от плъзгане P_{sl} и при скорост над 20000min^{-1} те са практически нулеви, тъй като съчмите не могат да се въртят при тази скорост. Тогава остават да действат само загубите от плъзгане P_{sl} и вентилационните загуби P_w.

Ако от тази скорост се проведе опит на самоспиране загубите от триене при търкаляне P_{rr} липсват до спирането на двигателя, тъй като триенето при търкаляне предполага повърхностна деформация, която при висока скорост не може да се случи. Затова при самоспиране действат само загуби от триене при плъзгане P_{sl} и вентилационни загуби във въздушната междина P_w. По тази причина, за да се получат загубите в желязото, трябва допълнително да се извадят загубите от триене при търкаляне P_{rr}.

Електрическите загуби в роторната намотка P_{re} зависят от натоварването и

се определят с изразите

$$P_{re} = 3R_r I_r^2 \text{ или } P_{re} = sP_{\delta}, \quad \text{където} \quad P_{\delta} = P_1 - P_{se} - P_{Fe} \qquad (3)$$

е мощността, преминаваща през въздушната междина към ротора.

Загубите в медта на статора P_{se} и в алуминия на ротора P_{re} за високоскоростния двигател са малки поради малките активни съпротивления на статорната и роторната намотка. Тези загуби са включени като част от загубите в желязото P_{Fe}, но при празен ход са малки и могат да се пренебрегнат.

Други загуби

Другите загуби P_{∂} се дължат на скин ефекта в статорната и роторната намотка на двигателя и допълнителните загуби в магитопровода, предизвикани от изкривяване на магнитния поток. Приема се, че тези загуби при натоварване с номинална мощност за двигателите, работещи с мрежова честота, не превишават 0.5% от подаваната мощност P_1.

Сумарни загуби

Сумарните загуби P_{Σ} са $P_{\Sigma} = P_{se} + P_{Fe} + P_{re} + P_m + P_{\partial}$, полезната мощност на вала на двигателя е $P_2 = P_1 - P_{\Sigma}$, а коефициентът на полезно действие е η и той също ще зависи от скоростта на въртене на ротора $\eta = \left(1 - \frac{P_{\Sigma}}{P_1}\right).100, \%.$

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от направените експериментални изследвания напълно съвпадат с резултатите, получени с аналитични и програмни модели на Matlab/Simulink,

При скорост над 1000min^{-1} сумарния съпротивителен момент $M_{\Sigma,}$ остава почти постоянен до края на изследвания скоростен диапазон.

На фиг.6 е показан разработения преобразувател за управление на трифазни високоскоростни асинхронни електродвигатели с изходна честота на основния хармоник от 0Hz до 1000HZ, с който е постигната скорост на въртене до 32000min^{-1}. На фиг.7 е показан изследвания четириполюсен асинхронен електродвигател, на който всички компоненти са стандартно използвани в редовното производство (лагери, ламели, статорен и роторен пакет,проводници).

Фиг.6. *Преобразувател за управление на високоскоростни асинхронни двигатели.*

Фиг.7. *Четириполюсен асинхронен двигател ATF80E4IMB3 за скорост до 30000* min^{-1}.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *H.Dou, B. Khoo, K. Yeo*, Energy Loss Distribution in Plane Couette Flow and the Taylor-Couette Flow between Concentric Rotating Cylinders, *Inter. J. of Thermal Science, Vol.46, 2007, pp. 262-275*
[2] *James E. Vrancik*, Prediction of Winage Power Loss in Alternators, *National Aeronautics and Space Adminisration – Washington, D.C. – October 1968, NASA TN D-4849, pp.1-18*
[3] *Михов М., Сотиров Д., Баташки Ст.,* Определяне на механичните загуби на синхронна машина по метода на самоспиране, *Годишник на ТУ-София, том 59, кн. 1, 2009г., стр.76-82*
[4] *Божилов Г. Иванов А., Михов М., Пенев Д.*, Разделяне на механичните и вентилационните загуби на еднофазни колекторни двигатели за ръчни електроинструменти, *Годишник на ТУ-София, т. 60 кн. 2, 2010г., стр. 351-356*
[5] *http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=en&newlink=1_0_1*

Автори: Кръстю Кръстев, гл. ас. д-р, кат. ЕЕА, ИПФ-Сливен, ТУ-София, E-mail address: *krystev_kr@abv.bg*; Радка Кръстева, инж. E-mail address: *talos@iradeum.com*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Пламен Ризов

МОДЕЛ НА ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНА СИСТЕМА С ПРОМЕНЛИВА СТРУКТУРА И ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТОВАРИ

Николай Матанов, Снежана Димитрова

Резюме: *В доклада е представено създаването на модел на електроснабдителна система на производствено предприятие, който позволява да се променят: структурата (включени изводи на главната понижаваща подстанция, включени цехови подстанции, товари и т.н.), параметрите на отделните елементи (трансформатори, кабелни линии, товари и т.н.), нивата на напрежение. Моделът е направен в средата на Matlab и ще се използва като обект за експерименти и управление при създаването на централизирана система за управление на реактивните мощности.*
Ключови думи: *модел на електроснабдителна система, Matlab, реактивни мощности, интелигентни мрежи*

MODEL OF POWER SUPPLY SYSTEM WITH VARIABLE STRUCTURE AND ELECTRICAL LOADS

Nikolay Matanov, Snezhana Dimitrova

Abstract*: The report represented the creation of a model of power supply system of the manufacturing company, which allows to change: structure (included terminals of the main substation lowering included workshop substations and loads, etc.) parameters of the individual elements (transformers, cable lines, loads, etc.), the levels of voltage. The model is created using a program product Matlab and will be used as an object of experimentation and control in the creation of a centralized management system for reactive power.*
Keywords*: power system modeling, Matlab, reactive power, smart grid*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Режимът на реактивните товари в електроснабдителната система на даден обект определя качеството на електрическата енергия, загубите на мощност в отделните елементи на електроснабдителната система, разходите за заплащане на енергията. От тази гледна точка компенсирането на реактивните товари е основната задача при експлоатацията на електроснабдителната система [1].
При сложни йерархични електроснабдителни системи (ЕС) повишаване ефективността на използваните компенсиращи устройства може да се постигне чрез оптимизиране структурата, разпределението и управлението на общата компенсираща мощност.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

За да се постигне това повишаване на ефективността е нужно да се създаде централизирана система за управление на реактивните мощности в рамките на конкретна електроснабдителна мрежа (ЕСМ).
Вграждането на една такава система за управление в електрическата мрежа ще придаде на съответната мрежа интелигентна функционалност, т.е. ще я направи интелигентна мрежа (micro smart grid).
В реални условия електроснабдителните системи (мрежи) си променят структурата, чрез включване/изключване на отделни части от тях, променят си режима на работа (режима на товарите), променят се и параметрите на захранващото напрежение в общата точка на присъединяване към обществената (външната) мрежа. От тази гледна точка, за да функционира една централна система за управление на реактивните мощности (ЦСУРМ) е необходимо:

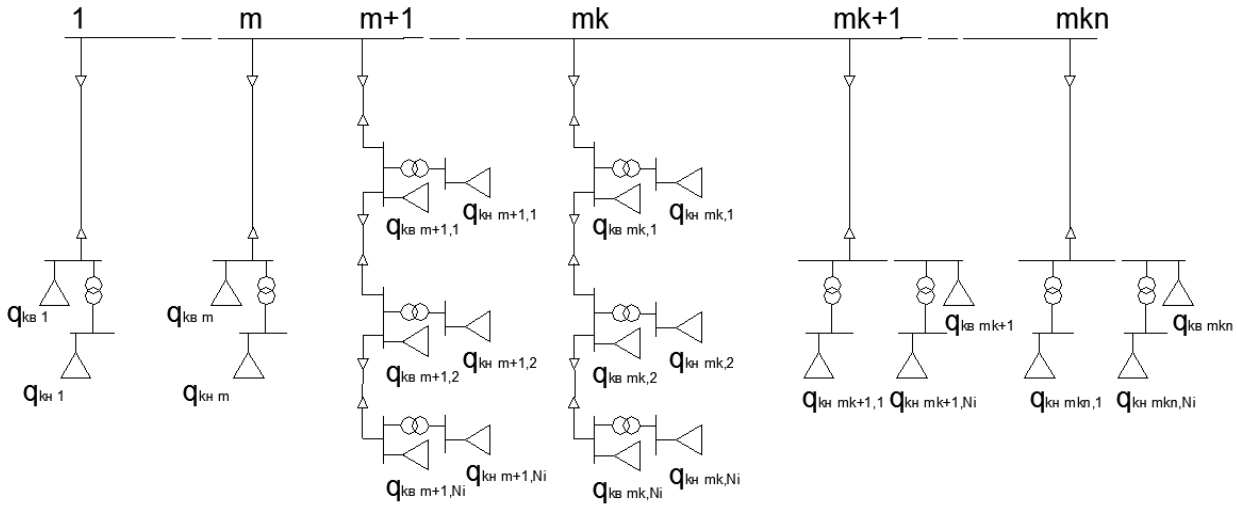
- да се събира актуална информация за структурата на схемата (включени изводи, подстанции и др.);
- да се събира информация за текущия режим на работа т.е. да се разполага с информация за токовете в отделните клонове и напреженията в различните възли на схемата;
- да има вграден алгоритъм за решаване на оптимизационна задача по отношение на разпределението на компенсиращите реактивни мощности [2];
- да изпраща управляващи въздействия към регулируеми източници на реактивна мощност.

За да се проектира и експериментира с такава ЦСУРМ е нужно да имаме обект за управление, т.е. електроснабдителна система с възможности за промяна на характеристиките, прилагане на управляващи въздействия и следене на състоянието. В реални условия това не може да се осъществи, за това ще се създаде софтуерен модел.

Моделът ще се създаде в средата на Matlab, тъй като тя предоставя както набор от готови блокове (модели) на елементите на електроснабдителните системи и голям набор от математически функции, така и възможност за създаване на потребителски модели и функции [3,4].

2. ПРИНЦИПНА СХЕМА НА ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНА МРЕЖА

В стопанските обекти ЕСМ основно са на средно напрежение с малки дължини на електроснабдителните линии (до няколко километра). В общия случай има приемателен пункт, т.е. главна понижаваща (разпределителна) подстанция (ГПП). От ГПП могат да се захранват: радиални линии, магистрални линии или разпределителни подстанции (РП). Имайки предвид казаното е създадена принципната схема на ЕСМ дадена на фиг.1.



Фиг.1. Принципна схема на електроснабдителна система.

Като се има предвид, че принципната изчислителна схема от фиг.1 може да включва ***n*** броя РП, ***m*** броя радиални линии и ***k*** броя магистрални линии с ***N*** броя цехови подстанции (ЦП), може да се каже, че схемата е универсална и от нея може да се създаде конкретна електроснабдителна система, независимо от големината ѝ.

3. МОДЕЛ НА ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНА МРЕЖА В СРЕДАТА НА MATLAB

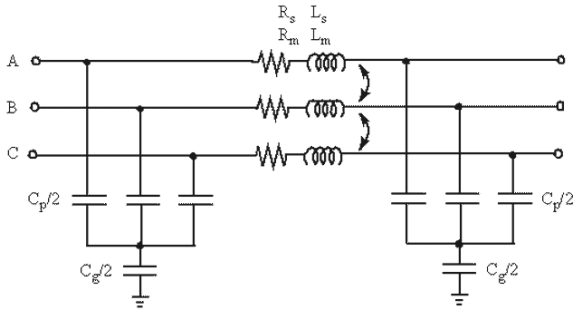
По долу са дадени заместващите схеми и основните характеристики използвани за софтуерните модели на отделните елементи на ЕСМ [5, 6].

Кабелни и въздушни линии СрН

Малката дължина на линиите в ЕСМ на стопанските обекти позволява при заместващите схеми да се използват линии със съсредоточени параметри. В случая се използва П-образна заместваща схема, използвана обикновено при електропроводите високо напрежение, тъй като тя по-точно отразява всички характеристики на линиите. Това при класическите изчисления усложнява много процеса на изследване, но тук няма да се съобразяваме с този фактор, тъй като ще използваме компютърна техника и ще се изисква възможно по-голяма адекватност от моделите.

Заместващата схема на трифазните линии, която ще прилагаме при изграждането на моделите е дадена на фиг.2. В заместващата схема ще се отчитат следните параметри на трифазните електропроводни линии:

- Собствено и взаимно съпротивление на линията R_s и R_m;
- Собствена и взаимна индуктивност на линията L_s и L_m;
- Капацитетите между фазите и спрямо земята C_p и C_g;



Фиг.2. Заместваща схема на електропроводна линия СрН.

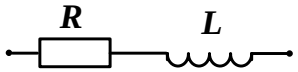
Гореизброените величини се определят като се отчитат съответните величини с права и нулева последователност по следните формули:

$$
\begin{aligned}
R_s &= (2R_1 + R_0)/3; \\
L_s &= (2L_1 + L_0)/3; \\
R_m &= (R_0 - R_1)/3; \\
L_m &= (L_0 - L_1)/3; \\
C_p &= C_1; \qquad C_g = 3C_1C_0/(C_1 - C_0);
\end{aligned}
\tag{1}
$$

където величините с индекс нула са тези с нулева последователност, а тези с 1 съответно с права последователност. Съпротивленията, индуктивностите и капацитетите на различните видове линии се определят на базата на дължината на линията и съответния специфичен параметър за 1km дължина, които се дават в справочната литература или от производителите.

Реактори

Токоограничаващите реактори ще се представят чрез последователна схема на активно съпротивление и индуктивност фиг.3.

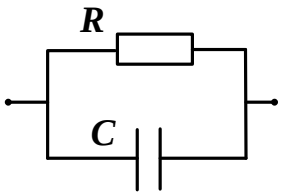


Фиг.3. Заместваща схема на реактор.

Параметрите ще се определят на базата на реактивното съпротивление на реактора при основната честота и активните му загуби.

Кондензаторни батерии

Кондензаторните батерии (КБ) ще се представят чрез схема от паралелно свързани капацитет и активно съпротивление фиг.4.

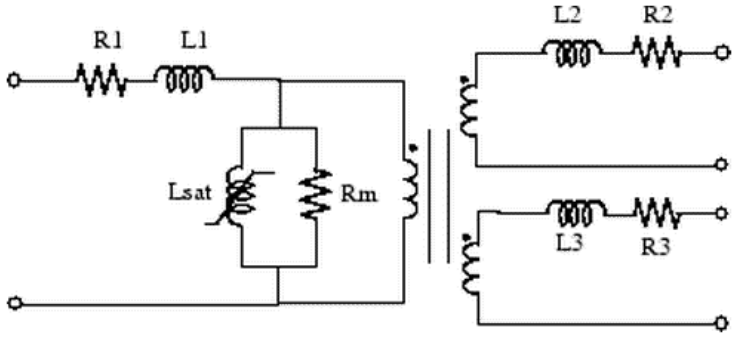


Фиг.4. Заместваща схема на кондензаторна батерия.

Параметрите на *R* и *C* се определят на базата на реактивната мощност на КБ на основната честота и на активните загуби в нея.

Трансформатори

За моделиране на силовите трансформатори в ЕСПП ще се използва заместващата схема от фиг.5.



Фиг.5. Заместваща схема на трансформатор.

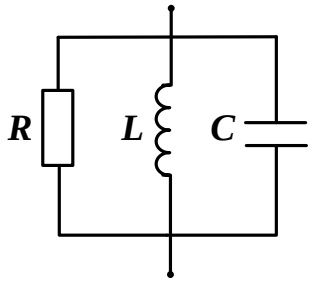
Заложеният модел позволява да се отчита и насищането на трансформатора, но е необходимо да се въведе допълнително информация за зависимостта на магнитния поток и намагнитващия ток. Означените величини на фиг.5 имат следния смисъл:

R_1, R_2, R_3 и L_1, L_2, L_3 са съответно активните съпротивления и индуктивностите на намотките на трансформатора;

R_m, L_{sat}, отчитат характеристики на магнитопровода, а именно активните загуби и индуктивността на насищане.

Линейни товари

Линейните товари ще се моделират чрез елемент, който е комбинация от паралелно свързани активно съпротивление, индуктивност и капаците фиг.6. При трифазните товари има възможност да се избира начина на свързване (звезда/триъгълник) и вида на неутралата.

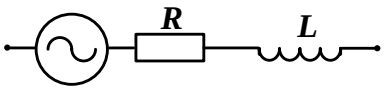


Фиг.6. Заместваща схема на линеен товар.

Стойностите на елементите се изчисляват на базата на зададени активни и реактивни мощности, захранващо напрежение и честота.

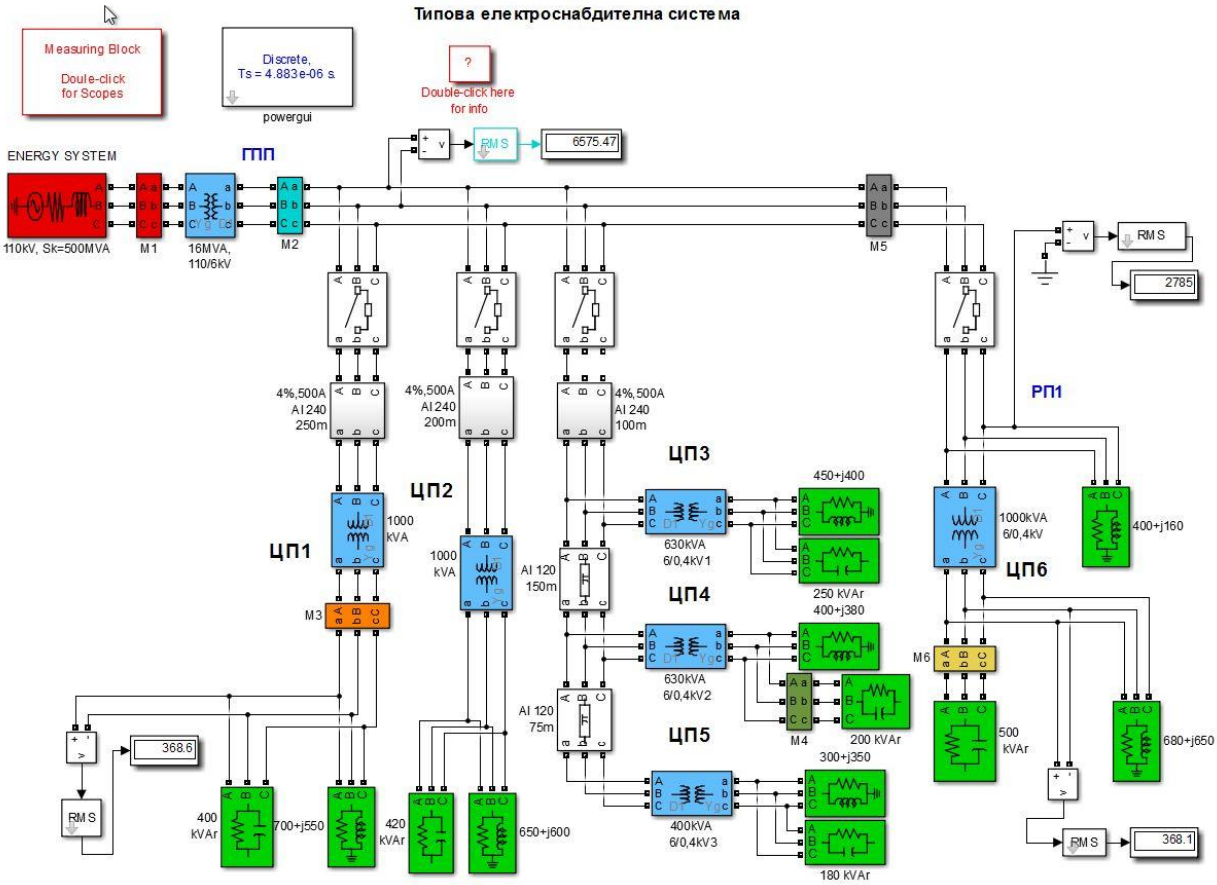
Източник на захранващо напрежение

Източниците на захранващо напрежение ще се представят чрез комбинация от идеални източници на синусоидално напрежение и последователно свързани активно съпротивление и индуктивност, които ще определят техния вътрешен импеданс фиг.7.



Фиг.7. Заместваща схема на източник на захранващо напрежение.

Параметрите се изчисляват на базата на мощността на късо съединение, напрежението и честотата на източника и съотношението *X/R*.
На базата на принципната схема и на описаните по-горе елементи е изграден следния модел на ЕСМ даден на фиг.8.

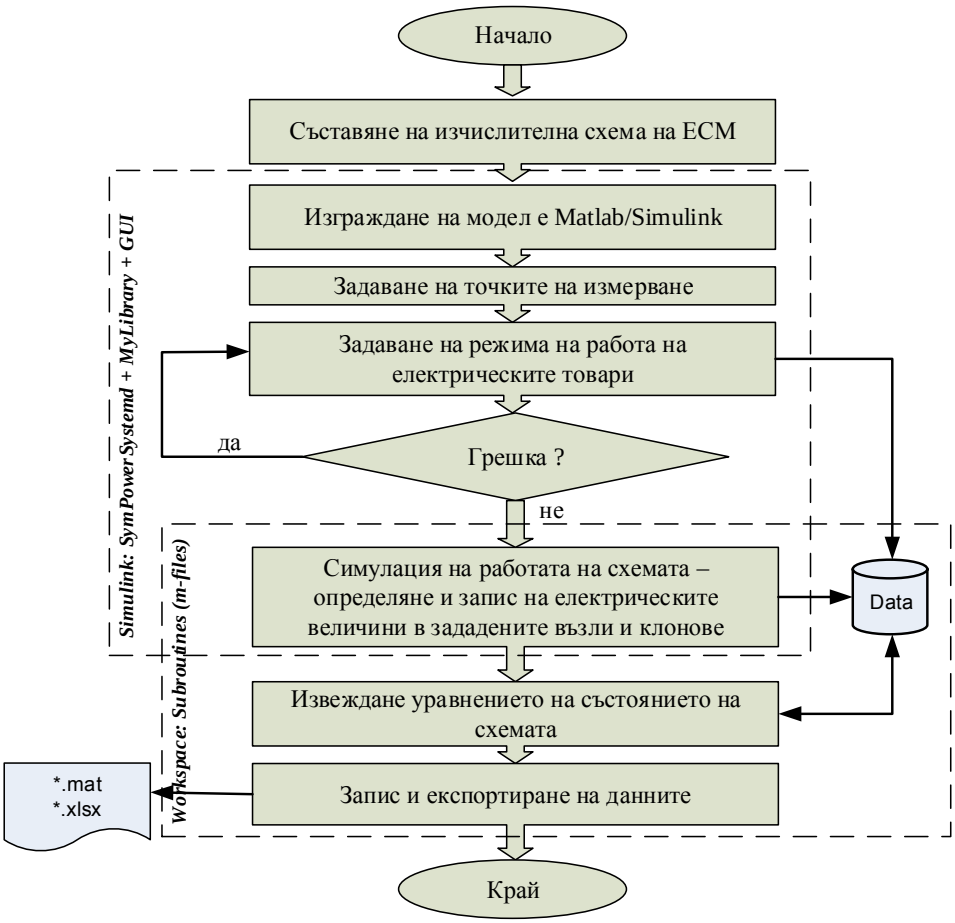


Фиг.8. Модел на електроснабдителна мрежа в Matlab/Simulink.

Алгоритъмът на работа при съставянето на модела е даден на фиг.9. Основните стъпки са:

1. Съставя се изчислителната схема на конкретна ЕСМ (подобно на фиг.1). Уточняват (изчисляват) се параметрите на всички елементи от схемата, нужни за входни данни на модела;

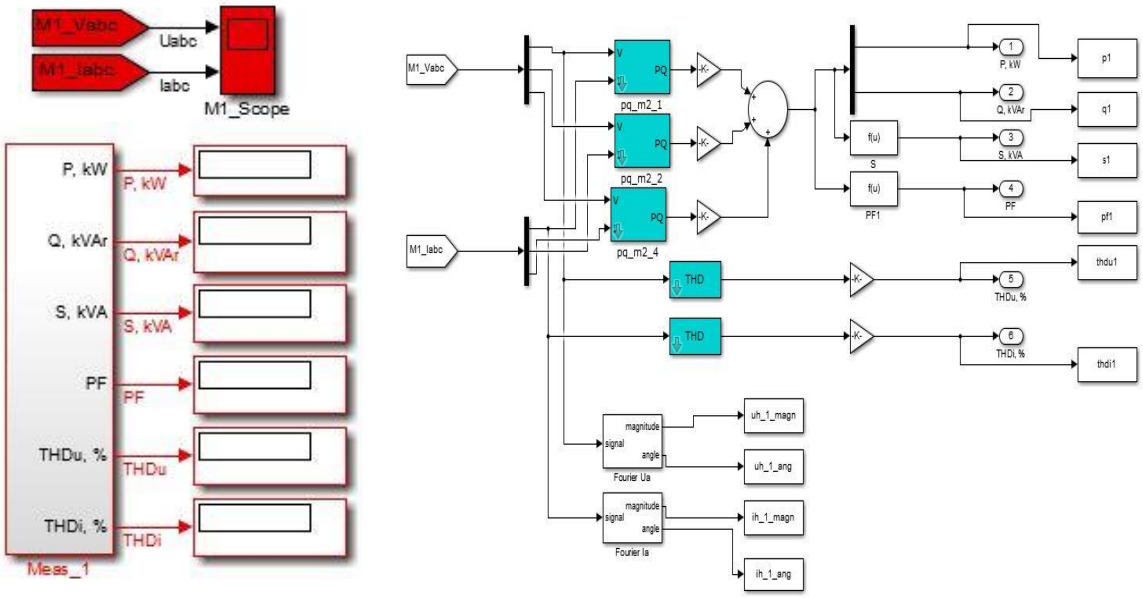
2. Съставяне на схемата на електроснабдителната система в средата на Matlab, ползвайки библиотеките на SimPowerSystem или библиотеки създадени от потребителя. Тук следва въвеждането на параметрите на отделните елементи;



Фиг.9. Алгоритъм на работа за създаване на модел на ЕСМ.

3. Избор на точките на измерване с цел следене режима на работа на ЕС и настройка (тестване за грешки). В избраните възли и клонове се поставят съответните измервателни блокове. Добър вариант е резултатите от „измервателните прибори“ да се записват в променливи на работната среда, както е дадено и в схемата на алгоритъма;
4. Чрез задаване на товарите и/или включване/изключване на клонове на схемата се задават конкретни режими на работа. Проверяват се резултатите в точките на измерване. Така се тества схемата за грешки;
5. Проверка за грешки, както на ниво софтуер, така и за правилен режим на работа;
6. Симулация и получаване на резултати. Резултатите се записват в различни променливи, които се задават при изграждането на модела;
7. Извеждат се матриците на уравненията на състоянието. Те ще са нужни при решаване на оптимизационната задача;
8. Записване на всички резултати във външни файлове с цел използване от друг софтуер и др.

Така съставеният модел позволява да му се задават динамично, чрез различни променливи на средата MATLAB, режимите на работа на товарите и структурата на схемата. Структурата се контролира чрез прекъсвачи, чието състояние може да се инициализира и преди и по време на симулациите.



Фиг.10. Измервателен блок.

Към модела са разработени допълнително: универсален измервателен блок (фиг.10) за запис и визуализация на мощностите, коефициентите на несинусоидалност и коефициента на мощност на схемата за избрана точка; програма за изчисляване на загубите на активна мощност в отделните елементи на мрежата.

4. ИЗВОДИ

Представеният подход и изграденият софтуерен модел позволяват да се разполага с обект за управление и експериментиране при проектирането и разработването на прототип на централизирана система за управление на реактивните мощности.

Създаденият модел на примерна ЕСМ може да се ползва като база за изграждането на модели по всякаква друга изчислителна схема, тъй като съдържа всички основни елементи на една електроснабдителна система.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите, от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на НИС при ТУ-София 2015г., научен проект в помощ на докторанта ***„Централизирано управление на компенсиращите реактивни мощности в интелигентни електроснабдителни системи*** ”, договор **№ 151ПД0030-01/2015**

ЛИТЕРАТУРА

[1] Singh N., Kliokys E., Feldmann H., Kussel R. ***Power system modelling and analysis in a mixed energy management and distribution management system***. Power Systems, IEEE Transactions on Volume: 13, Issue: 3, 2002

[2] Matanov N. ***Optimization of the structure and the distribution of the reactive power compensation in the industrial electrical supply systems***, E+E Vol.49 No.3-4/2014 pp.27-33

[3] Черных И. В. ***Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink***, Москва, ДМК Пресс, 2007

[4] J Arrillaga, N R Watson, ***Computer Modelling of Electrical Power Systems***, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, England, 2013

[5] Матанов Н., Сидеров С. ***Моделиране на влиянието на параметрите на електроснабдителната система върху генерираните хармоници на ток и напрежение от мощни токоизправители***, Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", Годишник, том 47, свитък III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, София 2004, стр. 99-104

[6] Meliopoulos A. P. Sakis. ***Power System Modeling, Analysis and Control***, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 2006

Автори: Николай Стефанов Матанов, доц. д-р инж., катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт" (ECEOET), Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*; Снежана Асенова Димитрова, ас. инж., докторант, катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт" (ECEOET), Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *s.dimitrova@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Светлана Цветкова

ФОРМАЛИЗИРАНО МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ НА СТРУКТУРАТА И ТОВАРИТЕ НА ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНА СИСТЕМА

Николай Матанов, Снежана Димитрова

Резюме: *В доклада е представено математическото описание на модел на електроснабдителна мрежа. За описване структурата и товарите на конкретна електроснабдителна система (мрежа) се използват уравненията на състоянието. Задачата описана в доклада е подчинена на по-голяма цел, а именно изграждане на централизирано управление на компенсиращите реактивни мощности в рамките на електроснабдителна система на предприятие, като начин за повишаване електроенергийната ефективност.*
Ключови думи: *уравнение на състоянието, Matlab, модел на електроснабдителна система*

FORMALIZED MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE POWER SYSTEM STRUCTURE AND LOADS

Nikolay Matanov, Snezhana Dimitrova

Abstract*: The paper presents a mathematical description of the model of power supply system. To description the structure and loads in a specific power supply system (network) by using the state-space equations. The task described in this report is subject to a greater purpose, in particular establishment of centralized management of compensating reactive power in the power supply system of the enterprise as a way to increase the power efficiency.*
Keywords*: state-space equations, Matlab, power system model*

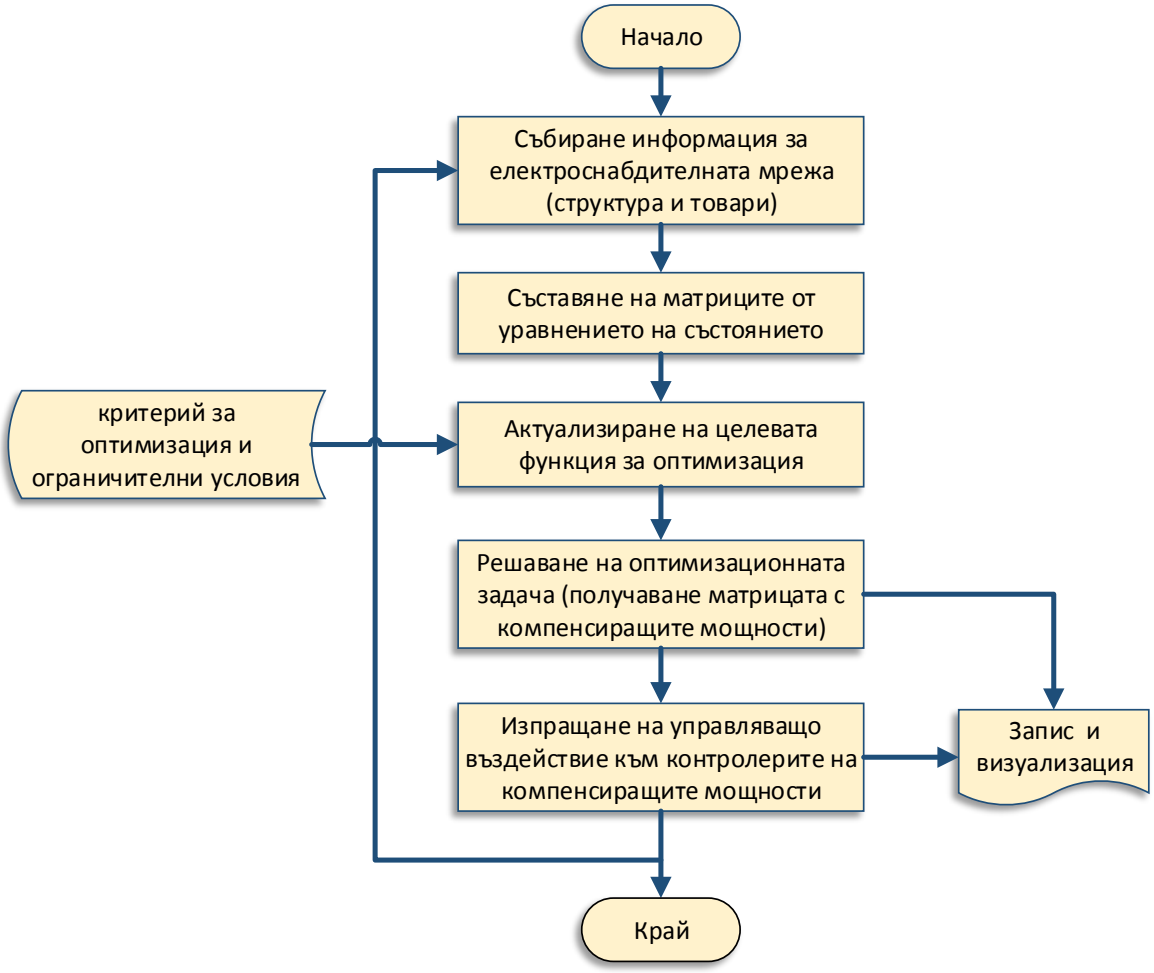
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Режимът на реактивните товари в електроснабдителните системи на стопанските обекти определя качеството на електрическата енергия (отклонението на напрежението), загубите на мощност в отделните елементи на електроснабдителната система, разходите за заплащане на електрическата енергия. От тази гледна точка компенсирането на реактивните товари е основна задача при проектирането и експлоатацията на електроснабдителните системи. С навлизането интелигентните електроснабдителни системи, изброените по горе проблеми трябва да могат да се решават автоматично. За целта трябва да има разработени алгоритми за оптимизация и управление и методики за прилагането им.
Начина на реализиране на интелигентни функции на електроснабдителна мрежа

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

(ЕСМ) по отношение на управлението на реактивните мощности е изграждане на централизирана система за контрол [1]. Функциите на една такава управляваща система по-подробно са дадени в [2], но може да се каже, че за реализирането на управление на компенсиращите мощности в един сложен обект е необходимо да се изгради система за събиране и анализ на информация, да се разработи софтуер за решаване на оптимизационна задача за управляващото въздействие. На фиг.1. е представен принципен алгоритъм за централизирано управление на реактивните мощности.



Фиг.1. Принципен алгоритъм на работа при централизирано управление на реактивните мощности.

Реализирането на желания фактор на мощност се постига с компенсиращи устройства като кондензаторни батерии и/или синхронни двигатели и др. При сложни йерархични електроснабдителни системи повишаване ефективността на използваните компенсиращи устройства може де се постигне чрез оптимизиране на структурата, разпределението и управлението на общата компенсираща мощност на дадения стопански обект [3]. До сега оптимизационните задачи свързани с компенсирането на реактивните товари се решават при установени режими на работа на електрическите товари. В действителност случайният характер на електрическите товари и регулирането на компенсиращите мощности води до оптимизация при непълна информация. Целта е да се оптимизира ре-

жимът и структурата на компенсиращите устройства при отчитане на динамичният характер на електрическите товари.
За да се постигне целта на проекта е нужно да се отчитат фактори като: структурата на ЕСМ; параметрите на елементите на ЕСМ; конструктивното изпълнение на кондензаторните батерии; натоварването на синхронните двигатели; качеството на напрежението; вероятностния характер на товарите; управлението на компенсиращите устройства; финансовите условия, при които се извършват различни разходи и др.
Тъй като идеята заложена в централизираното управление е да се решава оптимизационна задача свързана с минимизиране загубите на активна мощност предизвикани от преноса на реактивна мощност, трябва да се разполага с математическо описание на параметрите на обектите за управление, в случая електроснабдителната система. От тук произлиза и задачата представена в този доклад - математическо описание на структурата и товарите на електроснабдителна система (мрежа).

2. СЪСТАВЯНЕ НА МАТРИЦИТЕ ОТ УРАВНЕНИЯТА НА СИСТОЯНИЕТО

За описание на структурата и натоварването на ЕСМ ще се използват уравненията на състоянието [4]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A.x(t) + Bf(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Df(t) \quad (2)$$

където

$\frac{dx(t)}{dt}$ е векторът на търсените $i_L(t)$ и $u_c(t)$;

(t) е векторът на състоянието;

(t) е векторът на изходните величини;

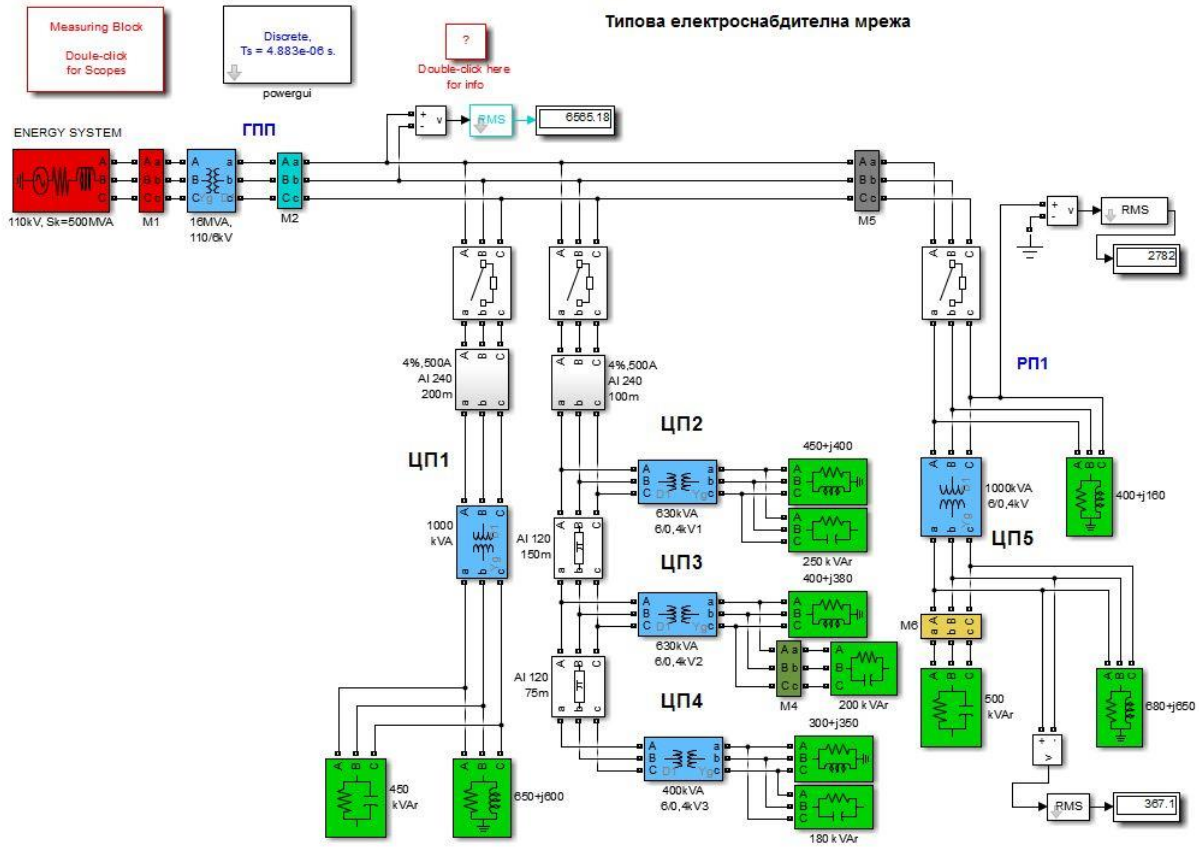
$f(t)$ е векторът на захранващите източници;

[A], [B], [C], [D] са матрици, които имат реални коефициенти, определени за конкретната схема.

За дадена схема началните условия са дадени чрез векторът на състоянието $x(t)$ и векторът на захранващите токове и напрежения. От решаване на уравнение (1) се определят токовете и напреженията върху реактивните елементи в началния момент. От уравнението (2) се получават токовете и напреженията на всички нереактивни елементи.
Както е дадено в [2] при проектирането и съставянето на прототип на централизирана система за управление на реактивните мощности ще се използва модел на ЕСМ разработен в средата на MATLAB/ Simulink.
От тази гледна точка на този етап, матриците от уравненията на състоянието ще се „извличат“ от средата на MATLAB. При следващият етап, при работеща

„централна станция“, събираща информацията от комутационната, измервателната и управляващата апаратура в реална мрежа, тя („централната станция“) ще „генерира“ тези матрици на базата на получената в реално време информация.
За да се получат матриците от уравненията на състоянието е необходима следната входна информация:

- *rlc* – матрица, характеризираща R, L, C параметрите на всеки един клон на схемата (без параметрите на кабелните линии);
- *switches* – матрица, описваща състоянието на прекъсвачите в схемата;
- *source* – матрица, даваща параметрите на източниците на напрежение и ток в схемата;
- *line_dist* – матрица с параметрите на кабелните (въздушните) линии.



Фиг.2. Модел на електроснабдителна мрежа.

При изграден модел в Simulink тази входна информация вече е въведена, чрез параметрите на всеки един елемент участващ в схемата [2], т.е. могат да се генерират матриците [A], [B], [C], [D] от (1) и (2).

Матриците ще имат следните размерности:

A (nstates, nstates), B (nstates, ninput),

C (noutput, nstates), D (noutput, ninput),

където:

nstates - е броят на променливите на състоянието;

ninput - е броят на входовете;

noutput - е броят на изходите.

Нека разгледаме модел на примерна ЕСМ - фиг.2, със следните параметри на съставните елементи:

Таблица 1

Параметри на елементите на модела от фиг.2

№	Елемент от модела	Параметри
1	Захранващ източник	$U_Н$=110kV; f=50Hz; Sкс=500MVA; X/R =7
2	Трансформатор в ГПП	$U_Н$=110kV; f=50Hz; Sн=6,3MVA; YNd; $dP_{пх}$=10,4kW, $dP_к$=42kW, $u_к$=10,5%, I_0=1,75%
3	Трансформатор в ЦП1	$U_Н$=6/0,4kV; f=50Hz; Sн=1000kVA; Dyn; $dP_{пх}$=1,1kW; $dP_к$=5kW; $u_к$=6%; I_0=1,6%
4	Трансформатор в ЦП2	$U_Н$=6/0,4kV; f=50Hz; Sн=630kVA; Dyn; $dP_{пх}$=1,58kW; $dP_к$=7,2kW; $u_к$=5%; I_0=1,8%
5	Трансформатор в ЦП3	$U_Н$=6/0,4kV; f=50Hz; Sн=630kVA; Dyn; $dP_{пх}$=1,58kW; $dP_к$=7,2kW; $u_к$=5%; I_0=1,8%
6	Трансформатор в ЦП4	$U_Н$=6/0,4kV; f=50Hz; Sн=400kVA; Dyn; $dP_{пх}$=1,58kW; $dP_к$=7,2kW; $u_к$=6%; I_0=1,4%
7	Трансформатор в ЦП5	$U_Н$=6/0,4kV; f=50Hz; Sн=1000kVA; Dyn; $dP_{пх}$=1,1kW; $dP_к$=5kW; $u_к$=6%; I_0=1,6%
8	Товари на ЦП1	S_1 = 650 + j600kVA
9	Товари на ЦП2	S_2 = 450 + j400kVA
10	Товари на ЦП3	S_2 = 400 + j380kVA
11	Товари на ЦП4	S_2 = 300 + j350kVA
12	Товари на ЦП5	S_2 =680 + j650kVA
13	Кондензаторни батерии в ЦП1	$Q_{к1}$ = 450kVAr
14	Кондензаторни батерии в ЦП2	$Q_{к2}$ = 250kVAr
15	Кондензаторни батерии в ЦП3	$Q_{к3}$ = 200kVAr
16	Кондензаторни батерии в ЦП4	$Q_{к4}$ = 180kVAr
17	Кондензаторни батерии в ЦП5	$Q_{к5}$ = 500kVAr
18	Кабелни линии ГПП-ЦП1	Al, 240mm^2, 200m
19	Кабелни линии ГПП-ЦП2	Al,240,100
20	Кабелни линии ЦП2-ЦП3	Al, 120mm^2, 150m
21	Кабелни линии ЦП3-ЦП5	Al, 120mm^2, 75m
22	Кабелни линии ГПП-РП1	Al, 240mm^2, 175m

За представеният модел на фиг.2 с дадените параметри в табл.1 матриците на уравнението на състоянието се получават със следните размерности:

A = [126x126]; B = [126x12];
C = [42x126]; D = [42x12];
x = [126x1]; f = [12x1].

126x1 complex double

	1
1	0.0047 - 0.0027i
2	-0.0047 - 0.0027i
3	0.0000 + 0.0054i
4	0.0047 - 0.0027i
5	-0.0047 - 0.0027i
6	0.0000 + 0.0054i
7	-0.0065 + 0.0155i
8	-0.0102 - 0.0134i
9	0.0104 + 0.0135i
10	0.0065 - 0.0157i
11	0.0106 + 0.0134i
12	0.0063 - 0.0159i
13	0.0083 - 0.0196i
14	-0.0211 + 0.0027i
15	0.0129 + 0.0170i
16	-1.5366e-04 - 7.3789e-04i
17	-5.6221e-04 + 5.0202e-04i
18	7.1586e-04 + 2.3588e-04i
19	0.0089 - 0.0216i
20	-0.0231 + 0.0031i
21	0.0143 + 0.0185i
22	0.0251 + 0.0198i
23	0.0046 - 0.0316i
24	0.0092 - 0.0229i
25	-0.0244 + 0.0035i

42x1 complex double

	1
1	4.6547e+03 - 2.7263e+03i
2	-4.6884e+03 - 2.6679e+03i
3	3.3710e+01 + 5.3943e+03i
4	4.6548e+03 - 2.7264e+03i
5	-4.6886e+03 - 2.6680e+03i
6	3.3717e+01 + 5.3944e+03i
7	4.6548e+03 - 2.7264e+03i
8	-4.6885e+03 - 2.6680e+03i
9	3.3700e+01 + 5.3944e+03i
10	0.0136 + 0.0131i
11	-0.0531 + 0.1611i
12	9.3437e+03 - 5.8277e+01i
13	0.0106 + 0.0026i
14	-0.0031 - 0.0105i
15	-0.0075 + 0.0079i
16	4.6550e+03 - 2.7264e+03i
17	-4.6886e+03 - 2.6681e+03i
18	3.3646e+01 + 5.3946e+03i
19	0.0091 + 0.0037i
20	-0.0013 - 0.0097i
21	-0.0078 + 0.0060i
22	4.6550e+03 - 2.7264e+03i
23	-4.6886e+03 - 2.6681e+03i
24	3.3646e+01 + 5.3946e+03i
25	1.4157e+05 + 8.1290e+04i

Фиг.3. Стойности на векторите dx/dt и y от уравнения (1) и (2).

Всички имат реални стойности, освен векторът [f], чиито стойности са комплексни. Резултатите за вектора на състоянието, токовете през индуктивностите и напреженията на капацитетите имат следните размерности dx/dt = [126x1], като са комплексни величини. Векторът с изходните напрежение и токове ще е y = [42x1] - комплексни стойности.

Поради големите размерности на масивите, представянето на всички резултати тук не е дадено. Част от резултатите за dx/dt и y са дадени на фиг.3.

При този подход трябва да се обърне внимание на едно ограничение, а именно, че наличието на нелинейни елементи в схемата (например, наличието на електронни преобразуватели като токоизправители, инвертори др.) няма да са описани в матриците на уравненията на състоянието.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С промяна на параметрите на матрицата на състоянията може да отчитаме структурата на схемата и динамиката на товарите. Чрез използване матриците от уравненията на състоянието може да се състави алгоритъм и програма за оптимизация на разпределението на компенсиращите реактивни мощности в сложни електроснабдителни системи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите, от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на НИС при ТУ-София 2015г., научен проект в помощ на докторанта ***„Централизирано управление на компенсиращите реактивни мощности в интелигентни електроснабдителни системи*** ”, договор **№ 151ПД0030-01/2015**

ЛИТЕРАТУРА

[1] El-Samahy I., K. Bhattacharya, C. A. Cañizares. ***A Unified Framework for Reactive Power Management in Deregulated Electricity***. Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES Atlanta, 2006

[2] Матанов Н., С. Димитрова. ***Модел на електроснабдителна система с променлива структура и електрически товари***. ЕФ-2015, Созопол 19-21 септември, 2015

[3] Matanov N. ***Optimization of the structure and the distribution of the reactive power compensation in the industrial electrical supply systems***. E+E Vol.49 No.3-4/2014 pp.27-33

[4] Черных И. В. ***Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink***. Москва, ДМК Пресс, 2007

Автори: Николай Стефанов Матанов, доц. д-р инж., катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (ЕСЕОЕТ), Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*; Снежана Асенова Димитрова, ас. инж., докторант, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (ЕСЕОЕТ), Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *s.dimitrova@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Симона Петракиева

ВЛИЯНИЕ НА СЪПРОТИВИТЕЛНАТА СИЛА НА ФЕРОФЛУИД ВЪРХУ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТ ЗА ЗАДВИЖВАНЕ

Анелия Терзова

Резюме: *В работата е изследвано влиянието на съпротивителната сила на ферофлуид върху динамичните характеристики на електромагнит за задвижване. Създаден е тримерен модел за получаване на работното налягане на флуида. Определена е съпротивителната сила на ферофлуида, като е отчетена скоростта на движение на котвата. Изчислени са динамичните характеристики на соленоиден електромагнит, работещ с въздушна междина и с работна междина запълнена с ферофлуид. Разработеният модел използва метода с крайни елементи, приложен със софтуерния продукт ANSYS 12.1– Mechanical и ANSYS - Fluent.*
Ключови думи: *ферофлуид, метод с крайни елементи, съпротивителна сила на ферофлуид, динамични характеристики, задвижващ електромагнит.*

INFLUENCE OF FERROFLUID DRAG FORCE ON CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC ACTUATOR

Aneliya Terzova

Abstract: *In this work the influence of ferrofluid drag force in dynamic characteristics of the electromagnetic actuator is investigated. 3D finite element method model of electromagnet is developed and pressure of fluid is obtained. Considering speed of electromagnetic actuator plunger, the drag force of ferrofluid is calculated. Dynamic characteristics of the solenoid electromagnet operating with an air gap and with gap filled with ferrofluid are determined. The developed model uses software product ANSYS 12.1 - Mechanical and ANSYS- Fluent.*
Keywords: *ferrofluid, finite element method, drag force of ferrofluid, dynamic characteristics, electromagnetic actuator.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електромагнитните задвижващи механизми имат редица предимства като отлични експлоатационни качества, висока надеждност, дълъг живот и др.. Електромагнитите са широко използвани в индустрията и са част от електромеханични устройства, управляващи различни механизми или системи. През последните години все по-голям интерес предизвикват електромагнитните системи с ферофлуидни материали в работната междина. Те се характеризират с подобри експлоатационни характеристики в сравнение с тези с въздушна меж-

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

дина, като например намаляване на енергийната консумация, по – малък обем и др..

Ферофлуидът представлява колоидна стабилна суспензия от феритни наночастици в разтвор и повърхностно активни вещества. Разтворите са дейонизирана вода, смес от органични разтворители или синтетични масла. Повърхностно активни вещества покриват наночастиците и по този начин ферофлуидът има поведението на хомогенна система, дори при наличието на външни въздействия като магнитни полета и др.. Наночастиците обикновено са железни оксиди (Fe_3O_4) или различни съединения като $ZnMnFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, $CuFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$ и др. Размерът на наночастиците е от 1 nm до 100 nm и определя свойствата на ферофлуида. Други два важни параметъра, с които се характеризира ферофлуида, са насищане и вискозитет. При липса на външно магнитно поле ферофлуидът има характеристиките на течност. Когато се приложи силно магнитно поле, той променя своите физични свойства и се ориентира по посока на силовите линии на магнитното поле. Изменението на вискозитета и плътността на ферофлуида е само около 20%. След премахването на външното магнитно поле ферофлуидът не запазва своята намагнитеност и се връща в началното си състояние. Чрез промяна на съставните елементи може да бъдат получени ферофлуиди с различни свойства [1, 2, 3, 4].

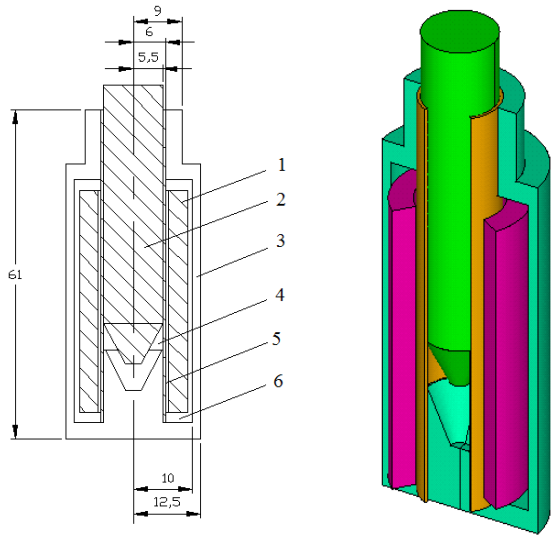
Устройства, работещи с ферофлуид, са различни видове електромагнити, микроелектромеханични системи, преобразуватели, сензори и др. Преобразувателите и сензорите, работещи с ферофлуид, са по-устойчиви на външни сътресения, при тях липсват механично триещи се части, което увеличава тяхната износоустойчивост. От конструктивна гледна точка, ферофлуидът лесно се внедрява без да се изискват големи промени в дизайна на устройствата [5, 6].

В статията е изследвано влиянието на съпротивителната сила на ферофлуид в електромагнит за задвижване. За определяне на електромагнитната сила е създаден двумерен модел на магнитното поле по метода с крайни елементи. Моделът използва софтуерният пакет ANSYS 12.1 Multiphysics. Флуидната задача е решена с помощта на ANSYS Fluent [13]. За определяне на динамичните характеристики е решена смесена задача, включваща магнитното поле, електрическата верига, движението на котвата и движение на ферофлуида. Изчислителният процес е автоматизиран, използвайки ADPL (ANSYS Parametric Design Language). Налягането на ферофлуида е определено при различни скорости на котвата и работни междини. Изчислен е коефициентът на динамично съпротивление на флуида и съпротивителната сила на ферофлуида. Представени са характеристики за електромагнити с цилиндрична и с конична котва.

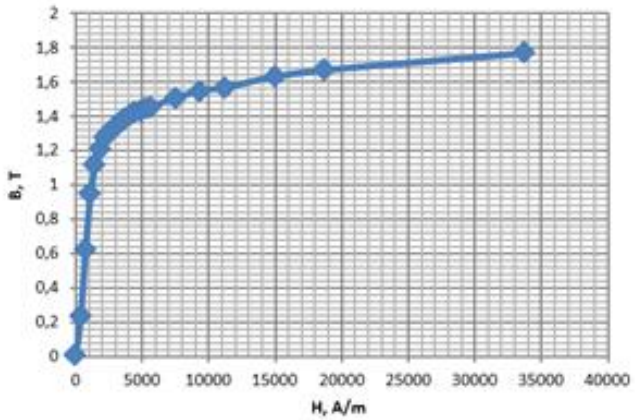
2. ЕЛЕКТРОМАГНИТ С ФЕРОФЛУИД

Изследваната конструкция е соленоиден електромагнит, който се състои от феромагнитен магнитопровод, работна междина с ферофлуид и цилиндрична котва. Създадени са два модела на електромагнита с цилиндричен и с коничен полюс на котвата. Размерите на електромагнита са представени на фиг.1. Материалът на магнитопровода и котвата е електротехническа стомана, характеристиката, на която е показана на фиг.2. Въздушната междина е запълнена с фе-

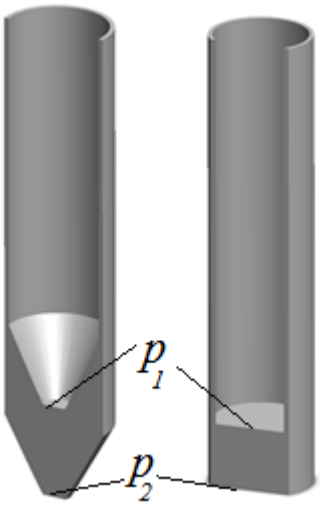
рофлуид. Моделираният обем на ферофлуида е показан на фиг. 3. Намотката е с 600 навивки, използван е меден проводник с диаметър 1mm. Средната токова плътност в намотката е $J = 5\times10^6$ A/m^2. Масата на котвата е 0.042kg. Използваният ферофлуид е с относителна магнитна проницаемост $\mu_r = 3$, индукция на насищане $B_s = 44$ mT (± 10%), вискозитет < 6 mPa.s, плътност $\rho = 1.1$ g/cm^3, точка на кипене 230 °C (± 10 %) [7].



Фиг.1. Изследван електромагнит
1 - намотка; 2 - котва; 3 - магнитопровод; 4 - работна междина;
5 - месингова втулка; 6 - изолация на намотката.



Фиг.2. B-H характеристика на електротехническа стомана



Фиг.3. Моделирани обеми на ферофлуида с плосък и коничен полюс

3. МАГНИТНО ПОЛЕ

Разпределението на магнитното поле в разглеждания електромагнит се описва от уравнението на Поасон

$$rot(\frac{1}{\mu} rot\mathbf{A}) = \mathbf{J}\,, \qquad (1)$$

където **A** е магнитният вектор потенциал; μ - относителната магнитна проницаемост на средата; **J** - токовата плътност на намотката.

Наложени са гранични условия от първи род (на Дирихле). Стойността на магнитния вектор потенциал по границите на буферната зона се задава нула A=0.

Електромагнитната сила **F** се определя чрез тензора на напреженията на Максуел

$$\mathbf{F} = \iint_s \left((\mathbf{n} \cdot \mathbf{B})\mathbf{H} - \frac{1}{2}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{H})\mathbf{n} \right) dS, \tag{2}$$

където **B**, **H, n** са съответно векторът на магнитната индукция, векторът на магнитния интензитет, единичен вектор към нормалата на затворената повърхност [8].

4. МЕХАНИЧНО ДВИЖЕНИЕ НА КОТВАТА

В изследваните конструкции електромагнити (фиг.1) върху котвата действат различни сили. Това са електромагнитна сила, сила на тежестта, сили, зависещи от триенето, породено от началния вискозитет на флуида, хидростатични сили, сили, зависещи от движението на флуида и др.

Динамичните характеристики се определят от системата уравнения (3), която описва преходния режим на електромагнита при включване. Тази система се състои от уравнение за електрическата верига на намотката и уравнение за баланса на силите.

$$\begin{cases} U = Ri + L\dfrac{di}{dt} + i\dfrac{dL}{dx}\dfrac{dx}{dt} \\ m\dfrac{d^2x}{dt^2} + F_d = F_{ем} + F_{ем_ф} + F_в \end{cases} \tag{3}$$

където *U, R, L, x* са съответно захранващото напрежение, активното съпротивлението на намотката, индуктивността на намотката и преместването на котвата.

В (3) $F_{ем}$ е електромагнитната сила, F_d – силата на триене с ферофлуида, която зависи от вискозитета и скоростта на котвата, $F_в$ – вертикална сила на натиск, зависеща от налягането на ферофлуида, $F_{ем_ф}$ – електромагнитна сила, породена от ферофлуида, m – масата на котвата.

Вертикална сила на натиск върху флуида в цилиндъра е

$$F_в = (p_1 - p_2)\pi r^2, \tag{4}$$

където p_1 и p_2 е налягането на флуида под котвата (фиг.3), r е радиуса на котвата. Тази сила е насочена по посока на движение на флуида. Тъй като в случая налягането в двата края е почти константа, вертикалната сила на натиск може да се пренебрегне.

Силата на вътрешно триене F_d, която е насочена в противоположна посока и се стреми да забави флуида и движението на котвата, може да се определи по формулата

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho S v^2, \tag{5}$$

където ρ е плътността на флуида; S - напречната площ на тялото спрямо направлението на движение; v скоростта на котвата спрямо флуида. В динамиката на флуидите за количествено определяне на съпротивлението на обект, движещ се в среда на флуид, се използва коефициентът на динамично съпротивление C_d. Колкото по-малка е стойността на този коефициент, толкова по-малка съпротивителна сила изпитва обекта. Коефициентът на динамично съпротивление може да се раздели на две компоненти коефициент на налягането c_p и коефициент на триенето c_f [9, 10, 11].

$$C_d = c_p + c_f, \tag{6}$$

$$c_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho v^2}, \tag{7}$$

$$c_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho v^2}, \tag{8}$$

където p е повърхностно налягане, p_0 – статично налягане на свободен поток, τ – напрежение на срязване.

След въвеждане на величината скорост v системата уравнения (3) добива вида

$$\begin{vmatrix} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}\left(U - Ri - i\frac{dL}{dx}\frac{dx}{dt}\right) \\ \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}\left(F - kx - F_d\right) \end{vmatrix}, \tag{9}$$

където $F = F_{ем} + F_{ем_ф}$. Стойностите на електромагнитната сила $F_{ем}$ и електромагнитна сила, породена от ферофлуида $F_{ем_ф}$ се определят от модела на магнитното поле по метода с крайните елементи.

За решаване на системата е използван итеративен алгоритъм, базиран на метода на Ойлер [8].

5. ДВИЖЕНИЕ НА ФЕРОФЛУИД

Тъй като диаметърът на котвата е много по-голям от междината, запълнена с ферофлуид, течението му се разглежда като ламинарно. При ламинарното течение частиците на флуида са разделени на отделни слоеве, които само се хлъзгат един спрямо друг, без да се смесват.

Движението на ферофлуида в междината предизвиква налягане, което се състои от две компоненти - налягане, породено от началния вискозитет на флуида P_η и налягане, породено от магнитното поле P_M

$$P = P_{\eta} + P_{M}. \quad (10)$$

Уравнението на Навие-Стокс, описващо ламинарно течение на несвиваем флуид е

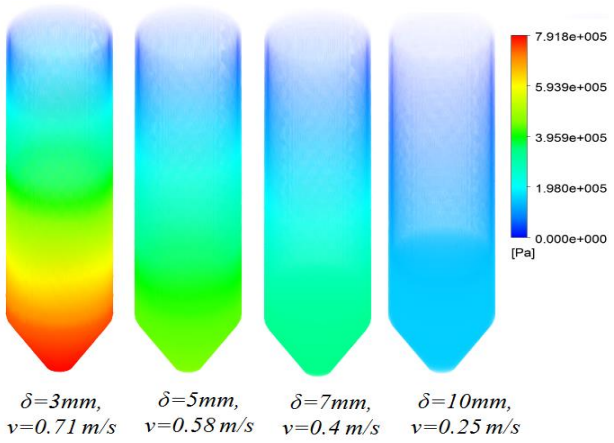
$$\rho(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}) = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho \mathbf{f}\ , \quad (11)$$

където p е налягането, $\mathbf{v}$ - векторът на скоростта, ρ и η - съответно са плътността и вискозитетът на ферофлуида, $\mathbf{f}$ - сумата на приложените сили за единица обем на ферофлуида [9, 10].

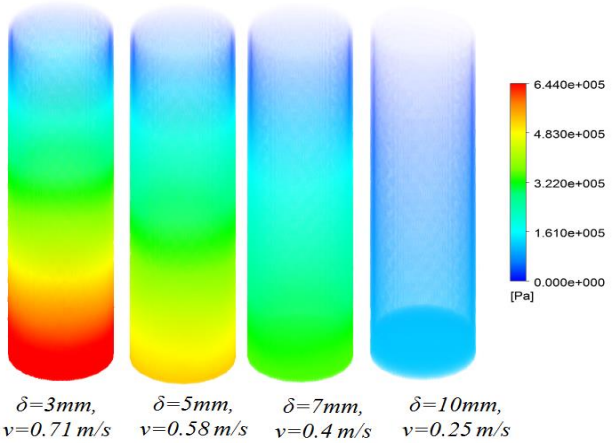
6. РЕЗУЛТАТИ

С разработения двумерен модел за изчисляване на магнитното поле на електромагнит с ферофлуид са определени характеристиките на електромагнита. За точното получаване на динамичните характеристики е решена смесена задача, включваща магнитното поле, електрическата верига, движението на котвата и движение на ферофлуида. За определяне на коефициента на съпротивление и съпротивителната сила на ферофлуида е създаден модел на обема на флуида, в който се движи котвата.

На фиг.4 и фиг.5 е показано разпределението на налягането в обема на флуида, съответно при конична и цилиндрична котва и при различни скорост v и работна междина δ между полюса и котвата. Определеното налягане се използва при определяне на коефициента на съпротивление C_d.



Фиг.4. Разпределението на налягането в обема на флуида при конична котва

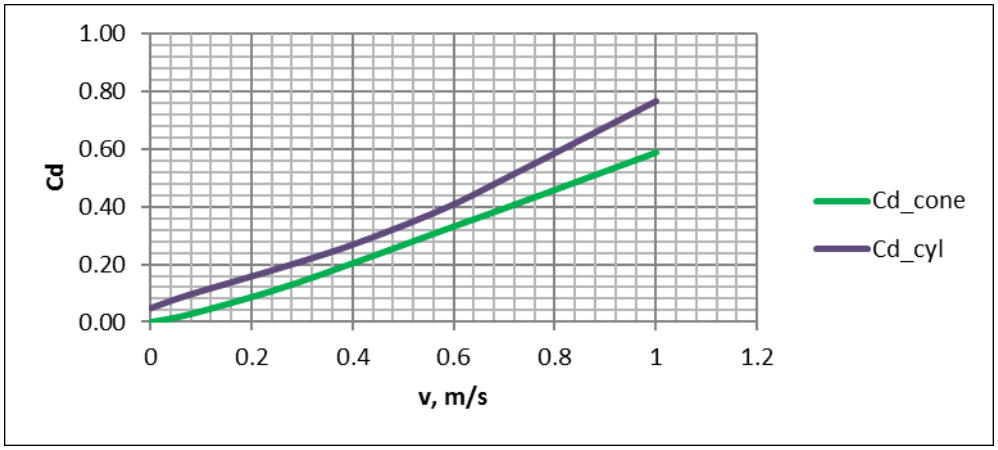


Фиг.5. Разпределението на налягането в обема на флуида при цилиндрична котва

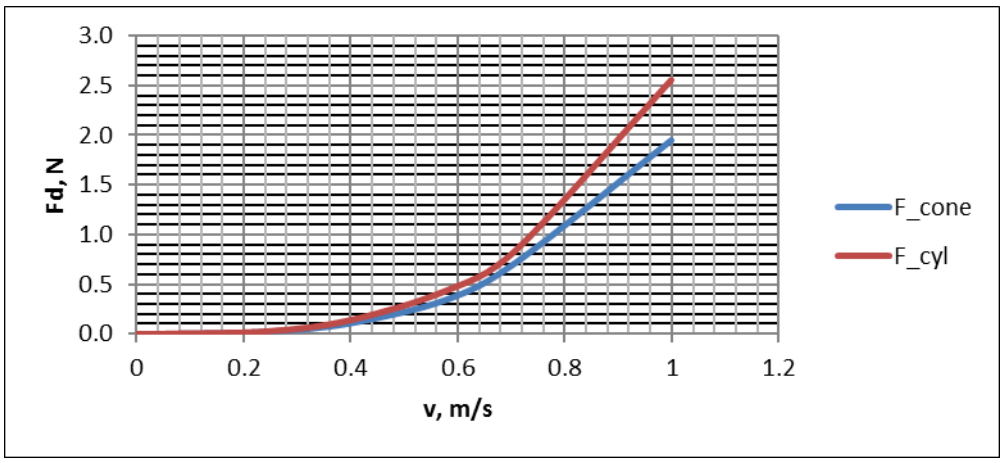
С увеличаване скоростта на движение на котвата налягането във флуида расте. Налягането, получено в обема на флуида с цилиндричен профил е по-малко от налягането в обема на флуида с коничен профил.

На фиг.6 е показано изменението на коефициента на динамично съпротивление на флуида C_d в зависимост от скоростта за цилиндрична и за конична котва. Съпротивителната сила на ферофлуида (5) е дадена на фиг.7. Коефициентът на съпротивление на флуида при конична котва е по-малък от този при цилинд-

рична котва. Съответно съпротивителната сила на флуида при конична котва е по-малка с 23,5 % от тази при цилиндрична котва.



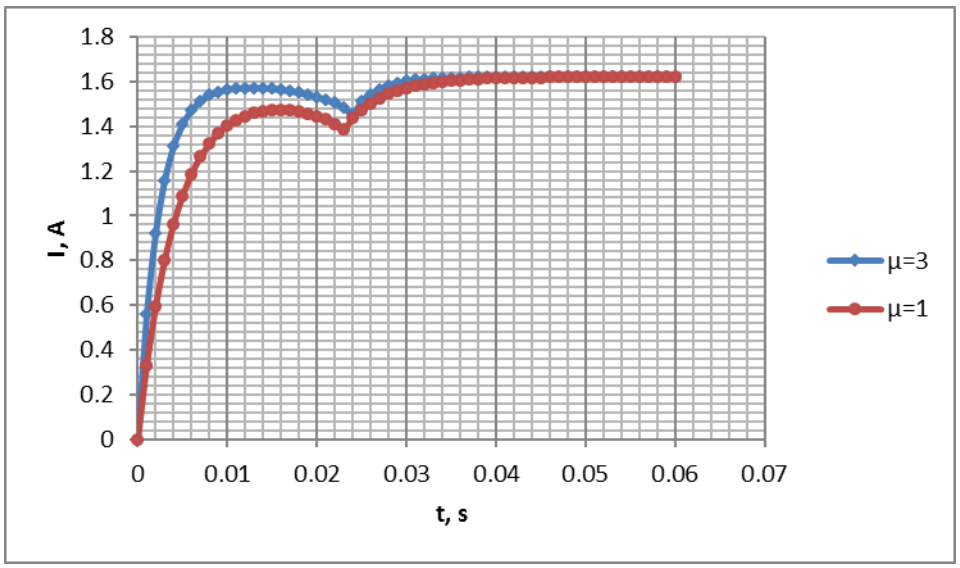
Фиг.6. Коефициент на съпротивление на флуида в зависимост от скоростта на котвата



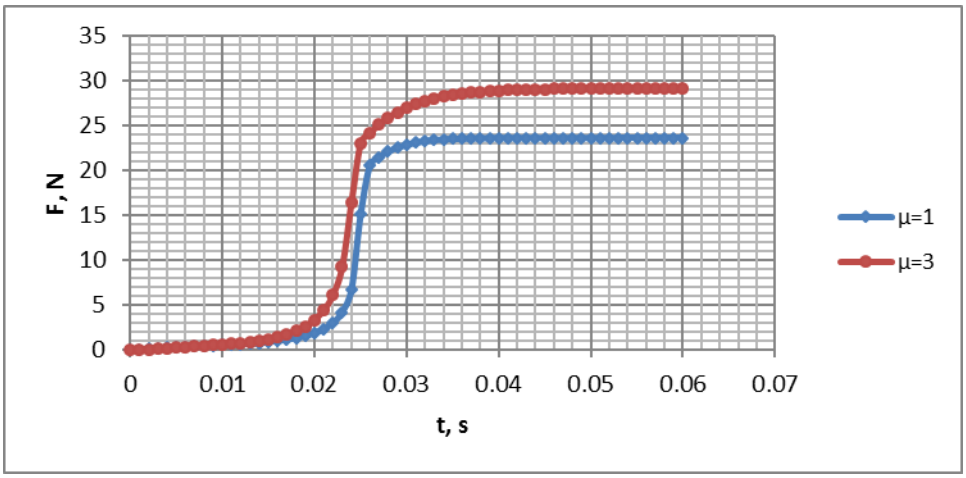
Фиг.7. Съпротивителна сила на ферофлуида в зависимост от скоростта на котвата

Изчислени са динамичните характеристики на електромагнит с конична котва. Получената система уравнения е решена по итеративен път, времето е разделено на подинтервали равни на 0.001s. За всяка времева стъпка се изчисляват токът на намотката, скоростта и преместването на котвата. Стойностите на електромагнитната сила и индуктивността на намотката се изчисляват от модела за магнитното поле по метода с крайните елементи. Резултатите в текущата стъпка се използват за изчисляване на резултатите в следващата стъпка. Началните условия за време $t_0=0$ са $\delta_0=\delta_{in}$, $x_0=0$, $i_0=0$, $U=6V$, $R=3.7\Omega$. Изчислителният процес е автоматизиран използвайки ADPL (ANSYS Parametric Design Language).

На фиг.8 е показано изменението на тока във времето. Изчисленията са направени с въздушна междина и с работна междина на електромагнита, запълнена с ферофлуид с относителна магнитна проницаемост μ=3. На фиг.9 е показано изменението на електромагнитната сила във времето.

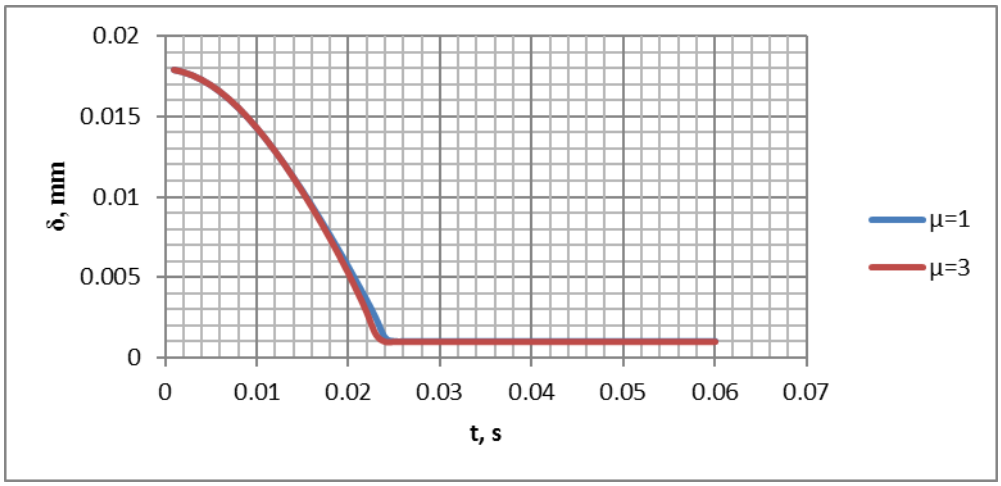


Фиг.8. Изменение на тока във времето

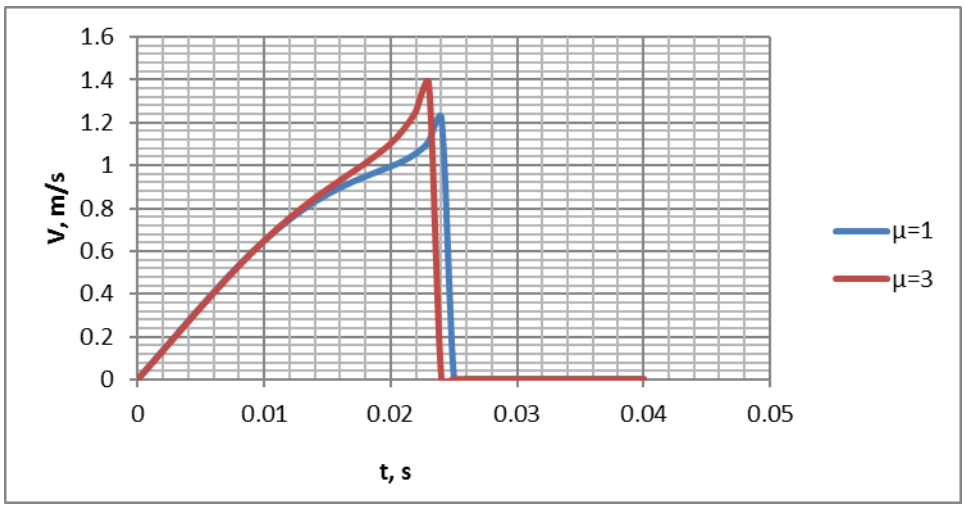


Фиг.9. Изменение на силата във времето

На фиг.10 и фиг.11 са показани движението на котвата и изменението на скоростта във времето, при електромагнит с въздушна междина и електромагнит с работна междина, запълнена с ферофлуид.



Фиг.10. Движение на котвата във времето



Фиг.11. Изменение на скоростта на котвата във времето

Наличието на ферофлуид в работната междина на електромагнита води до увеличаването на електромагнитната сила. Увеличава се и скоростта на движение на котвата при по-малките въздушни междини. При включване, токът на електромагнита с ферофлуид е по-малък от тока на електромагнита с въздушна междина. Времето за включване на електромагнита почти не се изменя.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследвано е влиянието на съпротивителната сила на ферофлуид, поставен в работната междина на електромагнит. Разгледани са две конструкции на соленоиден електромагнит. Първата конструкция е с конична котва, а втората е с цилиндрична котва. За решаване на задачата за движение на флуида е използван ANSYS Fluent. Получено е разпределението на налягането във ферофлуида при различни работни междини на електромагнита и различни скорости на котвата. Определен е коефициентът на динамично съпротивление на ферофлуида и е изчислена съпротивителната сила, която се прилага върху котвата на електромагнита. Създаден е модел на магнитното поле по метода с крайни елементи и е определена електромагнитната сила. Моделът използва софтуерният пакет ANSYS 12.1 Multiphysics. Изчислени са динамичните характеристики на електромагнит с конична котва, като е отчетено влиянието на съпротивителната сила на ферофлуида. Направените изследвания може да бъдат използвани при проектиране и анализ на електромагнитни системи, работещи с ферофлуидни материали.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Scherer C., Figueiredo Neto A. M., ***Ferrofluids: Properties and Applications***, Brazilian Journal of Physics, vol. 35, no. 3A, September, 2005, pp.718-727

[2] Raj K., Moskowitz B., Tsuda S., ***New commercial trends of nanostructured ferrofluids***, International Journal of Engineering and Materials Sciences,Vol. 11, 2004, pp.241-252

[3] Ervithayasuporn V., Kawakawi Y.*, Synthesis and characterization of core-shell type Fe_2O_3 nanoparticles in poly (organosilsesquixane)*, J. Colloid Interface Sci., vol. 332, 2009, pp. 389–393.

[4] Vekas L., Bica D., Marinica O., ***Magnetic nanofluid stabilized various chain length surfactants***, Rom. Rep. Phys., vol. 58, no. 3, 2006, pp. 257–267.

[5] Olaru R., Pal C., Petrescu C., ***Current to pressure transducer with magnetic fluid***, Sensors and Actuators, 2001, pp. 150-152.

[6] Martinez L., Cecelja F., Rakowski R., ***A novel magneto-optic ferrofluid material for sensor applications***, Sensors and Actuators, 2005, pp. 438–443.

[7] Mateev V., Marinova I., Saito Y., ***Coupled Field Modeling of Ferrofluid Heating In Tumor Tissue***, IEEE Transactions On Magnetics, 2013, pp. 1793 – 1796.

[8] Ячев И, Маринова И, ***Числени методи и моделиране на вериги и полета***, ТУ-София, 2007г.

[9] Rosensweig R. E., ***Ferrohydrodynamics***, Dover Publications, 2014.

[10] Savioz G., Ruchet V., Perriard Y., ***Study of a Miniature Magnetorheological Fluid Actuator for Haptic Devices***, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Canada, 2010, pp.1197-1202.

[11] Radionov A., Podoltsev A., Zahorulko A., ***Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft***, Procedia Engineering 39, 2012, pp. 327-338.

[12] Mallick M. and Kumar A., ***Study on Drag Coefficient for the Flow Past a Cylinder***, International Journal of Civil Engineering Research, Vol. 5, India, 2014, pp. 301-306.

[13] ANSYS Release 12.0 Documentation, 2010.

Автори: Анелия Терзова, маг. инж. ас., катедра “Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *aterzova@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. дтн Александър Александров

АПАРАТУРА ЗА БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ НА СЪСТОЯНИЕТО НА КАБЕЛНИ ЛИНИИ

Емилия Димитрова

Резюме: *Бързото и точно откриване на местоположението на кабелни повреди е гаранция за възстановяване на авариралите трасета в кратки срокове. Цел на настоящия доклад е да покаже тенденциите в развитието на апаратурата за локализиране на повреди в кабелни линии. Дадени са насоки за правилна експлоатация и методики за провеждане на лабораторни упражнения със студенти.*
Ключови думи: *кабелни мрежи, локализиране на повреди, импулсни рефлектометри TDR*

EQUIPMENT FOR NONDESTRUCTIVE TESTING (NDT) OF THE STATE OF CABLE LINES

Emiliya Dimitrova

Abstract: *Rapid and accurate detection of the location of the cable fault is a guarantee for the restoration of the damaged routes in a short time. The aim of this paper is to show trends in the equipment for locating faults in the cable lines. Guidance on proper operation is given as well as methodologies for conducting laboratory tests with students.*
Key words: *cable lines, location of cable faults, Time Domain Reflectometers TDR*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Бързото развитие на цифровата електроника и измервателна техника е предпоставка за увеличено предлагане на пазара на съвременна апаратура в помощ на инженерите, занимаващи се с монтаж, диагностика и експлоатация на телекомуникационни и кабелни мрежи. Разработват се все по-мощни и безопасни тестери, които са леки за пренасяне, удобни за употреба и лесни за използване. В съответствие с навлизането на тази съвременна апаратура се поставят по-високи изисквания към подготовката на кадри. Необходимо е повишаване нивото на обучение на специалисти за работа в тези области. Целта на настоящия доклад е да се покажат новите тенденции в развитието на апаратурата за локализиране на кабелни повреди. Дадени са основните параметри и характеристики на предлагани у нас съвременни уреди, показани са методики за провеждане на изпитания, които могат да бъдат използвани в учебния процес при обучение на студенти.

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ЛОКАТОРИ НА КАБЕЛНИ ПОВРЕДИ

Използването на ехо-импулсен рефлектометър (Time Domain Reflectometer – TDR) е утвърден метод за откриване на повреди в метални захранващи кабели или кабели за пренос на данни [1, 2, 3]. Методът се основава на отражението на подаден в кабела импулс, след като е претърпял изменение в мястото на неедноpодност в хомогенната верига. Тази неедноpодност всъщност се изразява в промяна на вълновото съпротивление на кабела, каквато настъпва при късо съединение между жилата, прекъсване или серийни повреди. От времето за разпространение на импулса може да се измери разстоянието до мястото на отражение, ако се знае скоростта на разпространение в кабела:

$$l_x = t\frac{v}{2}, \text{ m} \qquad (1)$$

където l_x е разстоянието до мястото на повредата, t – време за разпростра-нение на импулса, $V/2$ – скорост на разпространение на импулса в кабела.

2.1. РЕФЛЕКТОМЕТРИ СЕРИЯ TDR mark3

Серията TDR Mark3 на Megger са компактни преносими рефлектометри, които са лесни за използване и са със сравнително ниска цена [2, 4]. Предлагат се три модела – TDR500/3 (фиг.1), TDR1000/3 и TDR1000/3P, които се различават по вида на измервателните проводници и курсорите на дисплея. Характеризират се с точно и лесно откриване на повредата (на разстояния от 0.2 m до 5 km) благодарение на разделителната способност до 0.1 m, бърз импулс от 2 ns за откриване на близкия край на повредата, автоматичен избор на изходен импеданс (между 25, 50, 75 и 100 Ω), вграден блокиращ филтър

Фиг.1. Рефлектометър TDR500/3

При моделите TDR1000/3 и TDR1000/3P двойни курсори осигуряват цялостна гъвкавост, предоставяйки на оператора пълен контрол и незабавна индикация на разстоянието между две точки.

2.2. РЕФЛЕКТОМЕТРИ Digiflex Com и Easyflex Com

Рефлектометрите, предлагани от фирма SebaKMT (фиг.2), са компактни, леки и лесни за работа цифрови уреди за локализиране на повреди в телекомуникационни и захранващи кабели и линии за дистанционен контрол и управление. Измервателният обхват е от 50 m до 15 km с максимална резолюция 5 cm (за Easyflex Com) и от 50 m до 30 km с максимална резолюция 2.5 cm (за Digiflex

Com) [5, 6]. Към рефлектометрите могат да бъдат свързани два кабела едновременно и да се изобразят две рефлектограми или да се използват предварително записани такива с цел сравнение, като са възможни следните режими на измерване:

- измерване на кабел и сравняване с вградена балансирана линия,
- алтернативно измерване между два кабела;
- измерване на разлика между кабели;
- откриване на преслушване между кабели.

Фиг.2. Рефлектометри Digiflex Com и Easyflex Com

2.3. ТЕСТЕРИ ЗА НИСКО СЪПРОТИВЛЕНИЕ СЕРИЯ DLRO10

Тестването с ниско съпротивление (наричано понякога „дуктер тест“) е метод за проверка на непрекъснатостта на връзка, кабелно съединение или шина и потвърждаване, че в изпитвания образец има минимална загуба на енергия, дължаща се на съпротивление.

Серията DLRO10 на Megger са напълно автоматизирани тестери за ниско съпротивление, като избират най-подходящия обхват тестови ток до 10 A DC за измерване на съпротивление от 0.1 μΩ до 2 kΩ. Извършват измервания с токове в права и обратна посока, за да се елиминират ефектите от евентуални стоящи напрежения по тестовия образец. Изобразяват се измерените стойности в двете посоки, както и средната стойност [7]. Тези тестери са много подходящи за използване в системата на метрополитена за проверка на заземителни връзки в условия на замърсеност и влага в тунелите. Моделът DLRO10X е снабден с вградена памет за 700 комплекта с резултати и за бележки (въвеждат се помощта на буквено-цифровата клавиатура), които могат да бъдат изтеглени в компютър. Моделът DLRO10HD е предназначен за измервания не само с ниска, а и с висока мощност – 2.5 W (1A) и 25 W (10 A за 60 s при 250 mΩ). Това дава възможност за диагностика на състоянието и е особено подходящ за измерване на кабели с голямо сечение, на връзки и на качеството на заварки.

DLRO10HD предлага пет тестови режима: два автоматични режима (регистрират свързване на сондите с цел свеждане до минимум на времето на теста и повишаване на производителността), непрекъснато изпитване (нов резултат се извежда на всеки три секунди) и еднопосочен индуктивен режим. При изпитване

на големи индуктивни съпротивления е необходимо да се изчака напрежението да се стабилизира, поради което процесът на измерване може да отнеме няколко секунди или няколко минути. Измервателните проводници са стабилно свързани към измервания образец и не трябва да бъдат сваляни преди целият натрупан заряд да се разреди в края на теста. Приборът извършва няколкократни отчитания, които със стабилизирането на напрежението постепенно осцилират до действителната стойност. Операторът решава кога резултатът е стабилен и прекратява теста.

Фиг.3. Тестери за ниско съпротивление DLRO10X и DLRO10HD

3. ЛОКАЛИЗИРАНЕ НА КАБЕЛНИ ПОВРЕДИ

Съвременните рефлектометри дават възможност за измерване дължината на кабела и разстоянието до точката на повредата, като се използва израз (1). Точността при измерване на разстояния зависи изключително много от точността, с която е въведена скоростта на разпространение на импулса за конкретния кабел.

3.1. ИЗБОР НА СКОРОСТТА НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ИМПУЛСА

Ориентировъчни стойности и допустимите отклонения вследствие разсейване на сигнала могат да бъдат взети от таблици [1]. За успешното прилагане на импулсно-отражателният метод за локализиране на повреди не могат да се допускат разлики и отклонения в скоростта, тъй като това ще доведе до грешки в изчисленията до местата на повредите [2, 3]. За точното определяне на скоростта е необходимо да се знае точната физическа дължина на кабела. Измерването се прави по следния начин:

- Измерва се точната физическа дължина на една двойка от кабела (обикновено чрез измерване на съпротивлението на шлейфа).
- Изходът на уреда се включва към изправна двойка от кабела.
- Положително отразеният импулс от края на отворения кабел се измества, докато съвпадне с предавания импулс.
- На уреда се задава коя и да е стойност за скоростта на разпространение на импулса (V/2 = 75-100 m/μs).

- Натиска се бутонът за отчитане на разстоянието.
- Стойността на V/2 се изменя, докато отчетеното разстояние за дължината на кабела съвпадне с точно измерената физическа дължина на кабела.

Стойността на V/2 при това съвпадане е скоростта на разпространение на импулса за дадения кабел.

Трябва да се има предвид, че времето за разпространение на импулс в навлажнен кабел е повишено, така че отчетеното разстояние е по-голямо от реалното (при сух кабел).

3.2. ВИДОВЕ ПОВРЕДИ И НЕЕДНОРОДНОСТИ ПО КАБЕЛНИ ЛИНИИ

Ехограмите на най-често срещаните повреди и нееднородности по кабелни линии са показани на фиг. 4.

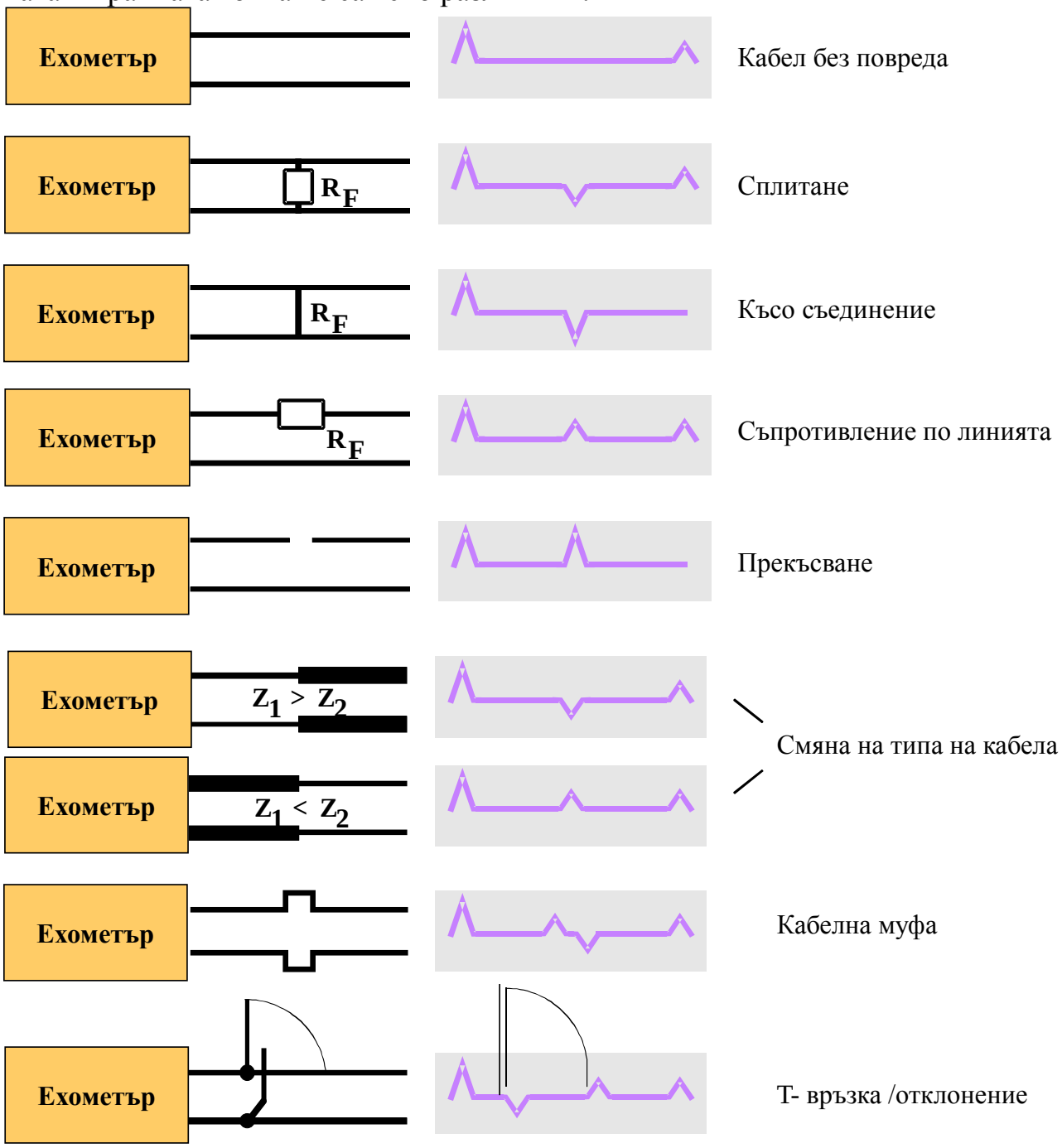
Паралелните повреди се изразяват при влошено изолационно съпротивление или къси съединения с коефициент на отражение r =100%. При късо съединение между два проводника от кабела съществува директен електрически контакт, което ще предизвика отрицателно отражение. За локализиране на късо съединение към екран или броня на кабела е необходимо да се изключи заземителният проводник от екрана и измервателните проводници да се свържат към екрана и повредения проводник (чифт). Неправилно свързаните чифтове предизвикват рефлектограма, подобна на тази при късо съединение, но отражението е с по-малка големина.

При *серийни повреди* в мястото възниква съпротивление с много голяма стойност, което отразява всички променливотокови компоненти със същата амплитуда и фаза. Прекъсването на единия или двата проводника от измервания чифт (отворена верига) предизвиква положително отражение. При повреди, причинени от повишено съпротивление (напр. при свързване на кабели в муфа) големината на предизвиканото положително отражение зависи от качеството на електрическия контакт (неговото съпротивление). За локализиране на повреди в металната влагозащитна обвивка се препоръчва единият измервателен проводник да се свърже към влагозащитната обвивка, а другият – към възможно най-голям брой проводници от кабела. Големината на отражението зависи от съпротивлението в точката на повредата.

Дефекти, възникващи при монтажа на кабелите и основна причина за поява на *преслушвания*, са кръстосани чифтове и двойно кръстосване на чифтове с връщане към правилния начин за идентификацията им. Когато чифтът не е усукан, се появява отражение в положителна посока, а когато е усукан – в отрицателна.тъй като обикновено разстоянието между кръстосването и обратното кръстосване е много малко, двете отражения се наслагват и се визуализират като единично слабо отражение.

Сингулярните повреди се изразяват чрез преминаване от високо към нискоомно съпротивление. При наличие на разклонителна муфа промяната на характеристичния импеданс води до слабо отрицателно отклонение, подобно на късо съединение. Ако по трасето има много разклонителни муфи, е трудно да се интерпретират резултатите от кривата и е необходимо да се притежава много точна информация за мрежата.

При повреди, предизвикани от *поява на влага в кабела*, се наблюдава слабо отражение в отрицателна посока в началото на натеклия кабелен участък (подобно на повреда от късо съединение), последвано от отражение в положителна посока в края на натеклия кабелен участък (подобно на прекъснат кабел). Появата на наклон на хоризонталната крива означава, че навлажняването нараства или намалява по дължината на кабела. При по-стари кабели, които са навлажнени по цялата дължина, е трудно да се установи точката на повредата, тъй като началната и крайната точка не са ясно различими.



Фиг.4. Ехограми на най-често срещаните повреди и неоднородности по кабели

При желирани кабели отражението може да бъде много малко поради ограничения периметър на натичане.

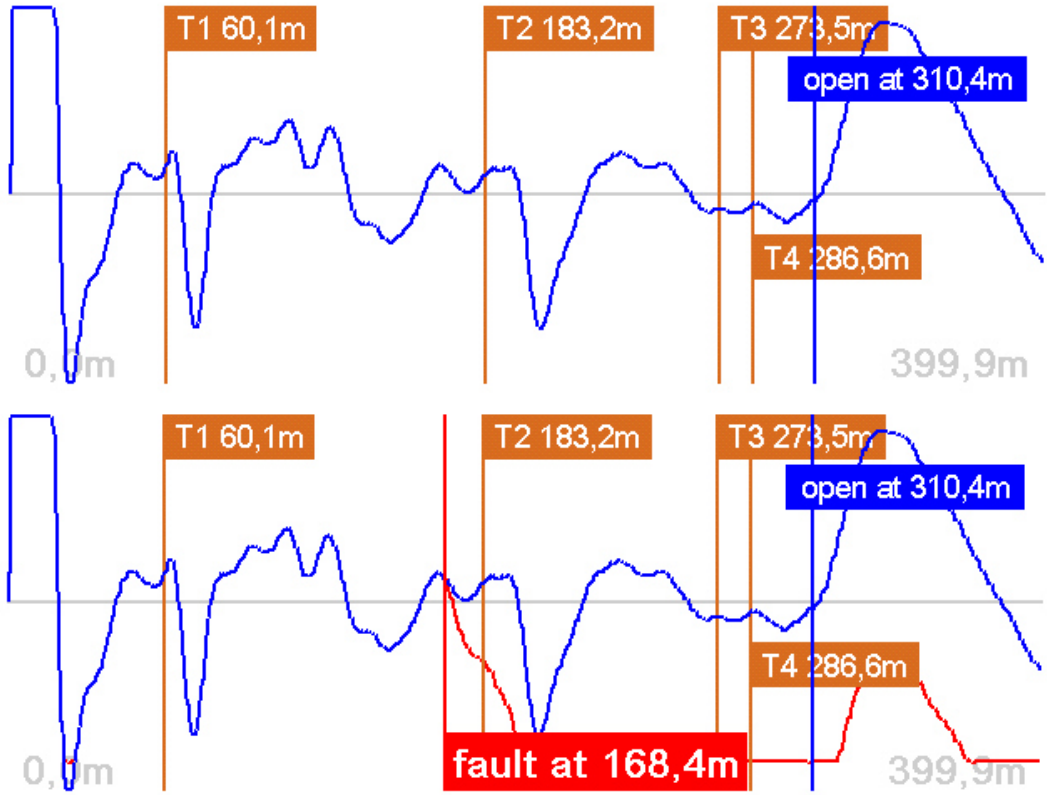
3.3. МЕТОДИКА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЛАБОРАТОРНИ УПРАЖНЕНИЯ

1) Измерване на кабел с известна номинална скорост на разпространение (NVP) или с известна скорост на разпространение на импулса (V/2).

В много случаи трасето и характеристиките на кабела са известни, което улеснява определянето на характера и местоположението на повредата. Ако има изправен чифт, който да бъде използван за сравнение, се избира режим „Измерване на разлика между кабели“, като изправният и повреденият чифт се свързват към двойки клеми на уреда. Ако не е сигурно дали има изправен чифт, при уредите Digiflex Com и Easyflex Com може да се използва кабел – фантом KNB001 като заместител на кабелно трасе. Препоръчва се за работа с много къси кабели или кабели с голяма честотна зависимост. Друг вариант е да се използват предварително запаметени ехограми. След това се въвежда скоростта на разпространение, настройва се режим за визуализация ”Dual” и чрез маркерите се измерва разстоянието. Получената рефлектограма може да бъде записана в паметта на уреда.

2) Измерване на кабел с неизвестни номинална скорост на разпространение (NVP) и скорост на разпространение на импулса (V/2).

В такъв случай е необходимо да се разполага с кабелен отрязък от същия тип с известна дължина (може да се използва участък от измерваната кабелна линия, чиято точна дължина до специфично място е известна). По този начин може да бъде определена скоростта на разпространение за този кабел. След това измерванията се извършват по подобен начин.



Фиг.5. Резултати от измервания:
а – изправен кабел; б – локализиране на мястото на повредата

Примерни резултати от измерване с моделите TDR1000/3 и TDR1000/3P са дадени на фиг.5. Върху запаметена крива на изправен кабел е възможно наслагване на реална крива и локализиране с висока точност на мястото на повредата.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия доклад са показани тенденциите в развитието на апаратурата за локализиране на повреди в кабелни линии. Дадени са насоки за правилна експлоатация и начините за откриване и идентифициране вида на повредите. Описани са методики за провеждане на лабораторни упражнения със студенти. Внедряването на съвременна апаратура в учебния процес е важно условие за повишаване на нивото на подготвяните специалисти.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Николов, Н., „Кабелна съобщителна техника“ ч. III: „Измервания за локализиране на повреди по съобщителни кабели“, Нови знания, София 2000.
[2] Електрически изпитвателни прибори, Продуктов каталог, Megger, 2014.
[3] Test and Measurement, Catalogue, Seba KMT, 2012.
[4] Handheld Reflectometers TDR, Technical specification, Megger, 2014.
[5] Дигитален рефлектометър Digiflex Com, Техническа спецификация, Seba KMT, 2012.
[6] Дигитален рефлектометър Easyflex Com, Ръководство за експлоатация, Seba KMT, 2012.
[7] DLRO 10 - Digital Microohmmeters, Technical specification, Megger, 2014.

Автор: Емилия Андонова Димитрова, ас. д-р, катедра „Съобщителна и осигурителна техника и системи”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“ – София, , E-mail address: *edimitrova@bitex.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: доц. д-р Ивайло Долапчиев

ДИНАМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВАКУУМЕН ПРЕКЪСВАЧ ЗА ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ

Росен Танев, Валентин Матеев, Илиана Маринова

Резюме: *В работата е представена компютърна измервателна система за определяне на динамичното съпротивление на разряд при комутиране на вакуумни прекъсвачи. Компютърна измервателна система е приложена за наблюдение и запис при изпитване на прекъсвачи модел RG1 и модел R5C (тип SPST). Експериментално са получени резултати за тока, напрежението и съпротивлението на електрическата дъга, при изключване на прекъсвача. Използвани са съвременен измервателен уред Keysight-34461A, регистриращо DAQ устройство NI USB-6009 и софтуер LabVIEW.*
Ключови думи: *вакуумен прекъсвач, компютърна измервателна система, динамично съпротивление, LabVIEW*

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF HIGH VOLTAGE VACUUM INTERRUPTERS

Rosen Tanev, Valentin Mateev, and Iliana Marinova

Abstract: *In this study a computer controlled measurement system is proposed and applied for dynamic electric arc discharge characteristics measurements, during on-load switching mode of vacuum interrupter. The system is used to monitor and record the results of investigating RG1 model and R5C model interrupters. Experimental results of current, voltage and resistance of the electrical arc in switch-off mode are obtained. Modern testing equipment is used: multimeter Keysight-34461A, data aqusition device DAQ NI-USB-6009 and LabVIEW software.*
Keywords: *vacuum interrupter, computer controlled measurement system, dynamic electrical resistance, LabVIEW*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Изпитването на различни конструкции комутационни апарати (КА) и в частност вакуумни дъгогасителни камери (ВДК) [1-3] е важна част от контрола и анализа на работа им. Самото изпитване е сложен процес, провеждан в тежки измервателните условия, свързан с наличие на високо напрежение, комутационни смущения, температура и др. Нужни са задълбочени познания за извършване на безопасни и същевременно точни измервания, използвани при създаване на експериментални методики, с които може да протече успешно и ефективно изпитването на КА. Получените резултати от изпитванията са необходима основа при

© 2016 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

реализиране и верифициране на теоретични и числени модели на процесите, протичащи в КА [4-5].

В статията е показана създадена компютърна измервателна система (КИС) за определяне на динамичното съпротивление на разряда при комутиране на вакуумни прекъсвачи. КИС е използвана за наблюдение и запис на резултати при изпитване на прекъсвачи Отразени са последните експериментални тенденции, приложими при регистриране на бързи, динамични събития в КА.

2. КОМПЮТЪРНА ИЗМЕРВАТЕЛНА СИСТЕМА

Компютърната измервателна система се състои от силов захранващ блок, изпитван вакуумен прекъсвач (вакуумно реле), специализиран мултимер Keysight-34461A, устройство за измерване на данни (DAQ) NI USB-6009 [6], виртуален инструмент, реализиран в LabVIEW [9], управляващ компютър. Блоковата схема на КИС е показана на фиг.1.

Фиг.1. Блокова схема на КИС

Измервателната система се използва за определяне на динамичните характеристики на електрическия разряд при комутация и контактното съпротивление на изследвания вакуумен прекъсвач в работен режим [6-8].

2.1 Обект на изследване

За изследване на разрядните процеси в режим на превключване във вакуумна среда са изследвани два вакуумни прекъсвача (релета) Jennings R1G и Jennings тип SPST модел R5C4201A21B10. Двата прекъсвача са с прозрачен стъклен корпус, позволяващ наблюдение на процесите при комутация.

а) б)

Фиг.2. Вакуумно реле R1G

На фиг.2-а и фиг.2-б е показан вакуумен прекъсвач R1G с модула за задвижване. Прекъсвача R1G е със следните обявени данни: максимално напрежение на изпитване 50 kV, обявен ток 120 A, обявено напрежение за задвижващия механизъм 115V.

Фиг.3. Вакуумно реле тип SPST модел R5C4201A21B10

На фиг.3 е представен вакуумен прекъсвач тип SPST модел R5C4201A21B10. Прекъсвачът е със следните обявени данни: максимално напрежение на прекъсвача 25 kV, обявен ток 100 A, обявено напрежение за задвижващия механизъм 115V.

2.2 Измервателно устройство NI USB-6009.

DAQ устройството служи за преобразуване на получените физически сигнали в цифров вид и се използва за комуникация с компютъра. Обработката на крайните резултати се извършва от софтуера, с помощта на компютър [6].

NI USB-6009 притежава следните характеристики:

- 8 аналогови входа с максималната скорост за обработка на резултатите 48 kS/s и входното съпротивление 144 kΩ.
- 2 аналогови изходи, които работят с максимална честота 150 Hz. Обхватът на изходния сигнал е от 0 до 5 V при съпротивление 50 Ω на изходите.
- 12 порта, които могат да се използват, като цифрови входове и изходи. Максималните нива на напрежение са от -0,5 до +5,8 V при максимална честотата на отчитане 5 MHz. Обхватът на входния сигнал може да е от -12 до +12V.
- Максималното напрежение на измерване между клема и земя ±30 V.

2.3 Специализиран мултимер

Използван е специализиран мултимер *Keysight 34461A*, (Фиг. 4).

а) б)

Фиг.4. Специализиран мултимер *Keysight 34461A*

Специализираният мултимер се свързва паралелно на ВДК и служи за определяне на контактното ѝ съпротивление в работни условия. Чрез включването му

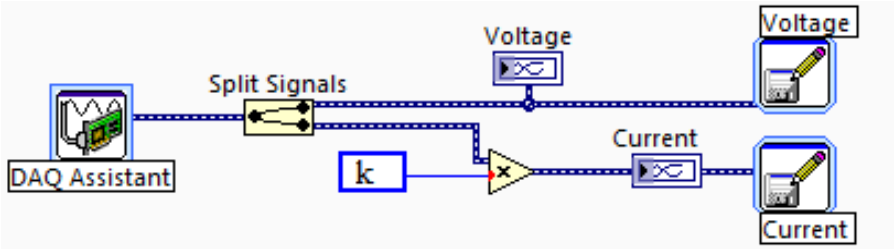
в системата за изпитване се дава възможност за преглед и управление на резултатите през специализиран софтуер с възможност за запис в реално време. Използваният мултимер има висока точност (0.06% AC) и скорост на измерване (1000 измервания в секунда), с което се повишава качеството на измервателния процес.

2.4 Виртуален инструмент

Виртуалният инструмент (ВИ) служи за обработка на получените резултати от специализираният мултимер. Блоковата схема на ВИ е показана на фиг.5.

Постъпилите сигнали за тока, напрежението и съпротивлението от измервателното устройство постъпват в блок „split signal" и се разделят на два сигнала за тока и сигнал за напрежението.

Всеки от сигналите постъпва във виртуален осцилоскоп за наблюдение, който визуализира сигнал във функция от времето. Коефициента *k* е добавен, заради използването на измервателен делител на напрежение във веригата. Получените резултати се записват чрез блокове за запис, който са отделни за тока и напрежението. Записаните резултати се използват за обработка на резултатите и построяване на графики за изследваните величини.

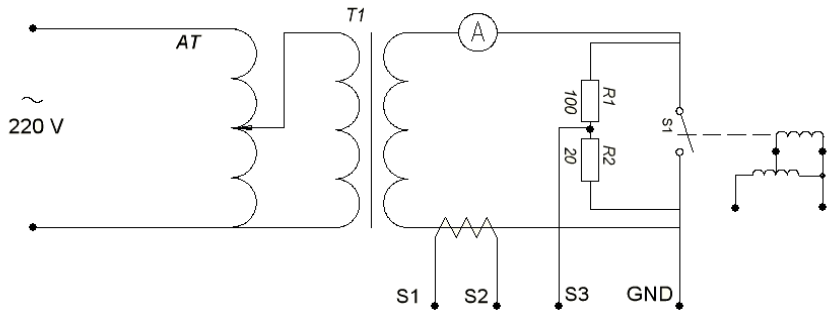


Фиг.5. Блокова схема на виртуалният инструмент

Тези резултати се визуализират като $I_Д = f(t)$, $U_Д = f(t)$ и $R_Д = f(t)$.

2.5 Електрическа схема

Принципната електрическа схема, използвана при изследванията е показан на фиг.6. В нея са включени автотрансформатор АТ, трансформатор T_1, измервателен делител на напрежение, измервателни токови клещи. Направените изследвания са при ток 120А, като стойността се наблюдава на включен към веригата контролен амперметър. За отчитане на динамичните стойности на напрежението и тока във вакуумното реле се използва ВИ изграден в LabVIEW. Измерените стойности на тока се предават към NI 6009 с помощта на амперклещи, на изводи S1 и S2.



Фиг.6. Схема на силовата верига на измервателната система

Заради ограничението на входното напрежение към NI USB-6009 е включен измервателен делител на напрежение, с отношение 1/5, реализиран със резисторите R_1 и R_2.

Изводите на които се получава сигнала за стойностите на напрежението от измервателния делител са S3 и GND. За управление на вакуумното реле (подаване на сигнал за извършване на комутация) се използва задвижване с електромагнит, който използва отделно захранване.

Фиг.7. Общ вид на реализираната измервателна система

На фиг.7 е показана завършената компютърна измервателна система, отговаряща на блоковата схема от фиг.1 и електрическата схема от фиг.6.

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ КИС

Част от резултатите получени чрез КИС са показани на фиг.8. Те представляват характеристиките на тока, напрежението и съпротивлението на електрическата дъга във вакуумен прекъсвач, модел R1G.

Маркирани са момента на запалване от началото на съответния полупериод ($t_з$), момента на загасване т.е. достигане на нулева стойност на тока във веригата ($t_г$), продължителността на горене ($\Delta t = t_г - t_з$), както и стойностите на тока (I_{max}) и напрежението (U_{max}) в момента на запалване на електрическата дъга.

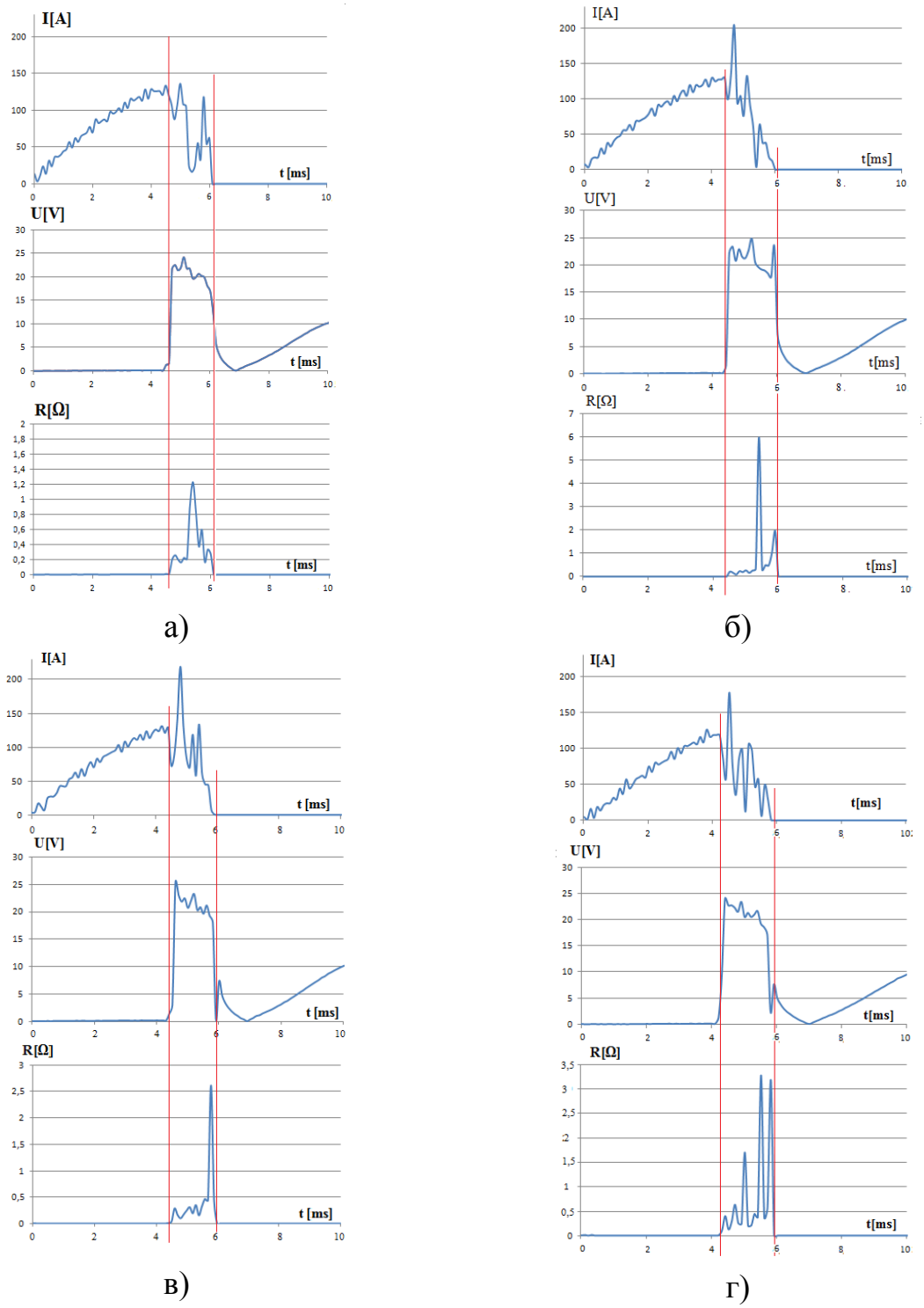
За показаните експериментални данни от фиг.8 – от а) до г), динамично засечените моментни стойности на маркираните параметри са съответно:

Фиг. 8 - а) $t_з$ = 4,5 ms и изгасва при $t_г$ = 6,1 ms, продължителност на горене Δt = 1,6 ms, отчетените максимални стойности за тока и напрежението както следва, I_{max}= 135,9 A и U_{max} =24,27 V;

Фиг. 8 - б) $t_з$ = 4,4 ms и изгасва при $t_г$ = 6 ms, Δt = 1,4 ms, отчетените максимални стойности за тока и напрежението както следва: I_{max}= 203,3 A и U_{max} =24,86 V;

Фиг. 8 - в) $t_з$ = 4,4 ms и изгасва при $t_г$ = 5,9 ms, Δt = 1,5 ms, отчетените максимални стойности за тока и напрежението както следва: I_{max}= 218,6 A и U_{max} =25,37 V;

Фиг. 8 - г) $t_з$ = 4,2 ms и изгасва при $t_г$ = 5,8 ms, Δt = 1,6 ms, отчетените максимални стойности за тока и напрежението както следва: I_{max}= 176,8 A и U_{max}= 23,95 V.



Фиг.8. Експериментални данни, получени от КИС

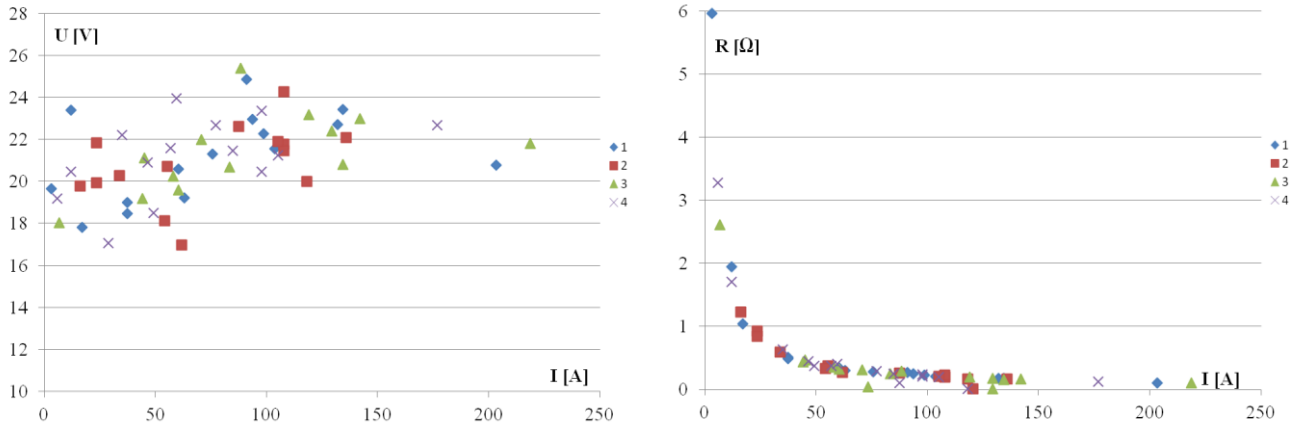
4. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

При всички проведени изпитвания се установи, че дъгата се запалва в интервалът от време от 4 до 6 ms. В този интервал се наблюдава ток на разряда до I_{max}= 125 A (максимален пик на тока достигащ до 220 A, фиг.8 - в), както и наличието на напрежение с амплитудна стойност около 25 V. При напрежения под 16 V не

наблюдавано формиране на комутационнен дъгов разряд с продължителност над 0,1 ms. Характеристиките за напрежението са с променлив характер поради индуктивния характер на веригата и наличието на паразитен капацитет. Колебливият процес на изменение на възстановяващото се напрежение при индуктивен товар се обуславя, от това че винаги паралелно на дъговия промеждутък има паразитни капацитети [10]. Честотата на колебанията му е значително по-голяма от промишлената честота, в случая тя е около 1 kHz.

От динамичните резултати за тока и напрежението на комутационния електрически разряд е определено и съответното съпротивление R_p, което е с интервал на изменение от всички изпитвания между 0,1 и 6 Ω.

На фиг.9 е показана обща волт-амперна характеристика от четирите опита и изменение на разрядното съпротивление в зависимост от тока $R_p=f(I)$.



а) V-A характеристика б) характеристика R=f(I)

Фиг.9. Обща характеристика

Въпреки забележимата дисперсия на резултатите, показани на волт-амперната характеристика (фиг.9-а), стойностите на съпротивлението формират изявен фронт (фиг.9-б), съгласуващ се с теоретичните модели в [4 и 11].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализирана е прецизна компютърна измервателна система за експериментално динамично изследване на ВДК.

Създадената компютърна система ще се използва за верификация и оценка на изчислителни модели на прекъсвачи и динамични разрядни характеристики.

Системата следва да бъде усъвършенствана с включването на филтри за намаляване на честотните колебания и прецизиране на получаваните резултати. Предвижда се и усъвършенстване на програмната реализация в *LabVIEW*.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор 142ПД0050-01, от Вътрешния конкурс на ТУ - София - 2014.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 60694:2003, ***Общи технически изисквания за стандартите за комутационни апарати за високо напрежение***

[2] БДС EN 62271-1:2008, ***Комутационни апарати за високо напрежение. Част 1: Общи технически изисквания***

[3] БДС EN 62271-100:2009, ***Комутационни апарати за високо напрежение. Част 100: Променливотокови прекъсвачи за високо напрежение***

[4] V. Terzija, H. Koglin, ***Modeling of Long Arc in Still Air and Arc Resistance Calculation***, IEEE Transactions on power delivery, vol.19, no.3,.2004, pp1012-1017

[5] S. Maximov, V. Venegas, J. guardado, E. Melgoza, ***A Method for Obtaining the Electric Arc Model Parameters for SF_6 Power Circuit Breakers***, Instituto Tecnológico de Morelia Av. Tecnológico 1500, Col. Lomas de Santiaguito,

[6] NI Corp., USB-6009, ***User guide and specifications***, NI Corporation, 2005

[7] Agilent Technologies, ***Impedance Measurement Handbook,*** Agilent Technologies, 2006

[8] F. Farmer***. Electrical Measurements in Practice***, Read Books, 2007

[9] G. Johnson, R. Jennings, ***LabVIEW Graphical Programming***, McGraw Hill Professional, 2006

[10] Т. Драгомиров, ***Стъпални регулатори за високо напрежение,*** *Hyundai Heavy Industries. Co-Bulgaria, 2011*

[11] R. Tanev, V. Mateev, I. Marinova, ***Electric arc discharge modeling***, V Научна Конференция "ЕФ 2013“ България, Созопол, 2-5 септември, 2013

Автори: Росен Танев, маг. инж., докторант, катедра „Електрически апарати“, Електротехнически Факултет, Технически университет – София, E-mail address: *rtanev@tu-sofia.bg*; Валентин Матеев, главен асистент д-р инж., катедра „Електрически апарати“, Електротехнически Факултет на Технически университет – София, E-mail address: *vmateev@tu-sofia.bg*; Илиана Маринова, проф. дтн. инж., катедра „Електрически апарати“, Електротехнически факултет на Технически университет – София, E-mail address: *iliana@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2015 г. **Рецензент**: проф. д-р Никола Трифонов