ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ
Том 67, книга 1, 2017

PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
Volume 67, Issue 1, 2017

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. дтн Евелина ПЕНЧЕВА
проф. дтн Младен ВЕЛЕВ
проф. д-р Бончо БОНЕВ
проф. д-р Иво МАЛАКОВ
проф. д-р Огнян НАКОВ

секретар-организатор

инж. Мая СТОЙЧЕВА

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 YACHEV
Prof. D.Sc. Keti PEEVA
Prof. D.Sc. Gantcho BOJILOV
Prof. D.Sc. Evelina PENCHEVA
Prof. D.Sc. Mladen VELEV
Prof. Ph.D. Boncho BONEV
Prof. Ph.D. Ivo MALAKOV
Prof. Ph.D. Ognyan NAKOV

Organizing Secretary

Eng. Maya STOYCHEVA

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’2016

VIII[та] КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2016“

12 - 15 септември 2016 г., Созопол, България

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

председател

проф.	дтн	**Иван**	**Ячев**

научен секретар

доц.	д-р	**Николай**	**Матанов**

членове

проф.	д-р	**Владимир**	**Лазаров**
проф.	д-р	**Захари**	**Иванов**
проф.	дтн	**Илиана**	**Маринова**
проф.	д-р	**Райна**	**Ценева**
проф.	д-р	**Иван**	**Иванов**
доц.	д-р	**Иван**	**Ангелов**
доц.	д-р	**Димитър**	**Богданов**
доц.	д-р	**Диляна**	**Господинова**
доц.	д-р	**Вълчан**	**Георгиев**
доц.	д-р	**Захари**	**Зарков**
доц.	д-р	**Иван**	**Костов**
доц.	д-р	**Валентин**	**Матеев**
доц.	д-р	**Петър**	**Наков**
доц.	д-р	**Пламен**	**Ризов**
доц.	д-р	**Димо**	**Стоилов**
доц.	д-р	**Рад**	**Станев**
доц.	д-р	**Калинка**	**Тодорова**
доц.	д-р	**Георги**	**Тодоров**
доц.	д-р	**Кръстьо**	**Хинов**
доц.	д-р	**Светлана**	**Цветкова**
доц.	д-р	**Ангел**	**Цолов**

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Forum
„DAYS OF SCIENCE OF TU-SOFIA“ Sozopol'2016

VIII-th CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING "EF 2016"

September 12 - 15, 2016, Sozopol, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEE

chair of PC

Prof. DSc **Ivan Yatchev**

scientific secretary

Assoc. Prof. PhD **Nikolay Matanov**

members of PC

Prof. PhD **Vladimir Lazarov**
Prof. PhD **Zahari Ivanov**
Prof. DSc **Iliana Marinova**
Prof. PhD **Raina Tzeneva**
Prof. PhD **Ivan Ivanov**
Assoc. Prof. PhD **Ivan Angelov**
Assoc. Prof. PhD **Dimitar Bogdanov**
Assoc. Prof. PhD **Dilyana Gospodinova**
Assoc. Prof. PhD **Vulchan Gueorgiev**
Assoc. Prof. PhD **Zahari Zarkov**
Assoc. Prof. PhD **Ivan Kostov**
Assoc. Prof. PhD **Valentin Mateev**
Assoc. Prof. PhD **Peter Nakov**
Assoc. Prof. PhD **Plamen Rizov**
Assoc. Prof. PhD **Dimo Stoilov**
Assoc. Prof. PhD **Rad Stanev**
Assoc. Prof. PhD **Kalinka Todorova**
Assoc. Prof. PhD **Georgi Todorov**
Assoc. Prof. PhD **Krastyo Hinov**
Assoc. Prof. PhD **Svetlana Tzvetkova**
Assoc. Prof. PhD **Angel Tzolov**

СЪДЪРЖАНИЕ том 67, книга 1 (2017)

1. **Валентин Колев, Анка Жеглова, Ивайло Лазаров** **15**
   Изследване на сегнетокерамика на основата на бариев титанат с легираща добавка калаен диоксид

2. **Никола Николов, Димо Стоилов** **23**
   Механично оразмеряване на електропроводи с високотемпературни проводници: част I - методологични основи

3. **Никола Николов, Димо Стоилов** **33**
   Механичното оразмеряване на електропроводи с високотемпературни проводници: част II - математичен модел

4. **Васил Захариев, Калоян Бурванов** **43**
   Оценка на механичното натоварване и свободния капацитет на стълбове за ниско напрежение

5. **Калоян Бурванов** **53**
   Възможности за намаляване на електродинамичните усилия в твърдите шини при неуспешно автоматично повторно включване

6. **Юлиан Рангелов, Николай Николаев, Йончо Каменов** **63**
   Проектиране на електрически схеми съобразно действащите стандарти

7. **Борислав Бойчев** **73**
   Поддръжка и откриване на повреди по електроенергийни съоръжения с дрон

8. **Лилия Антонова, Петър Наков, Виктор Райчев** **83**
   Стареене на електрическата изолация на въртящи електрически машини под действието на частични разряди

9. **Петър Наков, Валентин Колев, Ива Драганова, Виктор Райчев** **89**
   Технологични разходи от корона

10. **Иван Петров** **97**
    Изследване параметрите на „браунов газ“ генератор

11. **Иван Петров** **103**
    Изследване на фактора на мощност и мерки за подобряването му

12. **Иван Петров, Георги Димитров, Тодор Лалев** **113**
    Експериментално изследване на енергийната ефективност на метровлаковете на столичния метрополитен в реални експлоатационни условия

13. **Ивайло Стоянов, Васил Иванов, Теодор Илиев, Григор Михайлов, Елена Иванова** **123**
    Моделиране работата на силови електронни преобразуватели на електрическа енергия, използвани във фотоволтаични системи

14. **Ивайло Стоянов, Васил Иванов, Теодор Илиев, Григор Михайлов, Елена Иванова** **131**
    Оценка на електрическата енергия, получавана от фотоволтаична система с малка мощност

15. **Димо Стоилов, Величко Атанасов, Никола Николов, Иван Загорчев** 137
Проблеми на измерването на предаваната електроенергия между ЕСО-ЕАД и електроразпределителните дружества, както и през разпределителните мрежи

16. **Ангел Петлешков, Светлана Цветкова, Станислав Пешев** 143
Изследване на магнитна маса

17. **Николай Стоманярски, Светлана Цветкова, Ангел Петлешков, Ваня Петрова** 151
Изследване на електрообзавеждането на компресор

18. **Николай Матанов, Снежана Димитрова, Харалан Пенев** 161
Определяне структурата на източниците на реактивна мощност в електроснабдителни системи със собствени ТЕЦ

19. **Николай Матанов** 171
Изследване показателите на товаровите графици на металообработващо предприятие

20. **Вълчан Георгиев** 179
Заснемане на естествената осветеност в сгради

21. **Вълчан Георгиев** 185
Оптимизиране на режима на работа на вътрешни осветителни уредби, с отчитане на естествената осветеност

22. **Ива Петринска, Дилян Иванов, Милко Йовчев** 191
Технико-икономическа обосновка за избор на енерго-ефективно осветление на търговски обекти

23. **Ива Петринска, Дилян Иванов** 201
Специфика при определяне на заслепяващото действие на светодиодни офис осветители

24. **Дилян Иванов** 209
Определяне на заслепяването при дневно естествено осветление на помещения в обществени сгради

25. **Захари Иванов** 217
Разработване на устройства и начини за измерване на коефициентите на пропускане и на отражение на светлотехнически материали

26. **Захари Иванов, Виктор Манов, Васил Станков** 223
Приложение на светловодни системи за осветление на метростанции

27. **Цветомир Стоянов** 231
Електрически машини за хибридните автомобили

28. **Радослав Спасов, Пламен Ризов, Цветомир Стоянов, Виктор Захариев** 241
Определяне на загубите в ротора на синхронна машина с постоянни магнити за хибридни автомобили

29. **Пламен Ризов** 251
Приложение на метода на крайни елементи за изследване на двускоростен асинхронен двигател за средно напрежение

30. **Пламен Ризов** 261
Изследване на влиянието на формата на роторния полюс върху някои от параметрите на синхронна машина с постоянни магнити

31. **Емил Соколов** 271
Тягови двигатели на електромобили

32. **Десислав Тодоров** 281
Приложение на невронните мрежи за анализ на нормални и аварийни режими в електроенергийни обекти

33. **Десислав Тодоров** 291
Прилагане на модели на надеждност и невронни мрежи при анализ на нормални и аварийни режими в електроенергиен обект

34. **Райна Ценева, Янко Славчев, Емил Мечков, Валентин Матеев** 301
Преходен топлинен анализ на маслен разпределителен трансформатор с МКЕ

35. **Захари Зарков, Борис Демирков, Людмил Стоянов, Иван Бачев, Владимир Лазаров** 311
Състояние и развитие на съвременните ветроенергийни преобразувателни системи - част I

36. **Захари Зарков, Борис Демирков, Людмил Стоянов, Иван Бачев, Владимир Лазаров** 321
Състояние и развитие на съвременните ветроенергийни преобразувателни системи - част II

37. **Захари Зарков, Иван Бачев, Борис Демирков, Владимир Лазаров** 331
Експериментално изследване на алтернатори за приложения във ветроенергийни преобразувателни системи

38. **Захари Зарков, Иван Бачев, Борис Демирков, Владимир Лазаров** 341
Експериментално изследване на алтернатор с постоянни магнити

39. **Калинка Тодорова** 351
Изследване на влиянието на различни дефекти върху изходния сигнал на импулсен вихровотоков преобразувател

40. **Ганчо Божилов, Михо Михов** 357
Числен подход към нелинейните проблеми при синхронните машини

41. **Георги Тодоров, Божидар Стоев** 365
Конструктивни решения за отслабване на полето на синхронни двигатели с постоянни магнити

42. **Георги Тодоров, Божидар Стоев** 373
Определяне на параметри на синхронни двигатели с постоянни магнити от опити на празен ход и късо съединение

43. **Йоско Балабозов, Кръстьо Хинов, Данчо Венков, Иван Ячев** 381
Автоматизирана система за изследване на динамичните характеристики на електромагнити

44. **Симона Петракиева, Йордан Шопов, Захари Иванов** 389
Определяне на коефициента на пулсации на различни светлинни източници

45. **Захари Иванов** 399
Разработване и изследване на авариен и евакуационен осветител със светлодиоди

46. **Емилия Димитрова** 407
Система за дистанционно управление на влаковото движение

47. **Емилия Димитрова** 413
Архитектура на софтуера на система за дистанционно управление на влаковото движение

48. **Васил Димитров, Веселин Донков, Гюлек Неджиб** 419
Изработване и предварителни изпитания на прототип на линеен реактор

49. **Васил Димитров, Веселин Донков, Гюлек Неджиб** 425
Изпитания на прототип на линеен реактор с цел пускане в серийно производство

50. **Валентин Матеев, Мигленна Тодорова, Илиана Маринова** 431
Моделиране на електромагнитна система с тороидален феритен магнитопровод

51. **Валентин Матеев, Мигленна Тодорова, Илиана Маринова** 439
Моделиране на магнитното поле на магнитен съединител

52. **Любомир Секулов, Мартин Златков, Мартина Томчева** 449
Изследване и анализ на управлението на безчетков постояннотоков (BLDC) двигател

53. **Анелия Терзова, Валентин Матеев, Илиана Маринова** 459
Динамични характеристики на електромагнит с ферофлуид

54. **Иван Костов** 467
Проблеми при работа на електромагнитен контактор и сензор с магниточувствителни елементи

CONTENTS volume 67, Issue 1 (2017)

1. Valentin Kolev, Anka Zheglova, Ivaylo Lazarov 15
Investigation of Ferroceramics on The Basis Barium Titanate with an Alloyed Dopant Stannic Dioxide

2. Nikola Nikolov, Dimo Stoilov 23
Mechanical Dimensioning of Overhead Lines Using High Temperature Low Sag Conductors: Part I - Methodology Basis

3. Nikola Nikolov, Dimo Stoilov 33
Mechanical Dimensioning of Overhead Lines Using High Temperature Low Sag Conductors: Part II - Mathematical Model

4. Vasil Zahariev, Kaloyan Burvanov 43
Evaluation of the Mechanical Loading and Free Capacity of Low Voltage Poles

5. Kaloyan Burvano 53
Possibilities for Reduction of Electrodynamics Forces in Rigid Busbars in Case of Unsuccessful Automatic Reclosing

6. Yulian Rangelov, Nikolay Nikolaev, Yoncho Kamenov 63
Design of Electrical Circuits in Accordance with the Relevant Standards

7. Borislav Boychev 73
Maintenance and Detection of Damages in Electric Power Systems by Drones

8. Lilia Antonova, Petar Nakov, Victor Raychev 83
Aging of the Insulation of Rotating Electrical Machines From Impacts of Partial Discharges

9. Petar Nakov, Valentin Kolev, Iva Draganova, Victor Raychev 89
Power Losses from Corona Discharges

10. Ivan Petrov 97
Investigation of the Parameters of Braun Gas Generator

11. Ivan Petrov 103
Investigation of Power Factor and Ways of its Improvement

12. Ivan Petrov, Georgi Dimitrov, Todor Lalev 113
Experimental Research on the Energy Efficiency of the Underground Trains of Sofia Metro in Real Exploitation Conditions

13. Ivaylo Stoyanov, Vasil Ivanov, Teodor Iliev, Grigor Mihaylov, Elena Ivanova 123
Modelling the Operating Mode of Power Electronic Inverters of Electrical Energy, Used in PV Systems

14. Ivaylo Stoyanov, Vasil Ivanov, Teodor Iliev, Grigor Mihaylov, Elena Ivanova 131
Evaluation of Electrical Energy Production from a Low Power PV System

15. Dimo Stoilov, Velichko Atanasov, Nikola Nikolov, Ivan Zagorchev 137
Problems with Measurements of the Electrical Energy Transmitted from ESO-EAD to the Distribution Companies, As Well As in the Distribution Networks

16. Angel Petleshkov, Svetlana Tzvetkova, Stanislav Peshev 143
Study of Magnetic Table

17. Nikolai Stomaniarski, Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov, Vania Petrova 151
Study of the Electrical Equipment of Compressor

18. Nikolay Matanov, Snezhana Dimitrova, Haralan Penev 161
Determining the Structure of the Reactive Power Sources in the Electricity Supply Systems with Thermal Power Station

19. Nikolay Matanov 171
Study of Load Profiles of Metalworking Factory

20. Vultchan Gueorgiev 179
Registration of Natural Illuminance in Buildings

21. Vultchan Gueorgiev 185
Optimization of Internal Lighting Installation Regime According to Natural Illuminance

22. Iva Petrinska, Dilyan Ivanov, Milko Yovchev 191
Economic Appraisal for Energy Efficient Choice of Lighting for Trade Centers

23. Iva Petrinska, Dilyan Ivanov 201
Glare Estimation Methods of Led Office Luminaires

24. Dilyan Ivanov 209
Daylight Glare Estimation in Public Buildings

25. Zahari Ivanov 217
Development of Device and Method for Measuring Transmittance and Reflectance of Lighting Materials

26. Zahari Ivanov, Viktor Manov, Vasil Stankov 223
Application Light Guide Lighting Systems for Metro Stations

27. Tsvetomir Stoyanov 231
Electrical Machines Used in Hybrid Cars

28. Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Tsvetomir Stoyanov, Victor Zahariev 241
Rotor Iron Losses Determination in Permanent Magnet Synchronous Machine for Hybrid Cars

29. Plamen Rizov 151
Application of Finite Element Method (FEM) for Study of Two-Speed Asynchronous Induction Motor for Medium Voltage

30. Plamen Rizov 261
Study of the Influence of the Form of the Rotor Pole on the Some of the Parameters of Synchronous Machine with Permanent Magnets

31. Emil Sokolov 271
Electric Car Traction Motors

32. Desislav Todorov . . . 281
Review of Neural Networks Models for Fault Section Estimation in Electric Power Systems

33. Desislav Todorov . . . 291
Implementation of Reliability Analysis Models and Neural Networks in Fault Section Estimation

34. Raina Tzeneva, Yanko Slavtchev, Emil Mechkov, Valentin Mateev . . . 301
Transient Thermal Analysis of Oil-Immersed Distribution Transformer with FEM

35. Zahari Zarkov, Boris Demirkov, Ludmil Stoyanov, Ivan Bachev, Vladimir Lazarov . . . 311
State and Development of Modern Wind Energy Conversion Systems - part I

36. Zahari Zarkov, Boris Demirkov, Ludmil Stoyanov, Ivan Bachev, Vladimir Lazarov . . . 321
State and Development of Modern Wind Energy Conversion Systems - part II

37. Zahari Zarkov, Ivan Bachev, Boris Demirkov, Vladimir Lazarov . . . 331
Experimental Study of Alternators for Applications in Wind Energy Conversion Systems

38. Zahari Zarkov, Ivan Bachev, Boris Demirkov, Vladimir Lazarov . . . 341
Experimental Study of Alternator with Permanent Magnets

39. Kalinka Todorova . . . 351
Investigation of Different Faults Influence Over Output Signal from Pulsed Eddy Current Transducer

40. Gantcho Bojilov and Miho Mihov . . . 357
Numerical Approach to the Nonlinear Problems by Synchronous Machines

41. George Todorov, Bozhidar Stoev . . . 365
Rotor Design Solutions for Field-Weakening of Permanent Magnet Synchronous Machines

42. George Todorov, Bozhidar Stoev . . . 373
Parameter Determination of Permanent Magnet Synchronous Motors from Open Circuit and Short Circuit Tests

43. Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Dancho Venkov, Ivan Yatchev . . . 381
Automated System for Study of the Dynamic Characteristics of Electromagnets

44. Simona Petrakieva, Yordan Shopov, Zahari Ivanov . . . 389
Determining the Flicker Index for Different Light Sources

45. Zahari Ivanov . . . 399
The Development and Investigation Luminaire for Emergency Lighting with Leds

46. Emiliya Dimitrova 407
System for Remote Control of the Train Traffic

47. Emiliya Dimitrova 413
Software Architecture of a System for Remote Control of the Train Traffic

48. Vasil Dimitrov, Veselin Donkov, Gyulek Nedzhib 419
Construction and Preliminary Testing of a Prototype of a Line Reactor

49. Vasil Dimitrov, Veselin Donkov, Gyulek Nedzhib 425
Testings of a Prototype of a Line Reactor Aimed at Putting into Production

50. Valentin Mateev, Miglenna Todorova, Iliana Marinova 431
Computer Modelling of an Electromagnetic System with a Toroidal Ferrite Core

51. Valentin Mateev, Miglenna Todorova, Iliana Marinova 439
Magnetic Field Modelling of a Magnetic Gear

52. Lubomir Sekulov, Martin Zlatkov, Martina Tomcheva 449
Testing and Analysis of the Controls of Brushless DC Motor

53. Aneliya Terzova, Valentin Mateev, Iliana Marinova 459
Dynamic Characteristics of Actuator with Ferrofluid

54. Ivan Kostov 467
Problems at Work on Electrical Contactor and Magnemic-Sensitive Sensor Elements

Author's Index - Volume 67, Issue 1

	author	article		author	article
1.	Aneliya Terzova	459	30.	Ivaylo Lazarov	15
2.	Angel Petleshkov	143, 151	31.	Ivaylo Stoyanov	123, 131
3.	Anka Zheglova	15	32.	Kalinka Todorova	351
4.	Boris Demirkov	311, 321, 331, 341	33.	Kaloyan Burvano	53, 43
5.	Borislav Boychev	73	34.	Krastyo Hinov	381
6.	Bozhidar Stoev	365, 373	35.	Lilia Antonova	83
7.	Dancho Venkov	381	36.	Lubomir Sekulov	449
8.	Desislav Todorov	281, 291	37.	Ludmil Stoyanov	311, 321
9.	Dilyan Ivanov	191, 201, 209	38.	Martin Zlatkov	449
10.	Dimo Stoilov	23, 33, 137	39.	Martina Tomcheva	449
11.	Elena Ivanova	123, 131	40.	Miglenna Todorova	431, 439
12.	Emil Mechkov	301	41.	Miho Mihov	357
13.	Emil Sokolov	271	42.	Milko Yovchev	191
14.	Emiliya Dimitrova	407, 413	43.	Nikola Nikolov	23, 33, 137
15.	Gantcho Bojilov	357	44.	Nikolai Stomaniarski	151
16.	George Todorov	365, 373	45.	Nikolay Matanov	161, 171
17.	Georgi Dimitrov	113	46.	Nikolay Nikolaev,	63
18.	Grigor Mihaylov	123, 131	47.	Petar Nakov	83, 89
19.	Gyulek Nedzhib	419, 425	48.	Plamen Rizov	241, 251, 261
20.	Haralan Penev	161	49.	Radoslav Spasov	241
21.	Iliana Marinova	431, 439, 459	50.	Raina Tzeneva	301
22.	Iosko Balabozov	381	51.	Simona Petrakieva	389
23.	Iva Draganova	89	52.	Snezhana Dimitrova	161
24.	Iva Petrinska	191, 201	53.	Stanislav Peshev	143
25.	Ivan Bachev	311, 321, 331, 341	54.	Svetlana Tzvetkova	143, 151
26.	Ivan Kostov	467	55.	Teodor Iliev	123, 131
27.	Ivan Petrov	97, 105, 113	56.	Todor Lalev	113
28.	Ivan Yatchev	381	57.	Tsvetomir Stoyanov	231, 241
29.	Ivan Zagorchev	137	58.	Valentin Kolev	15, 89

	author	article		author	article
59.	Valentin Mateev	301, 431, 439, 459	69.	Viktor Manov	223
60.	Vania Petrova	151	70.	Vladimir Lazarov	311, 321, 331, 341
61.	Vasil Dimitrov	419, 425	71.	Vultchan Gueorgiev	179, 185
62.	Vasil Ivanov	123, 131	72.	Yanko Slavtchev	301
63.	Vasil Stankov	223	73.	Yoncho Kamenov	63
64.	Vasil Zahariev,	43	74.	Yordan Shopov	389
65.	Velichko Atanasov	137	75.	Yulian Rangelov	63
66.	Veselin Donkov	419, 425	76.	Zahari Ivanov	217, 223, 389, 399
67.	Victor Raychev	83, 89	77.	Zahari Zarkov	311, 321, 331, 341
68.	Victor Zahariev	241			

PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 67 Issue 1 (2017)

pages	articles	authors
470	54	77

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СЕГНЕТОКЕРАМИКА НА ОСНОВАТА НА БАРИЕВ ТИТАНАТ С ЛЕГИРАЩА ДОБАВКА КАЛАЕН ДИОКСИД

Валентин Колев, Анка Жеглова, Ивайло Лазаров

Резюме: *В работата е изследвано влиянието на начина на получаване на керамични материали от бариев титанат, легирани с 0.1mol% калаен диоксид SnO_2. Изследвани са зависимостите на относителното свиване, плътността и относителната диелектрична проницаемост от температурата на спичане. Получени са температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост при различните температури на спичане. Резултатите показват, че добавянето на калаен диоксид измества фазовия преход и температурата на Кюри в областта на стайната температура. За керамиката, получена чрез твърдофазна реакция се получават по – високи стойности за относителната диелектрична проницаемост в сравнение с тази, при която е използван синтезиран бариев титанат.*
Ключови думи: *бариев титанат, калаен диоксид, относителна диелектрична проницаемост*

INVESTIGATION OF FERROCERAMICS ON THE BASIS BARIUM TITANATE WITH AN ALLOYED DOPANT STANNIC DIOXIDE

Valentin Kolev, Anka Zheglova, Ivaylo Lazarov

Abstract: *In the work are investigated the influence of the method of preparation of ceramic materials from barium titanate doped with 0.1 mol% stannic dioxide SnO_2. The temperature dependences of the relative permittivity have been obtained at different temperatures of synthesized. The experimental results showed that adding stannic dioxide shifting the phase transition and Curie temperature in the region of room temperature. The higher values for the relative permittivity were obtained for the ceramic materials derived by solid state reaction.*
Keywords: *barium titanate, stannic dioxide, relative permittivity*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

С развитието на керамичните технологии и предлагането на пазара на синтезирани прахове от различни материали, като бариев титанат $BaTiO_3$, твърди разтвори на оловен титанат – оловен цирконат $PbTi_xZr_{1-x}O_3$, бариево – стронциев титанат $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ и др. се оформя ново направление в получаването на сегнетоелектрични керамични материали, а именно използване на синтезиран материал и управление на свойствата му чрез легиране преди спичане.

Предимството при използване на готов синтезиран бариев титанат $BaTiO_3$ е в това, че се избягва двойната температурна обработка и повторение на почти це-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

лия технологичен цикъл на керамичната технология. При първата температурна обработка се синтезира бариевият титанат с твърдофазна реакция най – често между бариев карбонат $BaCO_3$ и титанов диоксид TiO_2, а през следващата температурна обработка – протича същинското спичане на керамиката. Обикновено максималната температура на спичане превишава температурата на синтез с 150^oC – 250^oC. По време на спичането намалява броят и обемът на порите, повишава се плътността, изменя се концентрацията на дефекти в кристалните фази, пространствено същите се преразпределят, кристалите (зърната) нарастват, т.е. променят се размерите им, изравняват се остатъчните напрежения след пресуване и др.

Чистият синтезиран бариев титанат се характеризира с високи стойности на относителната диелектрична проницаемост ε_r, в близост до температурата на фазовия преход ($T_c = 120^oC$) [1].

Добавянето на някои съединения към бариевия титанат $BaTiO_3$ води до изменение на свойствата му, като се получават стойности за относителната диелектрична проницаемост $\varepsilon_r = 5000 – 18000$, при температури по-ниски от точката на Кюри [2]. За модифициране свойствата на бариевия титанат $BaTiO_3$ към него се добавят окиси на различни съединения, като оловен титанат $PbTiO_3$[3], стронциев титанат $SrTiO_3$[4], циркониев оксид [5, 6], двуниобиев петоокис Nb_2O_5 [7] и др. Високи стойности на относителната диелектрична проницаемост се получават при добяване на бариево – магнезиев ниобат $Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ [8] към бариев титанат. Легирането с редкоземни оксиди като Nb_2O_5 и Co_3O_4, чрез използване на разтвор на $ZnO – B_2O_3$ за подпомагане на синтеза, понижава температурата на синтез на бариевия титанат ($T_{синтез} < 950^oC$), като се получават добри стойности за относителната диелектрична проницаемост ($\varepsilon_r > 1700$ при $T_{стайна}$) и нисък тангенс на диелектричните загуби ($tg\delta < 1\%$) [9]. При добавянето на стъкла към чист бариев титанат се наблюдава междуслойна поляризация [10]. При добавянето на различни количества волфрамови йони ($x = 0$ и $x = 0.15$), като легираща добавка към $BaTiO_3$, се заместват част от титановите йони с волфрамови и се образува твърд разтвор със състав $BaTi_{1-x}W_xO_3$ [11], синтезиран чрез твърдофазните реакции, при температури на синтез – 1200, 1250, 1300^oC, с продължителност 2 часа и 5 часа. Относителната диелектрична проницаемост ε_r нараства с увеличаване на температурата и продължителността на спичане.

Цел на настоящата работа е изследване влиянието на калаения диоксид SnO_2 върху свойствата на керамика от бариев титанат и да се установи влиянието на начина на получаването й.

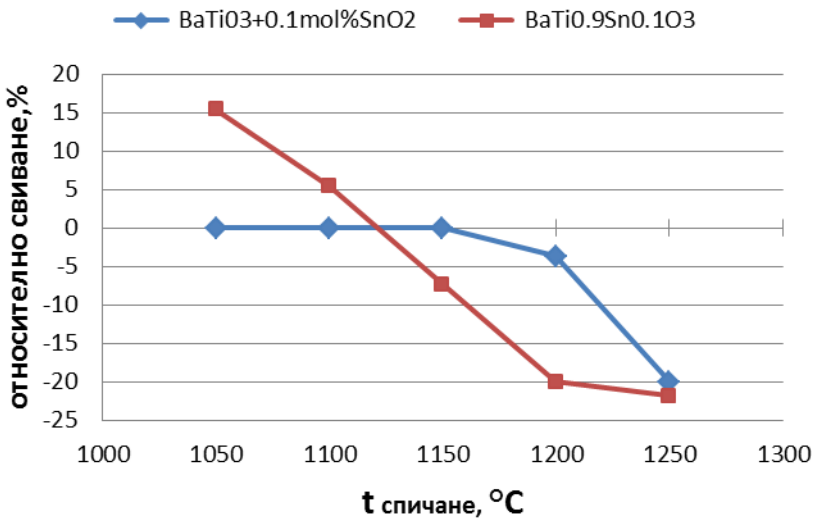
2. ИЗСЛЕДВАНИ СЪСТАВИ

В настоящата работа са изследвани два начина за получаване на легиран бариев титанат $BaTiO_3$. При първия начин, бариевият титанат е получен чрез твърдофазна реакция между бариев карбонат $BaCO_3$ и титанов диоксид TiO_2 с добавянето на 0.1 mol% калаен диоксид SnO_2, като легираща добавка. Получен е твърд разтвор от бариев титанат – бариев станат $BaTi_xSn_{1-x}O_3$, като 10% от титановите йони са заменени с калаени ($x = 0,9$). При втория начин е използван готов синтезиран бариев титанат $BaTiO_3$, като са добавени също 0.1 mol% калаен диоксид SnO_2 (0.9 mol%$BaTiO_3$ + 0.1 mol%SnO_2). Изследваните състави са спечени при

пет температури – 1050°C, 1100°C, 1150°C, 1200°C, 1250°C

3. ИЗСЛЕДВАНЕ ЗАВИСИМОСТИТЕ НА ПЛЪТНОСТТА И ОТНОСИТЕЛНОТО СВИВАНЕ ОТ ТЕМПЕРАТУРАТА НА СПИЧАНЕ.

На фиг.1. е показана изменението на относителното свиване от температурата на спичане.

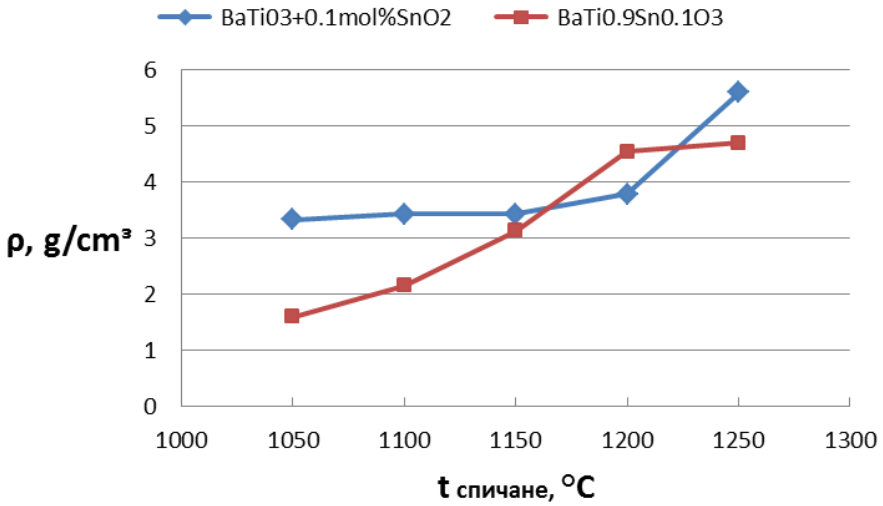


Фиг.1. Зависимост на относителното свиване от температурата на спичане за синтезиран $BaTiO_3$ с легираща добавка 0.1 mol% SnO_2 и $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$.

Най-голяма стойност за относителното свиване се получава при температура на спичане 1250°C. Керамиката, получена чрез твърдофазна реакция, има по-голямо свиване в сравнение с получената от синтезиран бариев титанат. При температури на спичане (1050°C ÷ 1150°C), керамиката от синтезиран бариев титанат няма изменение на относителното свиване. При температури на спичане от 1150°C до 1250°C се наблюдава свиване, което е показател за протичане на твърдофазната реакция. За материали, получени от предварително синтезиран бариев титанат има разширение при ниски температури на спичане. При увеличаване на температурата на спичане (1150°C ÷ 1250°C) получените образци се свиват.

Зависимостта на плътността от температурата на спичане за изследваните керамични материали е показана на фиг.2.

С повишаване на температурата на спичане, плътността нараства за всички материали. По-високи стойности на плътността са получени за образците от синтезиран бариев титанат. Образците, получени чрез твърдофазна реакция имат по-високи стойности на плътността при температури на спичане 1200°C.

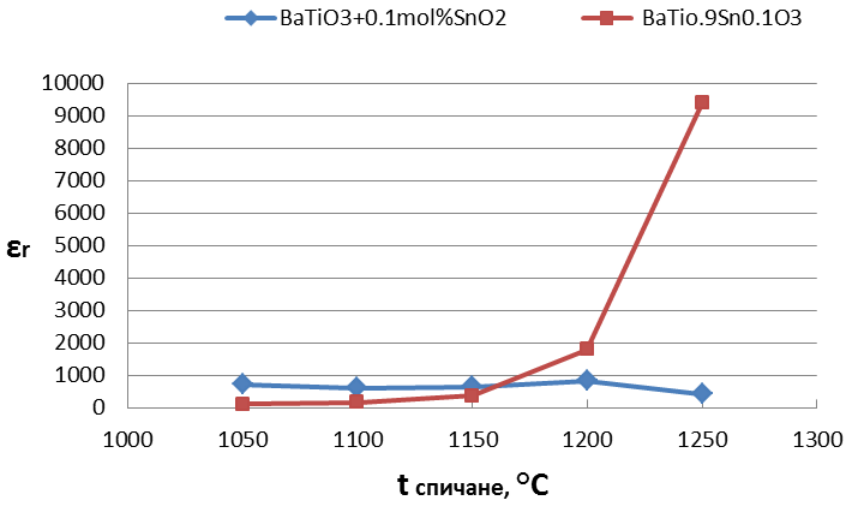


Фиг.2. Зависимост на плътността от температурата на спичане за синтезиран $BaTiO_3$ с легираща добавка 0.1 mol% SnO_2 и $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$.

4. ЗАВИСИМОСТ НА ОТНОСИТЕЛНАТА ДИЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИЦАЕМОСТ ОТ ТЕМПЕРАТУРАТА НА СПИЧАНЕ

Получената зависимост на относителната диелектрична проницаемост ε_r за изследваните керамични материали от температурата на спичане е показана на фиг.3.

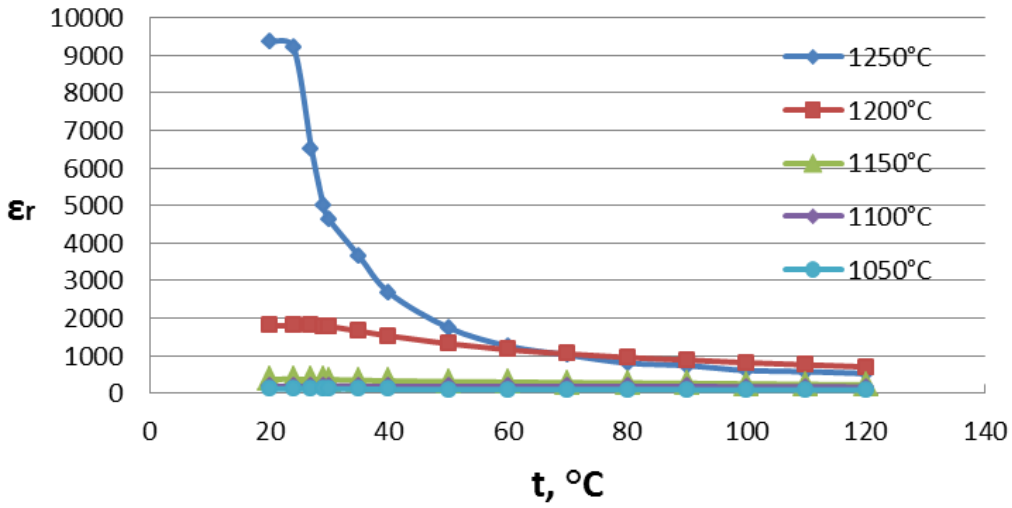
За материалите, получени от предварително синтезиран бариев титанат се наблюдава увеличаване на относителната диелектрична проницаемост с увеличаване температурата на спичане. При най-високата температура на спичане – 1250°C, относителната диелектрична проницаемост има най-висока стойност, като тя значително превишава стойностите за ε_r, получени при останалите температури на спичане. При използването на синтезиран бариев титанат не се наблюдава повишаване на относителната диелектрична проницаемост с повишаване температурата на спичане.



Фиг.3. Зависимост на относителната диелектрична проницаемост ε_r от температурата на спичане за синтезиран $BaTiO_3$ с легираща добавка 0.1 mol% SnO_2 и $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$.

5. ТЕМПЕРАТУРНИ ЗАВИСИМОСТИ НА ОТНОСИТЕЛНАТА ДИЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИЦАЕМОСТ

Изследвани са температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост за образци от състав $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$ (фиг.4).



Фиг.4. Температурни зависимости на относителната диелектрична проницаемост за керамика $BaTi_{0.9}Sn_{0.1}O_3$, спечени при различни температури.

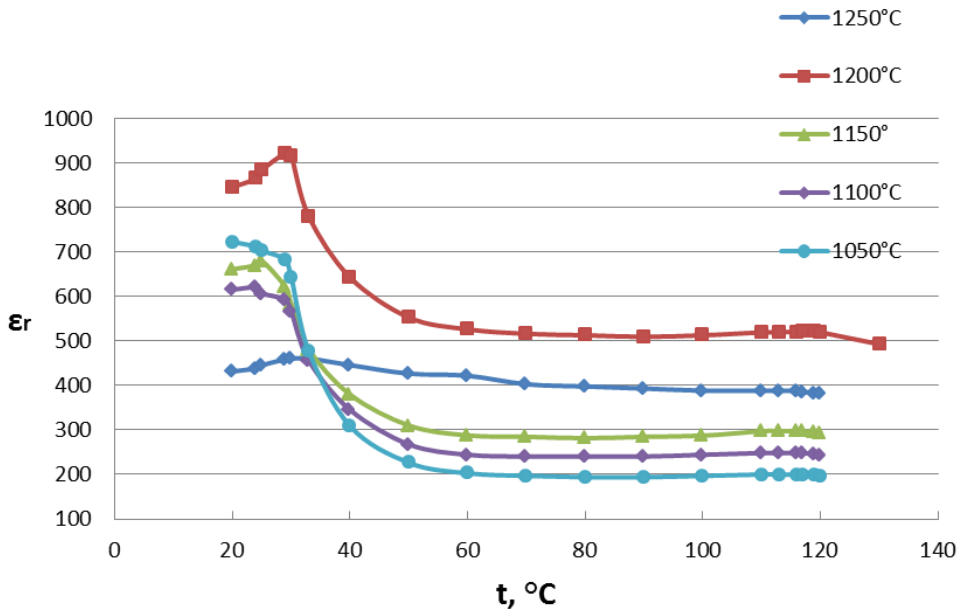
От температурните зависимости за относителната диелектрична проницаемост се вижда, че температурата на Кюри е в областта на стайната температура при всичките температури на спичане. При температура на спичане 1250°C, стойността на относителната дилелектрична проницаемост в точката на Кюри е най-висока, но не се наблюдава ясно изразен фазов преход. При останалите температури на спичане се наблюдава понижаване на стойностите за относителната диелектрична проницаемост с понижаване температурата на спичане.

Стойностите на температурата на Кюри са също в областта на стайната температура, като с понижаване на температурата на спичане фазовия преход се размива.

На фиг.5. са показни температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост за материали, получени от синтезиран бариев титанат, легиран с 0.1 mol% SnO_2.

От представените температурни зависимости за относителната диелектрична проницаемост се вижда, че най-високи стойности за ε_r се получават за материалите, спечени при температура 1200°C. Температурата на Кюри се намира в областта на стайната температура, като най-силно изразен фазов преход се наблюдава при температура на спичане 1200°C.

При останалите температури на спичане, стойностите на относителната диелектрична проницаемост са по- ниски и се наблюдава наличието на фазов преход.



Фиг.5. Температурни зависимости на относителната диелектрична проницаемост за материали 0.9mol%$BaTiO_3$ + 0.1 mol%SnO_2, спечени при различни температури.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получени и изследвани са сегнетокерамични материали на основата на предварително синтезиран бариев титанат и бариев титанат, получен чрез твърдофазна реакция между $BaCO_3$ и TiO_2 с добавяне на легираща добавка от 0.1 mol% калаен диоксид SnO_2. Целта е да се установи влиянието на легиращата добавка и технологията на получаване върху свойствата на кермиката. Могат да се направят следните изводи:

- За състава, получен чрез твърдофазна реакция, има разширение при ниски температури на спичане. При по-високи температури на спичане се наблюдава увеличаване на относителното свиване за керамичните материали, получени по двата начина;
- По-високи стойности на плътността има за керамиката, получена от синтезиран бариев титанат, с изключение на материалите, получени при температура на спичане 1200°C;
- Добавянето на 0.1 mol% калаен диоксид SnO_2 към бариев титанат измества фазовия преход и температурата на Кюри в областта на стайната температура;
- Максимум в температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост е получен за материалите от синтезиран бариев титанат $BaTiO_3$. Изключение се наблюдава за керамика, спечена при температура 1250°C;
- Стойностите на относителната диелектрична проницаемост за керамични материали, получени чрез твърдофазна реакция са 10 пъти по-високи в сравнение с тези на материалите, получени от легиран бариев титанат;
- Високите стойности за относителната диелектрична проницаемост за ке-

рамиката, получена по двата начина предполага приложението й като материали за кондензатори с високи номинални стойности на капацитета в областта на стайната температура;

ЛИТЕРАТУРА

[1] Priya Rani B. R., M. T. Sebastian, The effect of glass addition on the dielectric properties of barium strontium titanate, Journal Material Science, Vol.19,2008, pp.39-44.

[2] Richerson D. W. "Modern Ceramics Engineering", New York, Marcel Dekker Inc, 1992, p. 263.

[3] Yoshito I., S. Shimada, J. Takahashi, Michio Inagaki. Phase transition of BaTiO3–$Ba_{1-x}Pb_xTiO_3$ composite particles prepared by the molten salt method. Journal of Material Chemistry,Vol. 7,1997, pp.781-785.

[4] Thakur O.P., C. Prakash, D.K. Agrawal. Dielectric behavior of $Ba_{0.95}Sr_{0.05}TiO_3$ ceramics sintered by microwave, Materials Science and Engineering, Vol.96, 2002, pp.221-225.

[5] Ciomaga C. E., R. Calderone, M. T. Buscaglia, M.Viviani, V. Buscaglia, L.Mitoseriu, A.Stancu, P.Nanni, Relaxor properties of $Ba(Zr,Ti)O_3$ ceramics. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol.8, №3, 2006, pp.944-948

[6] Curecheriu L.P., R. Frunza, A. Ianculescu. Dielectric properties of the $BaTi_{0.85}Zr_{0.15}O_3$ ceramics prepared by different techniques. Journal Processing and Application of Ceramics, Vol.2. 2008, pp.81-88

[7] Burn I**.,** Flux-sintered $BaTiO_3$ dielectrics, Journal Material Science, Vol. 17, 1982, pp.1398-1408.

[8] Roongtaoa R.,W. C. Vittayakorna, Synthesis of barium titanate-barium magnesium niobate solid solution by a mixed-oxide method, Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 12, No. 4, 2011,pp. 398-401

[9] Ma C., X. H. Wang, R. Z. Chen, L. T. Li, Z. L. Gui. The structure and dielectric properties of low temperature sintering barium titanate based x7r ceramics. Journal Elektroceramics, Vol. 21, 242-245

[10] Zhang Y., X. R. Wang, X. Z. Song, T. Ma, Q. Zhang, Interfacial polarization arising from two contributions in glass added barium titanate ceramics. Journal Material Science, Vol.23,2012, pp.2301-2305

[11] Sheela D., S.Jain, A.K.Jha, Effect of Sintering Temperature on Dielectric Properties of Tugsten Doped Barium Titanate, Applications of Ferroelectrics, ISAF 2008, 17th IEEE International Symposium, Vol.1, 2008, pp.1-5.

Автори: Валентин Колев, доц. д-р, катедра „Електроенергетика", Електротехнически Факултет, Технически университет-София, E-mail address: *vkolev@tu-sofia.bg*; Анка Жеглова, доц. д-р, катедра „Основи на електротехниката и електроенергетиката", Технически университет-Габрово, E-mail address: *anyany@tugab.bg;* Ивайло Лазаров, ас. д-р, катедра „Основи на електротехниката и електроенергетиката", Технически университет-Габрово, E-mail address: *iv.lazarov@mail.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Петър Наков

МЕХАНИЧНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОПРОВОДИ С ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ ПРОВОДНИЦИ: ЧАСТ I - МЕТОДОЛОГИЧНИ ОСНОВИ

Никола Николов, Димо Стоилов

Резюме: *Статията има за цел да представи основите на методичен подход за механично оразмеряване на въздушни електропроводни линии при използването на високотемпературни нископровесни проводници. В тази първа част на статията са показани основните специфики в механичните характеристики на тези проводници. Съществено внимание е отделено на двата основни модела за определяне на температурата на проводника при неговата нормална работа – модел на CIGRE и модел на IEEE. Направен е кратък сравнителен обзор върху изчислителните процедури и са анализирани различията в резултатите, които се получават.*
Ключови думи: *високотемпературни нископровесни проводници, точка на пречупване, въздушни електропроводни линии.*

MECHANICAL DIMENSIONING OF OVERHEAD LINES USING HIGH TEMPERATURE LOW SAG CONDUCTORS: PART I - METHODOLOGY BASIS

Nikola Nikolov, Dimo Stoilov

Abstract: *This article presents the basis of methodology for mechanical design of overhead lines with high temperature low sag conductors. The specifics in the mechanical characteristics of these conductors are considered. An accent here is on the two main models for determining the temperature of the conductor in normal condition according to the two main models - CIGRE and IEEE. A comparative overview of computational procedures is made. The differences in results that models produce are analyzed.*
Keywords: *high temperature low sag conductors, knee point, overhead lines.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Тенденцията свързана с присъединяването на новопостроените мощности от възобновяеми източници (ВИ) на енергия към съществуващата преносна мрежа и увеличаващите се товари на потребителите води до необходимостта от увеличаване на преносната способност на електропроводите. Световната практика е наложила два основни подхода за решаване на този проблем – първият е чрез проектиране и изграждане на нови електропроводни линии. Вторият подход е чрез повишаване на преносната способност на съществуващата електрическа мрежа.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

За да бъде рентабилен този подход е необходим внимателен анализ на капиталните вложения и промените в експлоатационните разходи.
Трудностите, свързани с изграждането на нови въздушни електропроводни линии се увеличават все повече в развитите страни, като в много от случаите това дори се счита за невъзможно [1, 2]. От вземането на решение за проектиране и изграждане на преносен въздушен електропровод до въвеждането му е експлоатация е необходим период от приблизително 10 години [3].
Изграждането на нови електропроводни линии може да бъде допустимо решение, но не винаги то е оптимално при вече съществуваща електрическа мрежа. Възможни причини за това са големите начални инвестиции, нуждата от комплексни предпроектни и строителни работи, свързани с продължителен времеви интервал. Съществена пречка представлява получаването на право за придобиване на нови сервитути за съоръженията.
Увеличаването на преносната способност на въздушните електропроводни линии, чрез увеличаване на сечението на класическите неизолирани проводници задължително налага изменения по стълбовната конструкция, което отново е свързано с продължителни времеви интервали и големи инвестиции.
Повече от 80% от съществуващите въздушни електропроводни линии използват стомано-алуминиеви проводници, които могат да работят продължително при температури до около 100°C. Над тази температура, алуминиевите жички формиращи токопроводящия слой на комбинирания проводник започват да губят механичната си якост, като по този начин се застрашава сигурната работа на въздушния електропровод. Освен това при температура на проводника по-висока от определена при проектирането максимално допустима е много вероятно изолационните разстояния към земя и междуфазните такива да се нарушат поради увеличената стойност на провеса [4].
Изложеното довежда до извода, че трябва да се търсят решения, които да осигуряват използване на съществуващи трасета, като се увеличава преносната способност при максимално възможно съхраняване на вече изградените съоръжения. Една такава възможност представлява замяната на съществуващите класически проводници с нови, които да притежават следните качества:

- съизмеримо тегло спрямо класическите – за да се ограничи нуждата от усилване и/или замяната на съществуващите стълбове;
- сходна допустима сила на опън спрямо класическите проводници;
- да позволяват провеждането на по-голям електрически ток при същото ниво на напрежение;
- да имат близки механични показатели с класическите проводници.

Такива проводници съществуват [5, 6], като те са наречени високотемпературни нископровесни проводници - high temperature low sag conductors. Високотемпературните нископровесни проводници са такива, които са предназначени за продължителна работа при температура над 100°C или при работа в аварийни режими с температура над 150°C [7]. В [6], [8] и [9] са описани конструкции проводници, които могат да работят продължително при температури около 200°C – това са алуминиев проводник с композитно ядро (Aluminum Composite Conductor Core) и композитно усилен алуминиев проводник (Aluminum Conduc-

tor Composite Reinforced). Високотемпературните нископровесни проводници представляват комбинирани концентрични многожични проводници с два или повече слоя. Външният слой се състои от трапецовидно оформени или с кръгло сечение жички от алуминиеви сплави, обграждащи стоманени или композитни нишки, формиращи ядрото на проводника.

Характерна особеност при работата на тези проводници се явява тяхното механично поведение – при ниска температура на проводника (обикновено под 70ºC), неговото механично поведение е като на класически комбиниран проводник, като действащите върху него сили са разпределени между външните и вътрешните слоеве. Интересно е поведението на проводника при висока температура (над 70ºC) – тогава поради отвръщането на алуминиевата сплав, съставяща външните слоеве на проводника, силите които въздействат се поемат изцяло от ядрото. Именно тази особеност налага допълването и развитието на някои изчислителни процедури при механичното оразмеряване на въздушните електропроводни линии.

2. ИЗХОДНА ИНФОРМАЦИЯ ЗА ПРИЛАГАНЕТО НА ПОДХОДА ЗА МЕХАНИЧНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОПРОВОДИ С ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ НИСКОПРОВЕСНИ ПРОВОДНИЦИ

Преди етапа на електромеханичното оразмеряване на даден въздушен електропровод е необходимо да бъде избран типа проводник, с който ще се работи. Изборът на конкретен проводник е комплексна задача, особено при затворени мрежи, която изисква и режимни изчисления и оценки.

В контекста на разглежданата задача, съществено условие при избора на проводника по отношение на механичното оразмеряване е той да има сходни показатели с проводника, който се подменя. В табл.1 са дадени електромеханичните показатели на различни по тип проводници.

Таблица 1

№	Параметър		AC-185	ACSS 218	GZTACSR 218	ZTACIR 19,04	ACCC 18,29	ACCR 340
1	Сечение, mm^2	Токопроводяща част	181,14	188,09	190,50	174,30	223,00	172,00
		Ядро на проводника	34,36	30,36	27,86	40,70	28,00	28,00
		Общо	214,40	218,45	218,36	215	251	200
2	Диаметър, mm		19,00	17,85	19,10	19,04	18,29	18,40
3	Максимална стойност на тока, A		510	1059	1020	906	975	942
4	Тегло на проводника, kg/km		769,00	761,00	747,50	761,00	669,70	562,50
5	Разрушаваща сила, N		65057	66400	74440	69210	72900	61830
6	Ел. съпротивление при 20°C, Ω/km		0,16	0,1527	0,1544	0,158	0,1254	0,1596
7	Коефициент на линейно разширение, $*10^{-6}$ K^{-1}	Под точката на пречупване	18,86	11,80	19,80	15,80	18,70	16,80
		Над точката на пречупване	--		11,90	3,50	1,61	6,30
8	Цена, отнесена към AC-185	--	1	1,1-1,5	1,8-2,0	3,5	5-7	10

Забележка: Цените на арматурите за съответните проводници (носещи клеми, опъвателни клеми, клеми за възстановяване на цялостта, виброгасители, съединителни клеми и други) са включени в ред №8 от таблицата.

Изходните условия (данни) при оразмеряването на новите проводници, чието отразяване осигурява надеждната работа на новопроектирания електропровод с високотемпературни нископровесни проводници и които са били използвани

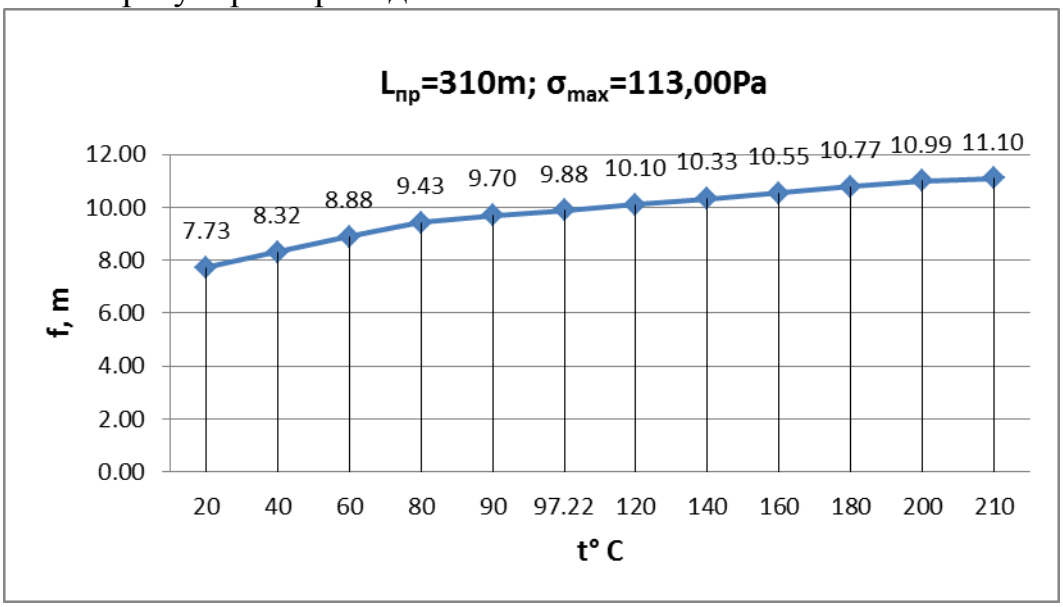
при проектирането на съществуващия електропровод с класически проводници са:

- Климатичните условия на които е подложена електропроводната линия. Предвид факта, че се реконструира съществуващ електропровод, се очаква да има достатъчно представителни данни за аварийността на въздушната линия вследствие на атмосферните влияния;
- Съществуваща стълбовна линия. Разпределението и конструкцията на стълбовете, изграждащи електропроводната линия са известни. Тяхното техническо състояние може да бъде анализирано;
- Реализираните опъвателни полета, формиращи електропроводната линия;
- Специфични особености по трасето на съществуващия електропровод;
- Пресичания на въздушната линия с други инфраструктурни съоръжения. Съществено значение по отношение на приложимостта на даден тип високотемпературен проводник имат пресичаните отдолу съоръжения.

3. ОПИСАНИЕ НА ПОДХОДА ЗА МЕХАНИЧНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОПРОВОДИ С ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ НИСКОПРОВЕСНИ ПРОВОДНИЦИ

Обръщаме основно внимание върху различията и допълненията към класическите постановки и възприятия свързани с оразмеряването на високотемпературни проводници.

Както беше описано и по-горе, съществено при механичното оразмеряване на тези нови конструкции проводници е тяхното поведение под и над определена стойност на температурата при която работят. В характеристиката, която показва как се изменя провеса на проводника в зависимост от изменението на температурата (фиг. 1) съществува характерна точка, т. нар. точка на пречупване на проводника (knee point). Следва да се подчертае, че тази точка на пречупване на проводниците не е постоянна за даден тип проводник. Тя се изменя в зависимост от условията при регулиране на проводника – тоест от напрежението на опън с което е регулиран проводника.



Фиг.1. Зависимост на провеса от температурата - точката на пречупване на проводника в този случай е при температура 97,22°C.

При класическите методи за оразмеряване на въздушни електропроводни линии се определя/приема температурата на околната среда при която се очаква да работи електропровода – това може да бъде максимална температура, минимална температура, средногодишна температура и други. Повишаването на температурата на проводника от протичането на електрически ток се пренебрегва – приема се температура на проводника еднаква с тази на средата, в която е разположен. Поради по-високите предавани токове, съответно много по-големите топлинни мощности отделяни в проводника (пропорционални на квадрата на тока), преди настъпване на топлинното равновесие тези проводници може да се нагреят до температури няколкократно надвишаващи температурата на околната среда. Затова приемането, че високотемпературните нископровесни проводници работят при температура на околната среда не е допустимо.

Първото съществено допълнение, което трябва да се отчете при оразмеряването на тези нови проводници, е именно определянето на температурата на самия проводник в зависимост от максималната стойност на тока протичащ през него и климатичните условия, при които ще работи даден електропровод.

Понятието допустим ток се появява като резултат от множество изследвания за възможностите за увеличаване на преносната способност на електропроводите и се дефинира като максималния ток, който може да издържи даден проводник без да се влошат неговите електромеханични показатели [10].

Съществуват множество модели използвани за определянето на температурата на проводника – модел предлаган от Морган (V.T. Morgan), Хаус и Тътъл (House and Tuttle), този на Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE) описан в Brochure 207 (по-късно заменен от описания в Brochure 601), модел на Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) - Standard 738-2006 (заменен от стандарт 738-2012) и други [11, 12, 13, 14, 15]. Допълнително голяма част от операторите на преносните мрежи са разработили собствени модели, които в основата си използват гореизброените [16].

Два са математическите модели за определяне на температурата на проводниците при тяхната нормална работа, които са намерили най-широко приложение – това са моделът представен в Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE) Brochure 207 и моделът представен в Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) - Standard 738-2006. И двата математически модела се основават на оценката на температурата на проводника, при която той е в равновесно топлинно състояние – тоест топлината отделена в проводника се отдава/разсейва изцяло в околната среда и не предизвиква повишаване на неговата температура.

И двата модела позволяват определянето на температурата на проводниците като статична (при разглеждане на моментни режими) и като динамично променяща се величина (при разглеждане на режими в течение на определен времеви интервал). Статичното определяне на температурата, използващо най-тежкото възможно съчетание на факторите, които я определят и прилагано за целите на механичното оразмеряване, води до ниска ефективност на работа на електрическите мрежи [10, 16].

Уравнението на топлинния баланс се използва за определянето на топлинното натоварване на проводниците в процеса на планиране и проектиране, но може да се използва и за определянето на топлинното натоварване и работната температура на съществуващите електропроводни линии. В допълнение към определянето на работната температура на проводниците в оперативни условия, уравнението за топлинния баланс може да се използва за намирането на нови проектни допустими граници на съществуващите електропроводи и подобрено използване на допустимото им топлинно натоварване. И при двата математически модела (на IEEE и CIGRE) за уравнението за топлинния баланс се отчитат атмосферните условия, които влияят върху топлинното натоварване на проводниците.

И в двата модела са предложени по два начина за определяне на температурата на проводника на въздушна електропроводна линия. Първият начин е чрез използването на независими от времето постоянни условия, докато при втория начин температурата се определя чрез динамичен баланс отчитащ температурната инертност на проводника. Дават се аналитични зависимости на всеки от пояснените компоненти участващи в балансите (1) и (4), чрез които всъщност се определя температурата на проводника.

Уравнението за топлинния баланс на проводника според CIGRE е:

$$P_j + P_M + P_S + P_i = P_C + P_r + P_W \quad (1)$$

където P_j е мощността на нагряване от ефекта на Джаул. Дължи се на съпротивлението на проводниците;

P_M – нагряване вследствие на магнетизъм. Предизвиква се от циркулиращите магнитни потоци, индуцираните вихрови токове и хистерезис;

P_S – слънчево нагряване;

P_i – нагряване от ефект „корона“. В голяма част от случаите нагряването от ефекта „корона“ се пренебрегва;

P_C – охлаждане чрез конвекция. Дължи се на изместването на горещите въздушни маси и заместването им с по-тежки студени;

P_r – охлаждане чрез лъчение. Представлява малка част от общата топлинна загуба;

P_W – охлаждане чрез изпарение. Обикновено се пренебрегва. Стойностите на охлаждането чрез изпарение се изменят в зависимост от влажността по повърхността на проводника.

Уравнението за топлинния баланс използвано от IEEE пренебрегва три от елементите използвани при CIGRE – това са нагряването от магнетизъм, нагряването от „корона“ и охлаждането чрез изпарение:

$$P_j + P_S = P_C + P_r \quad (2)$$

При отделни случай влиянието на ефекта „корона“ се премахва от уравнението за топлинен баланс на CIGRE. При проектиране на електропроводите в етапа на избор на проводниците, специално внимание се обръща на типа проводник,

който ще минимизира явлението „корона“. Нагряването от ефекта „корона“ се наблюдава когато напрегнатостта на електрическото поле около проводниците превишава критичната. Въздухът заобикалящ повърхността на проводника се йонизира, което повишава триенето, а от там и нагряването на въздушните молекули които са в близост до тази повърхност. В резултат на това се получава топлинно разсейване известно като нагряване от ефект „корона“. Най-силно влияние ефекта „корона“ има при влажно време. По тази причина страната на нагряване от уравнението за топлинен баланс по модела на CIGRE може да се редуцира до:

$$\text{нагряване} = P_j + P_M + P_S \quad (3)$$

За непрекъснато и динамично отчитане на измененията на температурата на проводника се използва следната форма на уравнението за топлинния баланс:

$$m.c.\frac{dT_c}{dt} = P_j + P_M + P_S + P_i - P_c - P_r - P_w \quad (4),$$

Където m е теглото на проводника за единица дължина, c е специфичният топлинен капацитет на проводника и T_c е теоретичната му температура.
И двата модела – този на CIGRE и на IEEE използват различни емпирични зависимости на компонентите на балансите (1) или (4), което означава, че ще съществува разлика в получените резултати при едни и същи изходни условия [17].
Сходствата и различията между моделите на CIGRE и IEEE са [10]:

- И двата модела отчитат влиянието на атмосферните условия включващи посока и скорост на вятъра, температура на околната среда, слънчевата радиация. Използват различни математически зависимости (формули) за изчислението на температурата;
- Нагряването от слънцето се изчислява като се определя положението на слънцето в зависимост от часа и деня в годината. CIGRE използва по-сложен алгоритъм включващ пряката, дифузната и отразената радиации;
- CIGRE използва корелации на Морган (Morgan) основани на числото на Нуселт (Nusselt) при определянето на охлаждането чрез конвекция, докато IEEE използва корелации на МакАдамс (McAdams) основани на числото на Рейнолдс (Reynolds). В [16] се намира потвърждение за описаните различия между моделите. Показани са съответни различия и при получените резултати. Те се дължат на охлаждането чрез конвекция и нагряването от слънцето. Показани са изследвания при изменение на скоростта на вятъра от 0,5 m/s до 15 m/s . Резултатите илюстрират съществена разлика между двата модела при високи скорости. При ниски скорости на вятъра (по-малки от 3,5 m/s) различията в резултатите са много малки. Съществено е и влиянието, което има ъгъла на атака на вятъра върху температурата на проводника (от там и върху допустимия ток). Проведени са изследвания при скорости на вятъра от 0,5, 4 и 8 m/s. При по-големи ъгли разликите в резултатите са значително по-малки при ниски скорости на вятъра. Това е така, понеже използваният множител на ъгъла, е сходен за двата модела при ъгли между 0° и 52°.

Диаметърът на проводниците също оказва влияние върху допустимото токово натоварване. И при двата стандарта охлаждането чрез конвекция, охлаждането чрез лъчение и загубите на мощност са пряко свързани с него. Спрямо определяното токово натоварване на проводниците разликите между двата модела са малки.

Температурата на околната среда се отразява съществено върху охлаждането чрез конвекция. Разликата между температурата на околната среда и тази на проводника дава изчислителен коефициент, който се използва при определянето на числото на Нуселт. Температурата на околната среда влияе пряко и върху топлоотдаването. Топлината се измества от горещи зони към по-студени такива, следователно по-ниските температури на околната среда ще водят до по-добро охлаждане.

Както вече бе казано, съществуват различия и при определянето на нагряването от слънцето. При модела на CIGRE се използват две формули за тази цел. Тяхното прилагане зависи от наличната информация. Основната формула при модела на CIGRE може да се използва с достатъчна точност когато има информация за глобалната слънчева радиация. За разлика от модела на IEEE основната формула на CIGRE за определянето на слънчевото нагряване не отчита ефективния ъгъл на падане на слънчевите лъчи. Но тази особеност влияе много слабо. Когато се използва по-сложната формула на CIGRE за определянето на нагряването от слънцето се получават по-съществено различни стойности между двата модела.

Надморската височина, на която ще работи проводника, също оказва влияние върху допустимото токово натоварване. Тя влияе пряко върху два основни параметъра. С повишаването й се намалява относителната плътност на въздуха, което от своя страна има отрицателен ефект върху охлаждането чрез конвекция. С повишаването на надморската височина ефекта от слънчевата радиация също се повишава, вследствие на повишената стойност на множителя на слънчевото нагряване. Разликите в резултатите при двата модела не са големи, но се констатират.

Определянето на температурата на проводника и по двата модела представлява итеративна процедура. С избраното начално приближение на температурата се изчисляват всички участващи параметри в уравнението за топлинен баланс – най-често те включват нагряването от ефекта на Джаул, нагряването вследствие на магнетизъм (в много от източниците се пренебрегва, както и при модела на IEEE), слънчево нагряване, охлаждането чрез конвекция и охлаждането чрез лъчение. Впоследствие се извършва итеративно уточняване на температурата докато се постигне баланс между отделената в проводника и отдадената от него топлина.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Karabay S., ACSS/TW aerial high-temperature bare conductors as a remedy for increasing transmission line capacity and determination of processing parameters for manufacturing, ELSEVIER, vol. 30, p-p 816-825, 2009.

[2] Geary R., Condon T., Kavanagh T., Armstrong O., Doyle J., Introduction of high temperature low sag conductors to the Irish transmission grid , CIGRE, B2-104, 2012.

[3] Doyle J., Luain C., Coffey K., Use of reduced visual impact designs on 220kV and 400kV overhead lines in Irland and their integration into the landscape, CIGRE, Session 2010.

[4] Chan J., Clairmont B., Rueger D., Childs D., Karki S., Demonstration of advanced conductors for overhead transmission lines, Electric power research institute, 2008.

[5] Колев В., Изследване на механичните характеристики на високо температурни неизолирани проводници с нисък провес, IV Научна конференция ЕФ 2012, том 1, Созопол.

[6] Колев В., Матеев К., Дачев Д., Райчев В., Технико-икономическо изследване на възможностите за прилагане на проводници с повишена преносна способност в електропреносната мрежа на България, по дог. с НЕК ЕАД, 2012г.

[7] Mateescu E., Florea G., Gal A., Matea C., Reconductoring using HTLS conductors. Case study for a 220 kV Double Circuit Transmission LINE in Romania, 978-1-45770567-0/11/$26.00 ©2011 IEEE.

[8] Exposito A., Santos J., Romero P., Planning and operational issues arising from the widespread use of HTLS conductors, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, № 4, стр. 1446-1455, 2007.

[9] Jones W., More heat, less sag, IEEE Spectrum, vol. 43, стр. 16-18, 2006.

[10] Arroyo A., Castro P., Martinez R., Manana M., Madrazo A., Lecuna R., Gonzalez A., Comparison between IEEE and CIGRE thermal behavior standards and measured temperature on a 132-kV overhead power line, Energies, vol. 8, стр.13660-13671, 2015.

[11] IEEE Std. 738-2012 IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors.

[12] CIGRE WG 22.12 Thermal behavior of overhead conductors, Tech. Brochure 207, 2002.

[13] Working group SC 22.12 CIGRE, The thermal behavior of overhead conductors Section 1 and 2 Mathematical model for evaluation of conductor temperature in the steady state and the application thereof, Electra № 144, стр. 107-125, 1992.

[14] Morgan V., The thermal rating of overhead-line conductors Part 1. The steady-state thermal model, Electric power systems research, vol. 5, стр. 119-139, 1982.

[15] Morgan V., Rating of bare overhead conductors for continuous currents, Proceedings of IEEE, vol. 114, №10, стр. 1473-1482, 1967.

[16] Simms M., Meegahapola L., Comparative analysis of dynamic line rating models and feasibility to minimize energy losses in wind rich power networks, Energy conversion and management, vol. 75, стр. 11-20, 2013.

[17] Beryozkina S., Sauhats A., Research and simulation of overhead power line up-rating using advanced conductors, 56th International scientific conference on power and electrical engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2015

Автори: Никола Неделчев Николов, маг. инж., асистент, катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *n_nikolov@tu-sofia.bg*; Димо Георгиев Стоилов, доц. д-р инж., катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Петър Наков

МЕХАНИЧНОТО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОПРОВОДИ С ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ ПРОВОДНИЦИ: ЧАСТ II - МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ

Никола Николов, Димо Стоилов

Резюме: *Статията има за цел да представи основите на методичен подход за механично оразмеряване на въздушни електропроводни линии при използването на високотемпературни нископровесни проводници. Във втората част са предложени модификации на математическия модел и изчислителните процедури, свързани с отчитане на спецификите в механичните характеристики на тези проводници. Показани са примери с анализирани резултати.*
Ключови думи: *високотемпературни нископровесни проводници, точка на пречупване, въздушни електропроводни линии.*

MECHANICAL DIMENSIONING OF OVERHEAD LINES USING HIGH TEMPERATURE LOW SAG CONDUCTORS: PART II - MATHEMATICAL MODEL

Nikola Nikolov, Dimo Stoilov

Abstract: *This article presents the basis of methodology for mechanical design of overhead lines with high temperature low sag conductors. In this second part the modifications in the mathematical model and the computational procedures are proposed, accounting for the specifics in the mechanical characteristics of these conductors. Some examples are presented and the results are analyzed.*
Keywords: *high temperature low sag conductors, knee point, overhead power lines*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Отчитайки трудностите свързани с изграждането на нови въздушни електропроводни линии, естественото повишаване на електрическите товари и резките изменения на електрическите потоци в резултат от въвеждането на свободния пазар за електрическа енергия, се получават потокоразпределения, при които определени въздушни електропроводи достигат допустимите си температурни граници, т.е. проводниците се нагряват до максимална работна температура.
Понякога ограничителни за натоварването на електропровод могат да бъдат и други фактори – наличие на комуникационни бобини, трансформатори, разединители, прекъсвачи и защитни устройства. Правни или договорни ограничения също влияят върху експлоатационните практики. Нашето следващо изложение е съсредоточено върху допустимото токово натоварване на проводниците произ-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

тичащо от допустимата работна температура и съответния провес на проводниците, който не трябва да нарушава предварително зададени вертикални габарити.

Всяко експлоатационно дружество определя максималната работна температура на проводниците, отчитайки няколко фактора. Това са:

- Необходимия вертикален габарит на въздушната линия спрямо земята и други съоръжения;
- Способността на даден тип проводник да работи при съответна температура без това да води до намаляване на допустимото напрежение на опън;
- Способността на даден тип проводник да работи при съответна температура без това да нарушава корозионната устойчивост на проводниците;
- Съвместимост/съгласуваност между допустимата температура на проводника и допустимата температура на арматурата и изолаторите.

Нормативните документи в областта на електроенергетиката в различните държави определят минималният габарит към земя и други съоръжения. В някой случаи операторите на преносните и разпределителни дружества може да заложат по-големи габарити от тези предвидени като минимални в нормативната уредба. Предвидената максимална работна температура на проводниците трябва да бъде такава, че да отговаря на проектните и работни допускания за настъпването на максимален провес [3].

Допустимото напрежение на опън на проводника се залага в съответните стандарти и нормативни документи. То може да се задава и от специалистите в преносните и разпределителните дружества. Изискванията към допустимото напрежение на опън се получават чрез подходящ коефициент спрямо разрушаващото напрежение на опън. Работата на многожичните проводници с висока температура намалява якостта им на опън, като по този начин е възможно да се нарушат изискванията на експлоатационните предприятия или изискванията заложени в нормативната уредба.

Новите конструкции високотемпературни нископровесни проводници са способни да работят продължително при температури между 150°C и 250°C, в зависимост от конкретната конструкция, без да губят якостта си на опън. Те заменят класическите стоманоалуминиеви проводници при съществуващи електропроводни линии, като това е съпроводено с минимално изменение по съществуващите стълбове [4].

В тази втора част на статията представяме модифицираните математически зависимости, свързани с оразмеряването на въздушни електропроводи при използване на високотемпературни нископровесни проводници. Подходът е илюстриран с блок схема и пример.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ ПРИ МЕХАНИЧНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОПРОВОДИ С ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ НИСКОПРОВЕСНИ ПРОВОДНИЦИ

В представения модел основно внимание е обърнато върху различията и допълненията спрямо класическите постановки, свързани с оразмеряването на електропроводи с АС проводници.

В първата част [1] представихме моделите за определяне на температурата на нагряване на проводниците, препоръчвани от Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE) и Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE).

Следващ съществен момент на който обръщаме внимание, това е определянето на температурата, над която механичното поведение на проводника започва да се определя от характеристиките на ядрото му. При изчислителните процедури по оразмеряването на високотемпературните проводници, тази температура е необходимо да бъде определена. Това става с помощта на точката на пречупване в характеристиката на изменение на провеса в зависимост от температурата на проводниците (thermal knee point).

Тъй като напреженията на опън, с които е регулиран проводника за различните опъвателни полета, са в общ случай различни, то за всяко отделно опъвателно поле (приведено междустълбие) е необходимо да се определи температурата, над която силите действащи в проводника ще се поемат изцяло от неговото ядро. Това става по начините описани в [2, 5, 6, 7, 8].

Следващото важно отражение върху изчислителния подход е свързано с уравнението за състояние на проводника понеже, както вече подчертахме, тези нови проводници имат различно поведение под и над определена стойност на температурата при която работят.

Често пъти изходният оразмерителен режим (известният) е такъв, при който температурата на проводника определя неговата работа като класически – тоест и токопроводящата част и ядрото на проводника заедно поемат механичните усилия. Обикновено режимите, при които се следят вертикалните габарити са тези с максимален провес. В случаите, когато критичната температура е по-ниска от максималната температура на околната среда, максималният провес ще настъпва при режим на максимална температура. Когато става въпрос за високотемпературни нископровесни проводници този режим ще е с температура на проводника около и над 100°C. Предвид спецификата на тези нови проводници, при такъв режим механичните усилия ще са прехвърлени изцяло върху ядрото.

Отчитайки изложеното и приспособявайки традиционния подход, разглеждаме един известен режим на работа „m“ при който проводникът работи като класически, но следва да се определи един нов режим „n“, при който механичното поведение на проводника се диктува само от характеристиките на неговото ядро. При тази постановка формата на уравнението за състоянието на проводника, при режими на работа над точката на пречупване е:

$$\sigma_m - \frac{\gamma_m^2 L^2 E_0}{24\sigma_m^2} = \sigma_n - \frac{\gamma_n^2 L^2 E_i}{24\sigma_n^2} - \alpha_0 E_0 (t_m - t_n) \quad (1)$$

Тук с индекс „m“ е отбелязан известният режим, спрямо който се определя търсения режим – „n“. Останалите величини са:

σ_m – напрежение на опън в проводника за известният режим, MPa;

γ_m – относителен товар за известният режим, N/m. mm^2;

L – дължина на междустълбието, m;

E_0 – модул на линейна деформация за комбинирания проводник, MPa;

σ_n – напрежение на опън в проводника за търсеният режим, MPa;

γ_n – относителен товар за търсеният режим, N/m. mm^2;

E_i – модул на линейна деформация за ядрото на комбинирания проводник, MPa;

α_0 – температурен коефициент на линейно разширение на комбинирания проводник, °C^{-1};

t_m – температура при известния режим,

t_m °C; t_n – температура при търсеният режим, °C.

Полагайки в уравнение (1)

$$\sigma_m - \frac{\gamma_m^2 L^2 E_0}{24\sigma_m^2} - \alpha_0 E_0 (t_n - t_m) = A \quad (2)$$

$$\frac{\gamma_n^2 L^2 E_i}{24} = B \quad , \quad (3)$$

уравнението за състояние на проводника, разглеждано по отношение на неизвестното напрежение на опън σ_n, приема следната по-удобна форма:

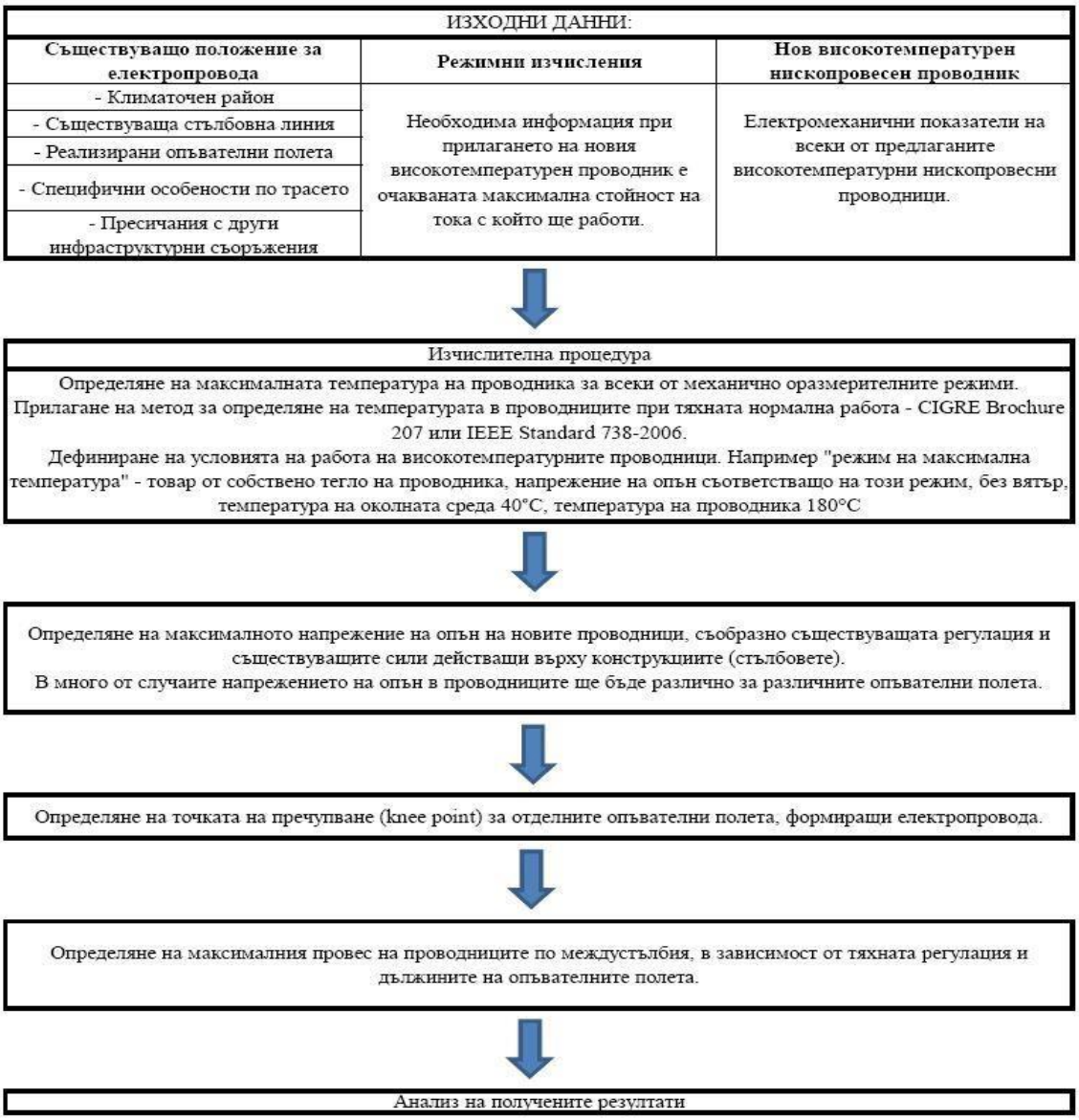
$$\sigma_n - \frac{B}{\sigma_n^2} = A \quad (4)$$

Следователно за определяне на напрежението на опън в проводника при търсения режим може се използва метод на простата итерация по формулата:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{B}{\sigma_x - A}} \quad , \quad (5)$$

където началното приближение на напрежението на опън σ_x представлява произволно, но близко до очакваната стойност число в MPa.

Блок-схема на изчислителната процедура съгласно предлагания подход е представена на фиг.1.

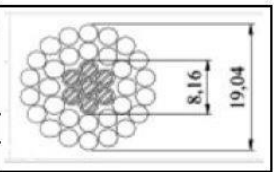


Фиг.1. Блок схема на изчислителната процедура при оразмеряване на високотемпературни нископровесни проводници

3. ПРИМЕР

Да се определи максималната стойност на провеса на проводник ZTACIR 19,04 при протичането на електрически ток 800A през него. С цел опростяване на задачата максималното напрежение на опън, с което е регулиран проводника е 92,92 MPa за режим на максимален товар и режим на минимална температура. Дължината на приведеното междустълбие е 218m. Електропроводът, част от който е разгледаното междустълбие попада във II-ри климатичен район с дебелина на ледената стеничка b=10mm, максимална скорост на вятъра 35 m/s и скорост на вятъра при обледяване 17,5 m/s. Параметрите на проводника са посочени в таблица 1.

Таблица 1

Проводник от супер температурно устойчива алуминиева сплав усилен с алуминизирани инварни жички (Super Thermal Resistant Aluminium Alloy Conductor Invar Reinforced)			
ZTACIR Ø 19,04mm (7 + 30)			
ACI 20SA core + IEC 62004 AT3 aluminium alloy (ZTAL)			
ХАРАКТЕРИСТИКА НА ПРОВОДНИКА			
Диаметър	--	[mm]	19,04
Конструкция	алуминизирана инварна жичка ACI 20SA (aluminium cladded invar wire)	№ x Ø [mm]	7 x 2,72
	температурно устойчива алуминиева жичка (thermal resistant aluminium wire)	№ x Ø [mm]	30 x 2,72
Напречно сечение	алуминизирана инварна жичка ACI 20SA (aluminium cladded invar wire)	[mm^2]	40,7
	температурно устойчива алуминиева жичка (thermal resistant aluminium wire)	[mm^2]	174,3
	общо	[mm^2]	215
Специфично тегло	алуминизирана инварна жичка ACI 20SA (aluminium cladded invar wire)	[kg/km]	279
	температурно устойчива алуминиева жичка (thermal resistant aluminium wire)	[kg/km]	482
	общо	[kg/km]	761
Съпротивление на километър при постоянен ток и 20°C	--	[Ω/km]	0,158
Разрушаваща сила	ядро	[kN]	40,27
	общо	[kN]	69,21
Модул на линейна деформация	ядро	[GPa]	139
	общо	[GPa]	71
Температурен коефициент на линейно разширение	ядро	[10^{-6}/°C]	3,5
	общо	[10^{-6}/°C]	15,8

Използвайки гореописаната блок схема на изчислителната процедура при оразмеряването на тези нови проводници, следва да се определи температурата на проводника.

Приведеното междустълбие е 218 метра. Полученото меродавно критично междустълбие е с дължина 122 метра. Приведеното междустълбие е по-голямо от критичното следователно режимът при който ще настъпва максимално напрежение на опън в проводника е режимът на максимален товар. Той се дефинира с:

- Максимално напрежение на опън в проводника - $\sigma_m = \sigma_{\gamma max} = 92,92$Mpa;
- Относителен комбиниран товар върху проводника – $\gamma_m = \gamma_7 = 81,72x10^{-3}$ $N/m.mm^2$;
- Температура на околната среда - $t_m = t_{\gamma max} = -5$°C.

При дефинирането на този режим не се отчита температурата на проводника, тъй като тук се търси най-тежкия възможен режим който може да настъпи. Ако се отчете възможността за повишаване на температурата на проводника от протичането на ток с голяма стойност през проводника, това ще доведе до изменение в дефиницията на този допустим режим. Това се дължи на факта че относителния товар върху проводника ще се дефинира без лед, от където ще се измени и стойността на напрежението на опън при тези условия (стойността ще бъде по-малка).

Според класическия подход е необходимо да се определи критичната температура, от където да се изведе режима при който ще настъпва максимален провес. Критичната температура за гореописаните конструктивни параметри е 35°C, която е по-малка от максималната температура за околната среда - 40°C. Тогава ако електропровода работи при режими близки до празен ход, то максималния провес би бил при режим на максимална температура на околната среда. Ясно е, че в действителност максималният провес ще се получава при условия на работа на въздушния електропровод с висока температура на проводниците (в режими на високи предавани мощности).
Разгледани са осем режима. Техните параметри са със съществено значение за температурата на проводниците. Характеристиките на режимите заедно с резултатите за температурата на повърхността на проводниците са дадени в табл.2.

Таблица 2

Скорост на вятъра - V, m/s	0.2	0.2	0.6	0.6	0.9	0.9	2	2
Ъгъл на вятъра, °	45	45	45	45	15	45	15	45
Температура на околтата среда - Ta,°C	15	40	15	40	40	40	40	40
Температура на повърхността на проводника - Ts,°C	**185**	**209**	**149**	**174**	**194**	**154**	**154**	**121**

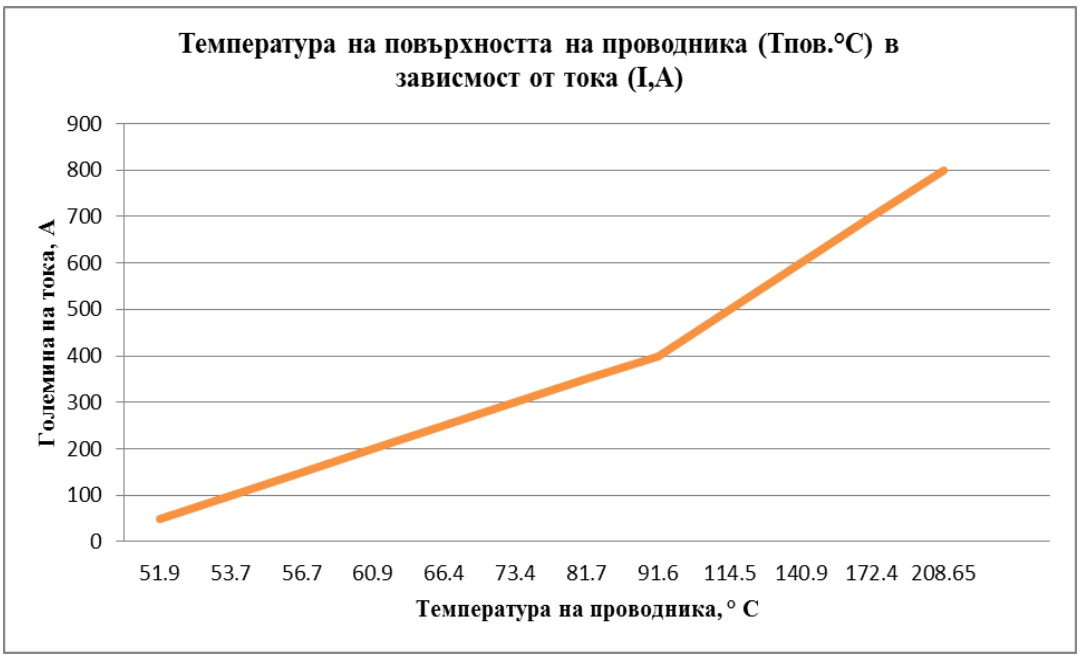
За разглеждания проводник ZTACIR 215 външният диаметър D е 19.04 mm, а диаметърът на жичката на проводника d е 2.72 mm. Приетата глобална слънчева радиация при всички режими е 900 W/m^2. Съпротивлението на проводника при постоянен ток е r_{0dc} = 0.159 Ω/km, приетият ток на натоварване е I_{ac} = 800A, абсорбционната способност на повърхността на проводника е α_s = 0.5, плътността на въздуха за района на електропровода е ρ = 1,000 kg/m^3, (1,225 kg/m^3 за морското равнище).

Използвана е методиката описана в CIGRE Brochure 207 за определяне на температурата на проводника при неговата нормална работа. Пренебрегнато е нагряването в следствие на магнетизъм и на ефект корона, както и охлаждането от изпарение. Това направено поради пренебрежимо малките им стойности, спрямо останалите компоненти, които влияят върху нагряването и охлаждането на проводника. Математическият модел е разработен в среда на Майкрософт Ексел (Microsoft Excel). Както показахме в [1], температурата на проводника се получава чрез итеративен подход, при който се променя текущата й стойност докато се получи изравнен топлинен баланс.

Както се вижда най-високата стойност за температурата е ~209°C. Това е и температурата при която ще се получава най-голям провес.

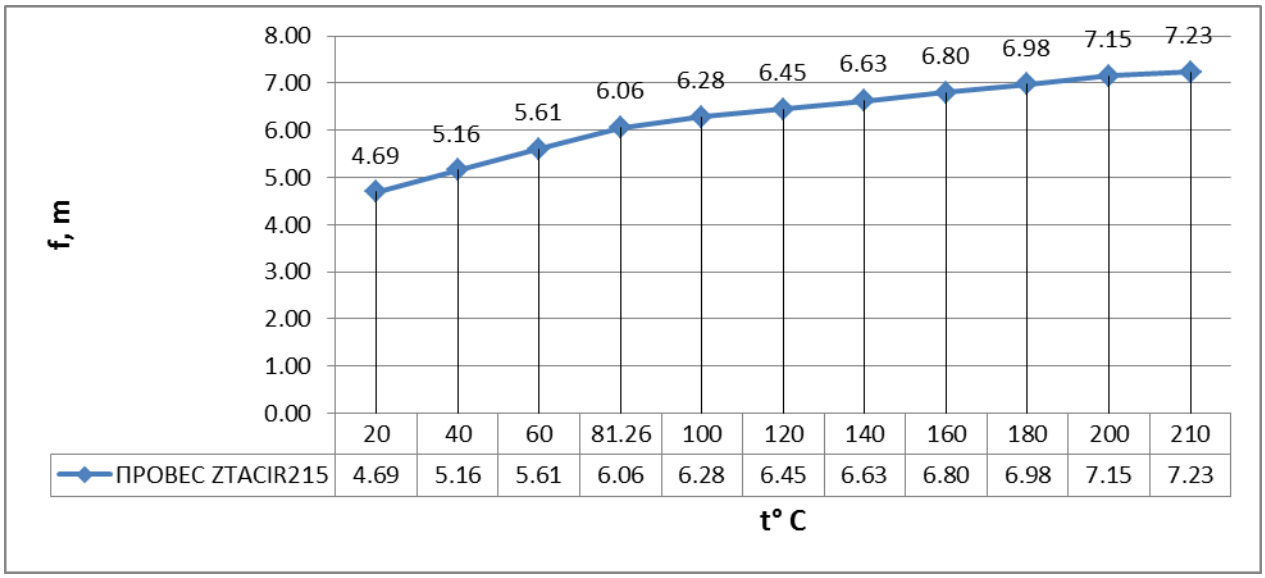
На фиг.2 е показана зависимостта на изменение на температурата при изменение на токовото натоварване на проводника.

Фиг.2 е съставена за условия на околната среда, при които се получава най-висока температура на проводника



Фиг.2. Зависимост на изменението на температурата от промяната на големината на тока

Температурата след която механичното усилие е изцяло прехвърлено върху ядрото на проводника (точката на пречупване) е 81,26°С - фиг.3. За получаването на тази стойност е използвана методиката предложена в [2].



Фиг.3. Зависимост на провеса от температурата.

Приведено междустълбие Lпр = 218m; $\sigma_{maxZTACIR215}$ = 92,92Mpa

Използвайки уравнения (2), (3) и (5) получаваме стойността на напрежението на опън в проводника (в ядрото на проводника) при максимална температура – 150,90 MPa. Прилагайки зависимостта на провеса от напрежението на опън определяме:

$$f = \frac{\gamma_1 . L^2}{8.\sigma_{tmax}} = \frac{0,1834.218^2}{8.150,90} = 7,21m$$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е предложен подход за оразмеряване на въздушни електропроводни линии с високотемпературни нископровесни проводници. В подходът се прилагат изчислителни модули, които отчитат новите свойства на съвременните високотемпературни нископровесни проводници.

При механичното оразмеряване на високотемпературните нископровесни проводници задължително условие е определянето и използването на температурата на самия проводник, за разлика от класическия подход – използване на температурата на околната среда.

Приложението на уравнението за състоянието на проводника претърпява модификация, тогава когато проводниците се очаква да работят при температури на нагряване над съответстващата на точката на пречупване.

Предлаганият подход е приложим при проектирането на въздушните електропроводни линии.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Николов Н., Стоилов Д., Механично оразмеряване на електропроводи с високотемпературни проводници: Част I – методологични основи, VIII Научна конференция ЕФ 2016 – Варна, 2016

[2] Николов Н., Методика за определяне на точката на пречупване в характеристиката на изменение на провеса в зависимост от температурата на проводниците, VIII Научна конференция ЕФ 2016 – Варна, 2016

[3] Kimp L., Magee W., Dasovich S., Shuck M., Sorensen Ch., Katsev D., Guide for determination of bare overhead transmission conductors, PJM Interconnection, 2010

[4] Chan J., Clairmont B., Rueger D., Childs D., Karki S., Demonstration of advanced conductors for overhead transmission lines, Electric power research institute, 2008

[5] Fernandez A., Mazon A., Bedialauneta M., Sagastabeitia K., Overhead conductor monitoring system for the evaluation of the low sag behavior, IEEE Trondheim PowerTech, 2011

[6] Keshavarzian M., Priebe Ch., Sag and tension calculations for overhead transmission lines at high temperatures – modified ruling span method, IEEE Transactions on power delivery, vol. 15 № 2, стр. 777-783, 2000

[7] Pelacchi P., Poli D., A novel thermo-mechanical model to assess the dynamic thermal rating of multi-span overhead transmission lines, Periodica polytechnica electrical engineering and computer science, vol 59 (3), стр. 64-69, 2015

[8] Dong X., Analityc method to calculate and characterize the sag-tension of overhead lines, IEEE Transactions on power delivery, vol 31, № 5, pp. 2064-2071, 2016

Автори: Никола Неделчев Николов, маг. инж., асистент, катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *n_nikolov@tu-sofia.bg*; Димо Георгиев Стоилов, доц. д-р инж., катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Петър Наков

ОЦЕНКА НА МЕХАНИЧНОТО НАТОВАРВАНЕ И СВОБОДНИЯ КАПАЦИТЕТ НА СТЪЛБОВЕ ЗА НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ

Васил Захариев, Калоян Бурванов

Резюме: *Задачата на настоящето изследване е да се установи механичното натоварване на група стоманобетонни стълбове, използвани в мрежите за напрежение 0,230/0,400 kV в България. То се налага от факта, че на стоманобетонни стълбове през последните години са закачени кабели на електронната съобщителна мрежа. Те създават допълнително натоварване, което заедно с основното - не трябва да превишава допустимите за даден тип стълб надлъжно-хоризонтални, напречно-хоризонтални и вертикални сили. Изследванията са проведени за дадени конфигурации и схема на окачване на голи* (*неизолирани*) *проводници или изолирани* (*усукани*) *проводници.*
Ключови думи: *стоманобетонен стълб; ниско напрежение; електронна съобщителна система; сили.*

EVALUATION OF THE MECHANICAL LOADING AND FREE CAPACITY OF LOW VOLTAGE POLES

Vasil Zahariev, Kaloyan Burvanov

Abstract: *The aim of this study is to determine the mechanical loading of a group of concrete poles, used in the low voltage networks of 0,230 / 0,400 kV in Bulgaria. Determination of the loading is imposed by the fact that in recent years various cable operators have been attaching cables for the electronic communications network to already existing concrete poles. Thus additional loading has been created, which along the main one, should not exceed the eligible for a given pole type longitudinal horizontal, transverse horizontal and vertical forces. These studies have been conducted for certain configurations and designs regarding the suspension of bare* (*uninsulated*) *conductors/ wires or insulated* (*twisted*) *conductors/ wires.*
Keywords: *concrete poles; low voltage; electronic communication system; forces.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Във въздушната електрическа мрежа за ниско напрежение (НН) в България се използват голи (неизолирани) стоманено-алуминиеви проводници (АС) и усукани изолирани проводници (кабели) с носещо нулево жило тип AL/R. Стоманено алуминиевите проводници със сечение 50mm^2 се използват за фазови и ну-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

лев проводник, а сечението $25mm^2$ - за улично осветление. Разполагат се на стълба както следва: фаза А на височина ha = 7,8 m от нивото на терена, фаза В на височина hв = 7,6 m, фаза С на височина hc = 7,4 m и нулев проводник ho = 7,2 m. Фазата за улично осветление се монтира на височина hyo = 7,0 m. Максималният провес на всички проводници при максимална температура на въздуха, съгласно конструктивната документация е 1.0 m.

Използваният в мрежите за НН усукан проводник е тип AL/R 3x70+71,50. Прието е кабелът да се закрепва към стълба в точка, отстояща на 7,60m от нивото на терена

Върху съществуващите стоманобетонни стълбове на мрежата НН са закачени кабели на електронната съобщителна мрежа (ЕСМ).

В електрическите мрежи за НН се използуват двата типа стоманобетонни стълбове: центроуфугалните [1] и вибрирани [2]. Гамата центрофугални стълбове включва: носителен със сигнатура НЦ 125/9,5; крайни КЦ 350/9,5 и КЦ 590/9,5, ъглови ЪЦ 853/9,5 и ЪЦ 1220/9,5. Вибрираните стълбове са: СБВ 18/9,5/250; СБВ 24/9,5/650 и СБВ 28/9,5/1000. Използуват се като носителни, ъглови и крайни. В каталожната документация за всеки тип стълб са дадени комбинациите от проводници по тип и сечение, които могат да се монтират на стълба, така че силите които създават проводниците да не превишават допустимата му върхова сила. Върховата сила е хипотетична (фиктивна) сила, приложена на 10 cm под върха на стълба, чиито момент спрямо терена е равен на сумата от моментите на действителните сили действащи върху стълба.

Стоманобетонните стълбове се проектират (в случая термина проектиране ще се употребява в смисъл на проверка) от натоварването вертикални и хоризонтални сили:

Когато действащите върху стълба сили са свързани с определени условия, регламентирани в [3] се наричат нормативни.

ИЗСЛЕДВАНЕ НАТОВАРВАНЕТО НА СТЪЛБОВЕТЕ ОТ ПРОВОДНИЦИТЕ НА МРЕЖАТА 0,230/0,400 KV

Проверката на стълбовете се извършва въз основа на определяне на следните нормативни сили:

Вертикална сила от теглото на проводника $Рн_{в1}$:

$$Рн_{в1} = p_{нв1}.Lт,$$

където: $p_{нв1}$ е нормативният вертикален товар от собственото тегло на проводника с дължина 1m;

Lт – тегловото междустълбие в m.

Вертикална сила от теглото на леда върху проводника $Рн_{в2}$:

$$Рн_{в2} = p_{нв2}.Lт,$$

където: $p_{нв2}$ е нормативният вертикален товар от теглото на леда върху проводника с дължина 1m.

Вертикална сила от теглото на заледения проводник $Рн_{в3}$

$$Рн_{в3} = Рн_{в1} + Рн_{в2}.$$

Напречна-хоризонтална сила от действието на вятър с максимална скорост върху незаледен проводник $Рн_{у4}$:

$$Р_{Ну4} = p_{ну4}.Lв,$$

където: $p_{ну4}$ е силата от налягането на вятъра с максимална скорост върху проводник с дължина 1m;

Lв – ветровото междустълбие.

Напречна-хоризонтална сила от действието на вятър върху заледен проводник $Р_{Ну5}$:

$$Р_{Ну5} = p_{ну5}.Lв,$$

където: $p_{ну5}$ е силата от налягането на вятъра върху заледен проводник с дължина 1m.

При стоманобетонните стълбове ветровото и тегловото междустълбия са равни на габаритните за съответния климатичен район.

Стойностите на нормативните сили за изследваните стомано-бетонни стълбове са определени в съответствие с изискванията на [3], чл. 472 (1), (2) и (3) по данни за използуваните проводници, за съответните климатични райони и скорости на вятъра със софтуерен продукт АПЕЛ

В изследванията са отчетени изискванията на [3] за стълбове за НН.

Стълбовете независимо от техния тип са проверени за механични товари при нормален режим и състояние на проводниците: свободни от лед и максимална скорост на вятъра; покрити с лед и скорост на вятъра при заледяване

При изчисленията се отчитат действията на следните сили:

1. *Носещи стълбове* – хоризонтална напречна сила , перпендикулярна на оста на ВЛ, от налягането на вятъра върху проводниците и стълба.
2. *Опъвателни стълбове* –хоризонталните сили от налягането на вятъра по т.(1) и от разликата в опъна на проводниците в съседните междустълбия, насочени по оста на ВЛ с големина най-малко 50% от най-голямата сила на едностранен опън.
3. *Ъглови стълбове* - хоризонталните сили от налягането на вятъра и резултантната от натягане на проводниците, проектирани по ъглополовящата на ъгъла, сключен между проводниците от двете страни на стълба.
4. *Крайни стълбове* – хоризонталните сили по оста на ВЛ от натягането на проводниците и налягането на вятъра, определено по т.(1).
5. Всички видове стълбове се проверяват на вертикалната сила от собственото теглото на проводника и теглото на заледения проводник.

Изследването обхваща определяне на действителното механично натоварване на различни типове стълбове с комбинация от проводници 3хАС50+АС50+АС25 спрямо проектното за различни климатични райони. В табл.1 е дадено изчисленото действително натоварване спрямо проектното за различни типове стоманобетонни стълбове за НН.

Действително натоварване на стоманобетонни стълбове с проводници 3АС50+АС50+ АС25 спрямо проектното:

Таблица 1

Тип на стълба, комбинация от проводници според типовия проект	Хоризонтално натоварване спрямо проектната върхова сила, %			
	макс. по типов проект		3АС50+АС50+АС25	
	II кл. район	III кл. район	II кл. район	III кл. район
НЦ 125/9,5 3АС70+АС35+2АС16+2С7	40,32	92,96	29,04	64,80
НЦ 250/9,5 4АС70+2АС16+2С7	20,40	22,12	14,16	15,16
КЦ 590/9,5 – като краен 3АС25+3АС16+2С7	98,94 Fв=628 kgf	94,97 Fв=628 kgf	101,05 Fв=628kgf	79,79 Fв=628 kgf
ЪЦ 835/9,5 при ъгъл 90^0 3АС25+3АС16+2С7	100,25 Fв=890kgf	98,35 Fв=890kgf	102,02 Fв=890kgf	82,28 Fв=890kgf

Изследванията, проведени за II и III климатични райони показват, че използваните стълбове имат резерв за допълнително натоварване. Изключение правят стълб КЦ 590/9,5 и стълб ЪЦ 835/9,5 за II кл.район (с претоварвания съответно 1,05% и 2,02%) при натоварвания с проводници 3АС50+АС50+ АС25. Свободният капацитет на стълбовете е различен и служи като мярка за оценка на допълнителното натоварване на стълбовете от съоръженията на електронната съобщителна мрежа (ЕСМ), които се окачва на тях.

На стълбовете на въздушните електропроводни линии за НН в градските и селските зони се окачват кабели на ЕСМ. Използват се следните видове кабели: кабели с оптични влакна и носещо въже тип „8“, коаксиални кабели с носещо въже и LAN кабели с носещо въже. При тези кабели носителното въже и съобщителната част са интегрирани в едно тяло.

Кабели с оптични влакна и носещо въже тип „8“. Конструкцията на кабела включва носещо стоманено масивно или многожично жило, изолирано с екструдиран полиетилен и оптична част съдържаща от 12 до 72 оптични влакна, защитени в полимерна обвивка. Носещото жило се състои от една или повече жички от горещо поцинкована стомана с висока механична якост. То е подложено на механично напрежение на опън и носи товарите от теглото на кабела(собствено и от допълнително натоварване от обледяване) и действието на вятъра върху него. Оптичните влакна не са подложени на механично натоварване и на електрическо напрежение, което от гледна точка на техническата безопасност ги прави безопасни за обслужващия експлоатационен персонал на въздушните линии за НН. Най- голямо приложение в България има оптичен кабел, Gel-Filled Cables производство на фирмата Corning Optical Communications LLC. Технически характеристики на този кабел са дадени в табл.2.

Коаксиални кабели с носещо въже. Конструкцията на коаксиалните кабели с носещо въже включва носещо галванизирано стоманено въже (обикновено от една жичка) в полимерна черна обвивка и меден или помеднен алуминиев проводник, по който се предават високочестотните сигнали. Върху централния

проводник е екструдиран разпенен полиетилен (поливинил хлорид, полипропилен, тефлон и др.). Върху това покритие е положена медна (алуминиева) ширмовка, за предпазване от електромагнитни смущения. Външната обвивка е от черно полимерно покритие, устойчиво на ултравиолетови лъчи. Механичното натоварване на кабела се поема от носещото въже. В България приложение имат коаксиални кабели, производство на фирмата COMMSCOP. Технически данни на тези кабели са дадени в табл.2.

Таблица 2

Тип на кабела	Марка на кабела	Диаметър на носещото жило, mm	Сечение на носещото жило, mm^2	Външен диаметър, mm	Тегло на кабела, kg/km	Относителен товар от собствено тегло, $N/m.mm^2$	Минимална разрушаваща сила, kg
Оптичен	Gel-Filled Cables	2.09	3.429	22,10	62.10	$177.66.10^{-3}$	90
Коаксиален тип 1	QR540JCAQM109	2,77	6,02	20,04	252,99	$412,26.\ 10^{-3}$	816
Коаксиален тип 2	F1160BVMHDC	1,83	2,63	14,13	126,50	$471,85.\ 10^{-3}$	166
Коаксиален тип 3	F660BVM	1,295	1,32	9,728	65,48	$486,64.\ 10^{-3}$	82
LAN	Cat.5e.aerial	1,29	1,31	9,30	62,99	$471,56.10^{-3}$	82

Забележка: Носещото въже е плътно (масивно) от поцинкована стомана с модул на еластичност E=200000MPa и температурен коефициент на линейно удължение $\alpha = 12.10^{-6}\ ^0C^{-1}$.

LAN кабели с носещо въже. Представлява електронно съобщителен кабел с четири двойки медни или помеднени алуминиеви жила, всяко от които е изолирано с HDPE изолация. За ограничаване на външните смущения се използва общ за четирите двойки жила алуминиев екран. Външната обвивка на кабела е от PVC/LSZH материал. Диаметърът на кабела с външната обвивка е 5,5mm. Механичното натоварване се поема от носещо въже от галванизирана стомана с висока якост. Въжето е едножично най-често с диаметър 1,20 mm. Върху жилото е екструдиран PVC материал, устойчив на ултравиолетови лъчи. Използваният в България коаксиален кабел е производство на американската фирма Structured Cable Products и отговаря на стандарти ANSI/TIA-568-C.2&ISO/IEC 11801. Техническите му характеристики са дадени в табл. 2.

КОНСТРУКТИВНИ И ТЕХНИЧЕСКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА КАБЕЛИ НА ЕЛЕКТРОННАТА СЪОБЩИТЕЛНА МРЕЖА

Основните конструктивни и физико механични характеристики на кабелите на ЕСМ са: диаметър на носещото жило, външен диаметър на кабела, сечение на носещото жило и тегло на кабела, модул на линейна деформация, температурен коефициент на линейно разширение и допустимо напрежение на опън на носещото въже. Те се определят по данни на завода производител.

По данни от каталозите на използваните кабели в ЕСМ са определени конструктивните и механични характеристики на кабели, използвани в ЕСМ, дадени в табл.2.

Конструктивни и механични характеристики на кабели на електронната съобщителна мрежа:

Електромеханичните изчисления на кабелите на ЕСМ са свързани с определяне на поведението на кабела при различни климатични въздействия (температура на въздуха, скорост на вятъра, интензивност и дебелина на обледяването). Стойностите на тези климатични условия заедно с механичните напрежения, създадени в кабелите при монтажа им, определят общите показатели на кабела от гледна точка на работата му: провисване на кабела между точките на окачване и напрежения на опън в носещата част на кабела. Характеристиките провес и напрежение на опън се нормират. Те не трябва да се превишават нормираните им стойности, защото това води до нарушаване на габарита на кабела над пресичаните съоръжения или недопустимо механично натоварване на опън.

Климатични условия:

Температура на въздуха:

При механичното оразмеряване на кабелите на ЕСМ е прието да се използват следните изчислителни температури на въздуха за даден район: средногодишна температура; максимална изчислителна температура и минимална изчислителна температура.

Вятър:

При механичното оразмеряване на кабелите на ЕСМ се използват следните скорости на вятъра:

а). максимална скорост -за мрежите НН се приема равна на 25m/s или 30m/s;

б). скорост на вятъра при обледяване -за мрежите за НН се приема равна на $0{,}5\upsilon_{max}$ или 12,5 m/s или 15 m/s.

в). съгласно Чл. 453(1) на [3] максималната скорост на вятър за мрежи в застроени местности е приета $\upsilon_{max.д} = 0{,}6\upsilon_{max}$=18 m/s, а при заледяване $\upsilon_{лед}$ = 9 m/s.

Обледяване на кабелите:

За обледяването на кабелите на ЕСМ в България няма норми за дебелината на ледения маншон или за линейното натоварване на кабела от леда. Ето защо тук са дадени препоръчителни стойности, които са съобразени с практиката в други страни и особеностите на кабелната структура. Те се основават и на изследвания проведени от авторите, които отчитат възможностите за допълнително натоварване на стълбовете за НН от кабелите на ЕСМ.

Анализът на климатичните условия при които работят кабелите в условията на застроена среда, позволява да се направят следните изводи за режима на работа на обледяване:

1. При снеговалеж върху кабелите се образува заледяване от сняг, а не от лед. Плътността на заледения сняг по литературни данни може да се приеме δ = 500 kg/m^3.
2. Дебелината на обледяването в условията на застроена територия може да се намали – например за междустълбия с дължина 35 m да бъде 5 mm, а при 26 m – 10 mm. Това значително намалява ндлъжно-хоризонталното натоварвания на кабелите.

3. За междустълбие с дължина 35 m скоростта на вятъра може да се приеме υ_{max} = 25 m/s, а при заледяване $\upsilon_{л}$ = 12,5 m/s. Тогава в условията на действие на Чл. 453(1) на [3] максималната скорост на вятър за мрежи в застроени местности се приема $\upsilon_{max.д} = 0{,}6\upsilon_{max}$=15 m/s, а при заледяване $\upsilon_{лед}$ = 7.5 m/s.

Въз основа на този анализ механичното оразмеряване на кабелите на ЕСМ трябва да се извършва по параметрите на следните два режима:

Първият (I режим) се отнася за габаритно междустълбие с дължина 35 m и има параметри: дебелина на обледяването b = 5 mm; плътност на обледяването δ = 500 kg/m^3; скорости на вятъра $\upsilon_{max.д} = 0{,}6\upsilon_{max}$=15 m/s, а при заледяване $\upsilon_{лед}$ = 7.5 m/s; провес на кабела f = 0.8 m.

Вторият (II режим) се отнася за габаритно междустълбие с дължина 26 m и има параметри: дебелина на обледяването b =5 mm; плътност на обледяването δ = 500 kg/m^3; скорости на вятъра $\upsilon_{max.д} = 0{,}6\upsilon_{max}$=18 m/s, а при заледяване $\upsilon_{лед}$ = 9.0 m/s; провес на кабела f = 0.6 m.

При тези параметри е изчислена силата на опън в различните видове кабели на ЕСМ и резултатите представени в таблица 3.

Механични натоварвания на кабели на електронно съобщителна мрежа

Таблица 3

Тип на кабела	Марка на кабела	Режим на работа	Дебелина на обледяването, mm	Скорости на вятъра, m/s	Сила на опън при зададен провес, kg	Допустима сила на тегле kg	Минимална разрушаваща сила, kg
Оптичен	Gel-Filled Cables	I	5	15/7.5	27.97	90	90
		II	5	18/9	22.37	90	90
Коаксиален тип 1	QR540JCAQM109	I	5	15/7.5	95.11	100	816
		II	5	18/9	74.87	100	
Коаксиален тип 2	F1160BVMHDC	I	5	15/7.5	55.76	74.7*	166
		II	5	18/9	47.18	74.7*	
Коаксиален тип 3	F660BVM	I	5	15/7.5	37.00	36.9*	82
		II	5	18/9	30.41	36.9*	
LAN	Cat.5e. aerial	I	5	15/7.5	35.65	36.9*	82
		II	5	18/9	28.97	36.9*	

Проектното натоварване на стоманобетонните носещи стълбове (НЦ 125/9,5 и НЦ 250/9,5) и стълбове от опъващ тип КЦ 590/9,5 и ЪЦ 835/9,5 от кабелите на ЕСМ е определено за условията на II и III кл. райони при II нормален режим (максимален товар). Приета е следната схема на окачване на кабелите на ЕСМ: два оптични кабела Gel-Filled Cables закачени към стълба в точки на отстояние спрямо земята 5,8 и 5,7 m; два броя коаксиални кабела QR540JCAQM109, закачени към стълба на разстояния 5,6 и 5,4 m и един коаксиален F1160BVMHDC, закачен на разстояние 5,5 m от земята.

Въз основа на изчислените сили от кабелите на ЕСМ се изчисляват отделните огъващи моменти, а от там и върховата сила на стоманобетонния стълб, посредством зависимостта:

$$Fв = \frac{\sum_1^3 M_{ог(iпр)} + \sum_1^2 M_{ог(iуо)} + \sum_1^n M_{ог(iECM)}}{H_{ст}},$$

където: $M_{ог(iпр)}$ е огъващият момент на i – тия фазов проводник;

$M_{ог(iуо)}$ – огъващия момент на i-тия проводник за улично осветление;

$M_{ог(iECM)}$ - огъващият момент на i-тия кабел на ЕСМ;

$H_{ст}$ – височината на стълба над терена.

Силите дефиниращи огъващите моменти се определят спрямо координатна система x y, разположена по ъглополовящата на фазовите проводници.

Стълбът ще издържи допълнителното натоварване, ако е изпълнено условието:

$$Fв_{доп} \geq Fв,$$

където: $Fв_{доп}$ е допустимата върхова сила за даден тип стълб.

Аналогична проверка се прави за силите, вертикално натоварващи стълба. За целта се сумират силите на всички вертикални товари и се проверява условието:

$$Fz_{доп} \geq Fz,$$

където: $Fz_{доп}$ е допустимото вертикално натоварване за даден тип стълб.

В табл.4 е дадено изчисленото действително натоварване спрямо проектното за различни типове стоманобетонни стълбове за НН.

Действително натоварване на стоманобетонни стълбове с проводници 3АС50+АС50+ АС25 и кабели на ЕСМ спрямо проектното:

Таблица 4

Тип на стълба, комбинация от проводници според типовия проект	Хоризонтално натоварване спрямо проектната върхова сила, %			
	3АС50+АС50+АС25		3АС50+АС50+АС25+ЕСМ	
	II кл. район	III кл. район	II кл. район	III кл. район
НЦ 125/9,5	29,04	64,80	37,92	75,32
НЦ 250/9,5	14,16	15,16	18,92	20,28
КЦ 590/9,5 – като краен Fв=628 kgf	101,05	79,79	134,79	106,80
ЪЦ 835/9,5 при ъгъл 90^0 Fв=890kgf	102,02	82,28	135,71	109,25

ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. В България няма наблюдения за обледяването на кабелите на ЕСМ за въздушно окачване и нормативна уредба за определяне на натоварването им. Това налага събиране на статистическа информация за обледяването и действието на вятъра и разработване на методики за проектиране и изграждане на кабелите на ЕСМ при окачването им на мрежата за НН.

2. При окачване на стълбовете на комбинация от проводници 3АС50+АС50+АС25, което е горна граница на основната част от гръбнака на магистралите, носимоспособността на ъгловите и крайните стълбове в максимален режим е изчерпана. Резервът на носителните стълбове се определя от броя на присъединените отклонения за абонатите.

3. При окачване на кабели на ЕСМ надеждността на ВЕЛ 0,230/0,400 kV се намалява, което налага проверка за установяване на действителното механичното натоварване на стълбовете. Въз основа на тази проверка електроразпределителните дружества следва да издават съответните разрешения.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Типови стоманобетонни вибрирани и центрофугални стълбове за ниско напрежение, сигнатура 7-03-1/64, разработка на „Енергопроект“ 1964г., отдел Типово проектиране.

[2] Типови стоманобетонни стълбове за въздушни линии ниско напрежение и 20kV, разработка на „Енергопроект“ 1984г., отдел Типово проектиране

[3] Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии, ДВ бр 108 от 19 декември, 2007г.

[4] Н. Генков, В. Захариев, Механична част на електрически мрежи, Техника, 1993.

[5] В. Захариев, К. Бурванов, Анализ и оценка на натовареност и свободен капацитет на стълбовете на въздушни електропроводни линии с напрежение 380/220 V, Отчет по задача на ЕВН България, Електроразпределение ЕАД, 2015.

Автори: доц. д-р инж. Васил Захариев, катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *V.Zahariev@tu-sofia.bg*; маг. инж. Калоян Бурванов, катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: *K_Burvanov@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Ангел Цолов

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИТЕ УСИЛИЯ В ТВЪРДИТЕ ШИНИ ПРИ НЕУСПЕШНО АВТОМАТИЧНО ПОВТОРНО ВКЛЮЧВАНЕ

Калоян Бурванов

Резюме: *С развитието на електроенергийните системи нивата на токовете на късо съединение в мрежите високо напрежение значително нарастват. Основна цел на настоящият доклад е изследването на техническите методи и средства за намаляване на електродинамичните усиля и повишаване на електродинамичната устойчивост на разпределителните уредби високо напрежение изпълнени с твърди шини при неуспешно автоматично повторно включване.*
Ключови думи: *твърди шини, късо съединение, електродинамични сили, автоматично повторно включване, контролирано включване*

POSSIBILITIES FOR REDUCTION OF ELECTRODYNAMIC FORCES IN RIGID BUSBARS IN CASE OF UNSUCCESSFUL AUTOMATIC RECLOSING

Kaloyan Burvanov

Abstract*: With the growth of the electrical systems the high voltage networks short circuit levels growth up. The main objective of this report is to examinate the technical methods and means of reduction of the electrodynamic forces and increasing of electrodynamic resistance of high voltage switchyards build with rigid busbars in case of unsuccessful automatic reclosing.*
Keywords: *rigid busbar; short circuit; electrodynamic forces, automatic reclosing, controlled switching;*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

С развитието на електроенергийните системи нивата на токовете на късо съединение в мрежите високо напрежение значително нарастват. По настоящем, в редица развити страни, се изграждат разпределителни уредби високо напрежение с твърди шини оразмерявани за токове на късо съединение до 80kA.

Себестойността и надеждността на РУ ВН пряко зависи от приетите конструктивно-компановъчни решения. Правилното планиране и оптимално проектиране на РУ ВН е основен фактор влияещ върху технико-икономическите показатели на РУ ВН [4], [9], [23]. От друга страна нивата на т.к.с. оказват значително влияние върху избора на конструктивна форма и размери на компановката на РУ ВН, като при високи стойности на т.к.с. и ограничения в площадката се налага приоритетно прилагане на решения изпълнени с твърди шини [5], [9], [14], [15],

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

[22], [23].

В действащите норми за определяне на механичните въздействия от т.к.с. върху РУ ВН [10], [11] са дефинирани технически изисквания и математически модели за оразмеряване на тоководящи части с твърди шини, базирани на натрупаният опит и знания по темата към момента [5], [22], [25]. В същите са синтезирани и верифицирани изчислителни методи и изисквания за отчитане на нарастването на ЕДС върху тоководящте връзки, изпълнени с твърди шини, в РУ ВН при неуспешно АПВ, определени при използването на модели отчитащи най-лошите от гледна точка на механичното въздействие на т.к.с. изчислителни условия.

В съществуващите практики за планиране и проектиране на РУ по условия за ЕДУ при неуспешно АПВ съществуват ограничен набор от технически решения за ограничаване на ЕДС върху твърдите тоководящи връзки.

Един от тези подходи обхваща секциониране и разделяне работата на електропроводите и оформяне на радиално захранени острови около всяка подстанция (напречно делене), както и делене и секциониране на РУ ВН (надлъжно делене) [7], [8], [16], [21].

Друг подход е свързан с изменения в коструктивно-компановъчните решения и размери, посредством частични или цялостни реконструкции на РУ, частична или цялостна подмяна на носещи апарати и съоръжения с такива с по-висока механична и електродинамична устойчивост, както и увеличаване на междуфазните и намаляване на междуопорните разстояния в компановъчните решения [28].

За отбелязване е и подходът за отчитане на реалното разпределение на т.к.с. и специфичната конфигурация на шинните системи. Същността му се изразява в отчитане на действителните стойности на т.к.с. по отделните участъци на шинните системи и отчитане на специфичното им взаимно разположение. Метода намира приложение при наличие на две и повече системи от събирателни шини със симетрично, асиметрично и пофазно групирано подреждане [9], [25].

Друг начин за увеличаване на ЕДУ се реализира посредством увеличаване на дисперсните сили на затихване на свободните трептения и възможностите за абсорбиране на възникналите трептения [1], [5], [18], [29]. Това се постига чрез:

- прилагане на специална клемна арматура
- използване на едноколконкови подпорни изолатори с по-малка коравина или съставни такива
- използване на стройни и еластични едноколконни строителни конструкции

И на последно място, но не по значимост, е подходът за опитно определяне на ЕДУ при полеви условия [12], [13] ,[19], [28], с отчитане на съответните специфични изисквания за това [2], [13], [19].

2. НАМАЛЯВАНЕ НА ЕДС ПРИ НЕУСПЕШНО АПВ ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛ МОМЕНТА НА ВКЛЮЧВАНЕ

В литературата [3], [5], [10], [18] се разглеждат стандартните предпостав-ки и условия за определяне нарастването на ЕДС вследствие неуспешно АПВ, базирани на дългогодишни изследвания на механичните въздействия на т.к.с. върху РУ ВН с твърди шини, определени с известна доза консерватизъм. От друга страна в последните години бе постигнат сериозен прогрес в разработването на прекъсвачи ВН, техните задвижвания, както и системи за управление и контрол в РУ ВН [17], [20], [24], [26], [27], [30], [31]. Това дава основание за изследване приложението на контролираното включване при неуспешно АПВ по отношение на механичните въздействия от т.к.с. върху твърдите шини в РУ ВН, изложено по надолу в настоящия доклад.

В разглежданията по нататък се приема работа с трифазна система с хоризонтално разположение на токовдящите твърди шини за случая на отдалечено късо съединение, източник на енергия с неограничена мощност [6], [10] и честота на тока 50Hz.

Моментната стойност на големината на тока на трифано к.с. се описва с (2.1).

$$I_{Пт}.f_k(t,\varphi_k,s) \tag{2.1}$$

където функцията $f_k(t,\varphi_k,s)$ се описва с уравнение 2.2.

$$f_k(t,\varphi_k,s)=\sin\left(\omega.t+\varphi_k-\frac{2.\pi}{3}.(s-1)\right)-e^{-\frac{t}{Ta}}.\sin\left(\varphi_k-\frac{2.\pi}{3}.(s-1)\right) \tag{2.2}$$

Безразмерният коефициент ***s*** от уравнение (2.2) заема стойности 1 – при двуфазно к.с. и трифано к.с. на ф.А (крайна), 2 – при трифано к.с. на ф.В (средна), 3 - трифано к.с. на ф.С (крайна).

Моментната стойност на големината на електродинамичната сила при к.с може да бъде описана с уравнение (2.3).

$$F_m=\frac{\mu_0}{2.\pi}.\frac{\left(I_{Пт}\right)^2}{a}.K_i(t,\varphi_k)=F_0.K_i(t,\varphi_k) \tag{2.3}$$

където $К_i(t,\varphi_k)$ е безразмерен коефициент зависещ от ъгъла определящ положението на вектора на тока в момента на възникване на к.с. и момента от началото на к.с. за който се определя сътветната стойност на силата $\mathbf{F_m}$.

От анализа на (2.3) се вижда, че стойността на $\mathbf{F_0}$ е константна величина, чиято стойност зависи единствено от големината на максималната амплитудна стойност на периодичната съставяща на ток на трифазно к.с. и междуфазното разстояние, и която не влияе върху съотношенията на моментните стойности на ЕДС върху отделните фази при различните видове к.с., поради което в анализите по-надолу няма да бъде изписвана.

Моментната стойност на модула на коефициента $\mathbf{К_i}$ при различните видове к.с. се описва със следните уравнения:

- **при двуфазно к.с. (между две съседни фази):**

$$K_{2k}(t,\varphi_k)=\left|-\left(\frac{\sqrt{3}}{2}.f_k(t,\varphi_k,1)\right)^2\right| \qquad (2.4)$$

където с $\sqrt{3}/2$ е отчетена връзката между периодичния ток на двуфазно към трифазно к.с. [6] ,[10] - с оглед привеждането на резултатите към идентични изчислителни условия.

- **при трифазно к.с. на ф.А (крайна фаза):**

$$K_{3kA}(t,\varphi_k)=\left|-f_k(t,\varphi_k,1).\left(f_k(t,\varphi_k,2)+\frac{1}{2}.f_k(t,\varphi_k,3)\right)\right| \qquad (2.5)$$

- **при трифазно к.с. на ф.В (средна фаза):**

$$K_{3kB}(t,\varphi_k)=\left|f_k(t,\varphi_k,2).\left(f_k(t,\varphi_k,1)-f_k(t,\varphi_k,3)\right)\right| \qquad (2.6)$$

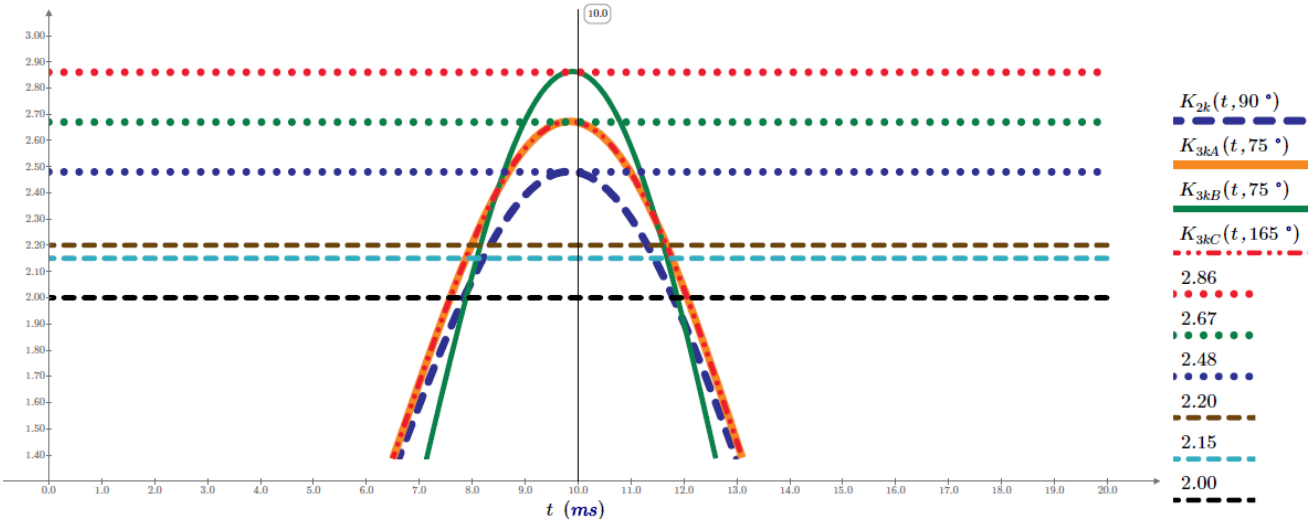
- **при трифазно к.с. на ф.С (крайна фаза):**

$$K_{3kC}(t,\varphi_k)=\left|-f_k(t,\varphi_k,3).\left(f_k(t,\varphi_k,2)+\frac{1}{2}.f_k(t,\varphi_k,1)\right)\right| \qquad (2.7)$$

Максималните изчислени стойности на коефициентите по фази, при съответните ъгли, при които функциите получават максимални стойности, са дадени в табл.2.1 и на фиг.2.1.

Таблица 2.1

т.к.с.	$\varphi_k{}^0$	T_a=0.05 s; t_{MAX}=10 ms;			
		$\lvert K_{MAX\ (2k)}\rvert$	$\lvert K_{MAX\ (3k\text{-}фA)}\rvert$	$\lvert K_{MAX\ (3k\text{-}фB)}\rvert$	$\lvert K_{MAX\ (3k\text{-}фC)}\rvert$
2k	**90**	**2.478**	-	-	-
	270	**2.478**	-	-	-
3k	**75**	-	**2.669**	**2.861**	**0.192**
	165	-	**0.192**	**2.861**	**2.669**
	255	-	**2.669**	**2.861**	**0.192**
	345	-	**0.192**	**2.861**	**2.669**

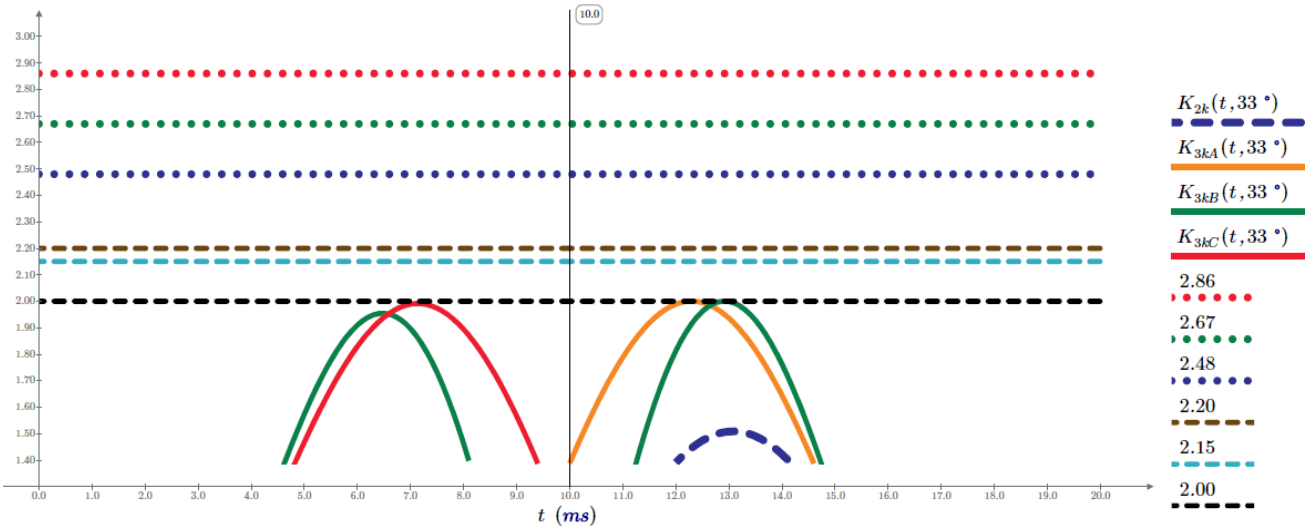


Фиг.2.1. *Графична зависимост на максималните стойности на модула на коефициентите при различните видове к.с.*

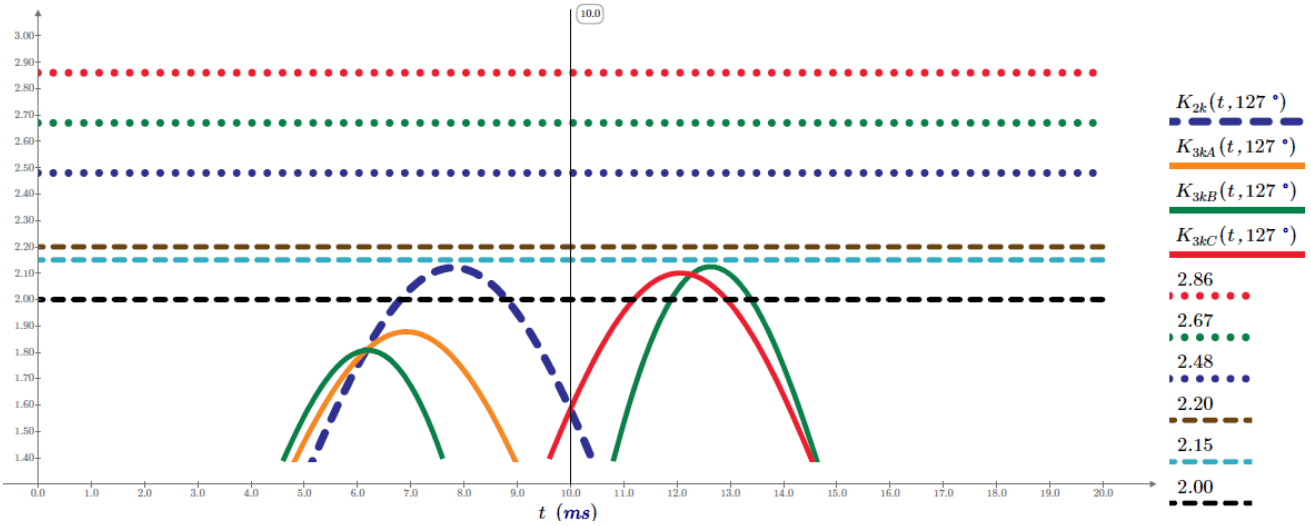
Решенията на (2.4)÷(2.7) по отношение на оптимизирания начален ъгъл на включване на тока в момента на възникване на к.с., при който стойностите на коефициентите на отделните фази са с най-малка максимална стойност и за четирите разглеждани уравнения (2.4)÷(2.7) са дадени в табл.2.2 и на фиг.2.2 и фиг.2.3.

Таблица 2.2

K_{MAX}	$\varphi_k{}^0$	T_a=0.05 s;			
		$\lvert K_{MAX\ (2k)}\rvert$	$\lvert K_{MAX\ (3k\text{-}фA)}\rvert$	$\lvert K_{MAX\ (3k\text{-}фB)}\rvert$	$\lvert K_{MAX\ (3k\text{-}фC)}\rvert$
2,0	**33**	**1,5**	**2,0**	**2,0**	**2,0**
2,2	**127**	**2,2**	**1,9**	**2,2**	**2,1**
2,0	**213**	**1,5**	**2,0**	**2,0**	**2,0**
2,2	**307**	**2,2**	**1,9**	**2,1**	**2,2**



Фиг.2.2. *Графична зависимост на максималните стойности на модула на коефициентите при различните видове к.с. при ъгъл на включване* $\varphi_k=33^0\equiv213^0$



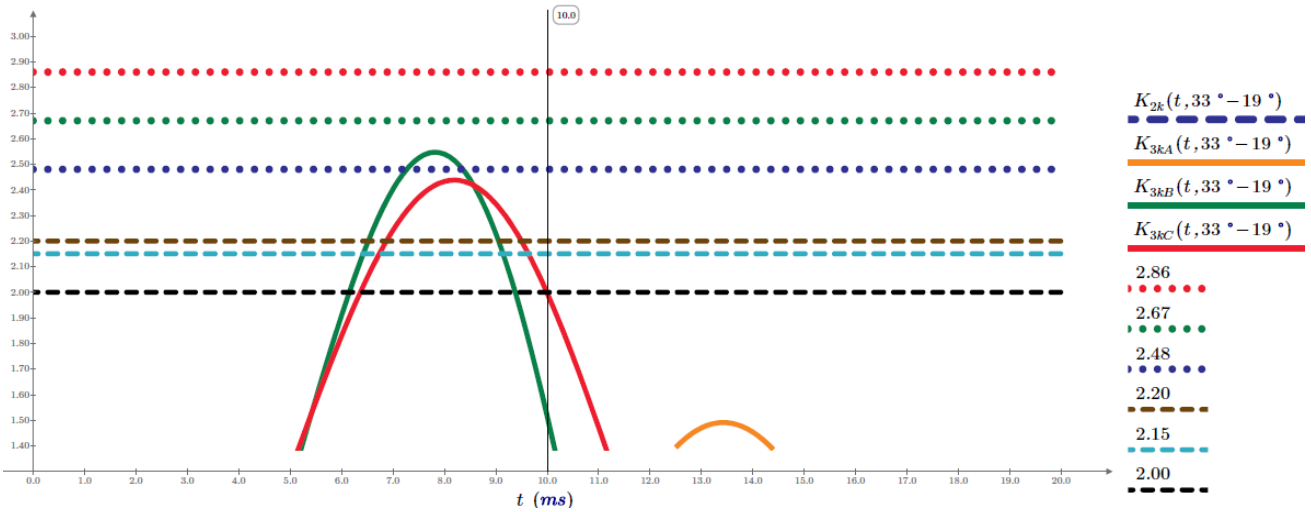
Фиг.2.3. *Графична зависимост на максималните стойности на модула на коефициентите при различните видове к.с. при ъгъл на включване* $\varphi_k=127^0\equiv307^0$

Отчитайки факта, че към системите с контролирано включване се предявяват високи изисквания за постигане на точност по отношение момента на включ-

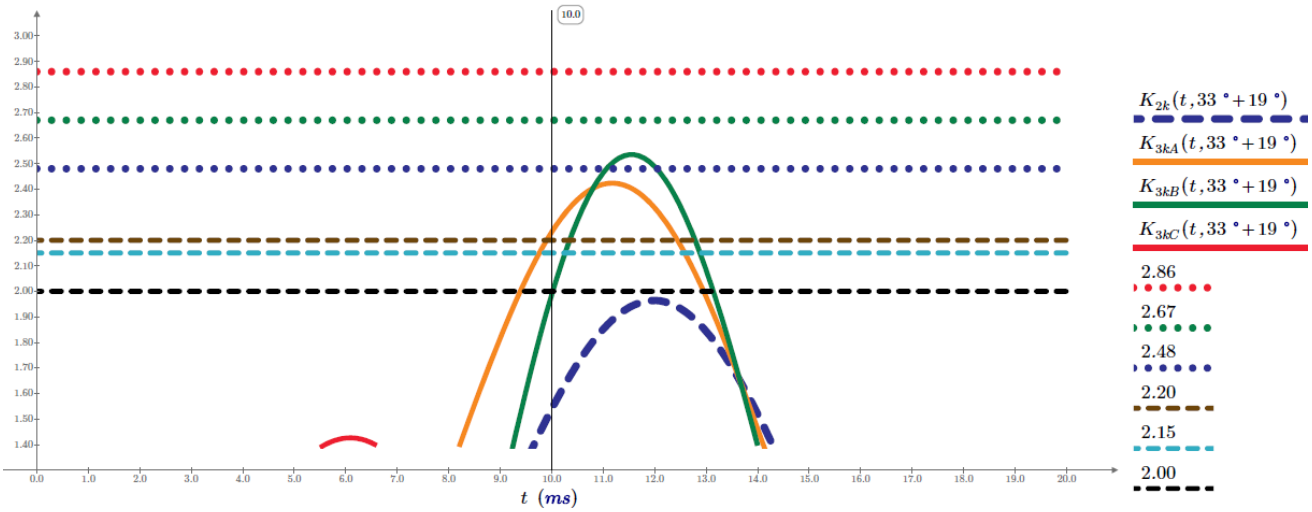
ване, се допуска девиация до ±5% (±1ms) [17] ,[27], [30].
Тъй като това условие води до изменение момента на включване с около $\pm 19^0$, стойностите на коефициентите нарастват. Поради принципните различията във функциите описващи тяхната зависимост от началния ъгъл на к.с. $\boldsymbol{\varphi_k}$, с оглед изравняване на граничните стойности е необходимо оптималният ъгъл на включване да бъде коригиран до стойност $\boldsymbol{\varphi_k \pm \Delta\varphi_k}$, както е показано в табл.2.3 и на фиг.2.4÷ фиг.2.7.

Таблица 2.3

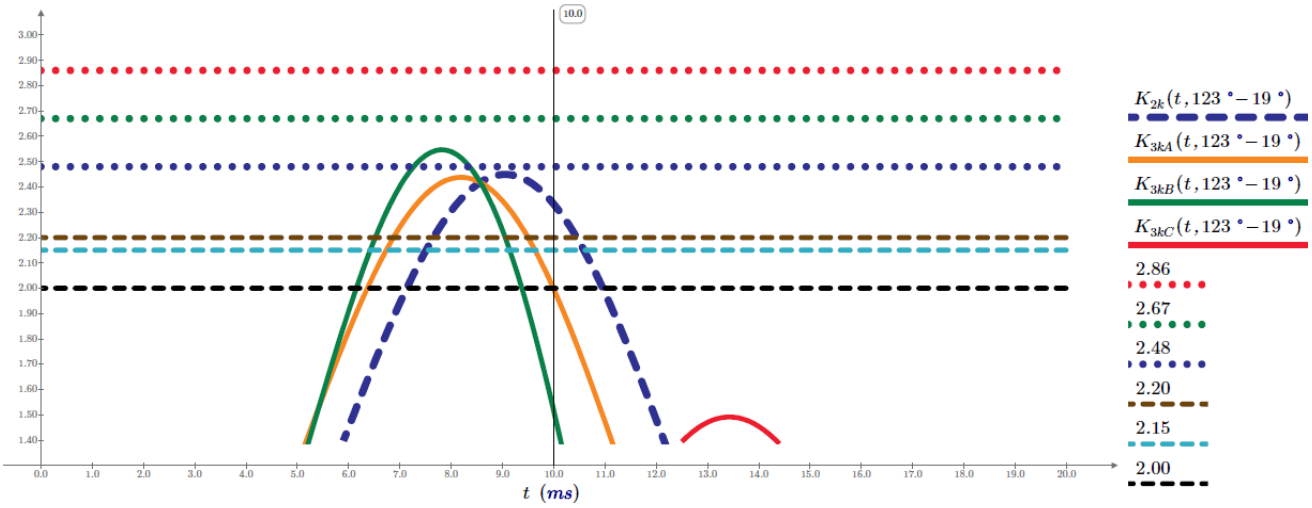
K_{MAX}	$\varphi_k \pm \Delta\varphi_k{}^0$	T_a=0.05 s;		
		K_{MAX} $\varphi_k \pm \Delta\varphi_k - 19^0$	K_{MAX} $\varphi_k \pm \Delta\varphi_k{}^0$	K_{MAX} $\varphi_k \pm \Delta\varphi_k + 19^0$
2,55	**33**	**2,55**	**2,0**	**2,55**
2,55	**123**	**2,55**	**2,2**	**2,55**
2,55	**213**	**2,55**	**2,0**	**2,55**
2,55	**303**	**2,55**	**2,2**	**2,55**



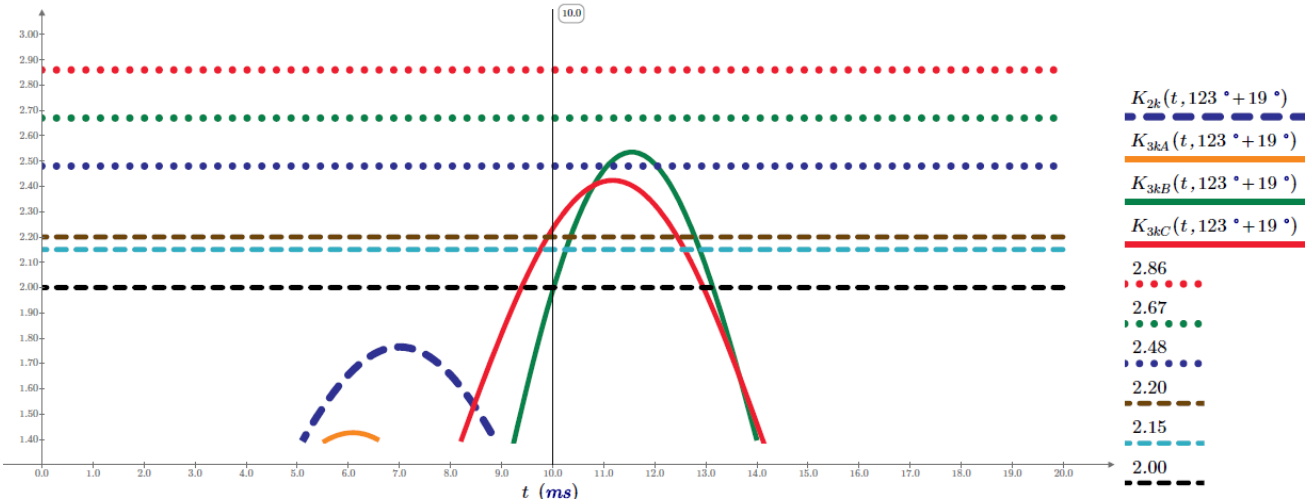
Фиг.2.4. *Графична зависимост на максималните стойности на модула на коефициентите при различните видове к.с. при ъгъл на включване $\varphi_k = 14^0 \equiv 194^0$*



Фиг.2.5. *Графична зависимост на максималните стойности на модула на коефициентите при различните видове к.с. при ъгъл на включване $\varphi_k = 52^0 \equiv 232^0$*



Фиг.2.6. *Графична зависимост на максималните стойности на модула на коефициентите при различните видове к.с. при ъгъл на включване* $\varphi_k = 104^0 \equiv 284^0$



Фиг.2.7. *Графична зависимост на максималните стойности на модула на коефициентите при различните видове к.с. при ъгъл на включване* $\varphi_k = 142^0 \equiv 322^0$

3. АНАЛИЗИ НА РЕЗУЛТАТИТЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

От анализа на получените резултати се получават следните зависимости:

- **при контролирани включвания с ъгли съгласно табл.2.2 в случай с неуспешно АПВ:**

Електродинамичните усилия между тоководящите твърди шини намаляват с ***30%*** за ъгли на включване 33^0 и 213^0 и с ***23%*** за ъгли на включване 127^0 и 307^0 при запазване на разчетната стойност на трайния ток на к.с. – $\boldsymbol{I_П}$.

При съществуваща изграденост на тоководящи връзки с твърди шини допустимият ток на к.с. по отношение на ЕДУ нараства до

$I_П . \sqrt{\frac{2{,}861}{2{,}0}} = 1{,}20 . I_П$ за ъгли на включване 33^0 и 213^0, и

$I_П . \sqrt{\frac{2{,}861}{2{,}2}} = 1{,}14 . I_П$ за ъгли на включване 127^0 и 307^0.

- **при контролирани включвания с ъгли съгласно таблица 2.3 (с от-**

читане на толеранс по отношение моментна на включване до ±5% (±1ms)) в случай с неуспешно АПВ:

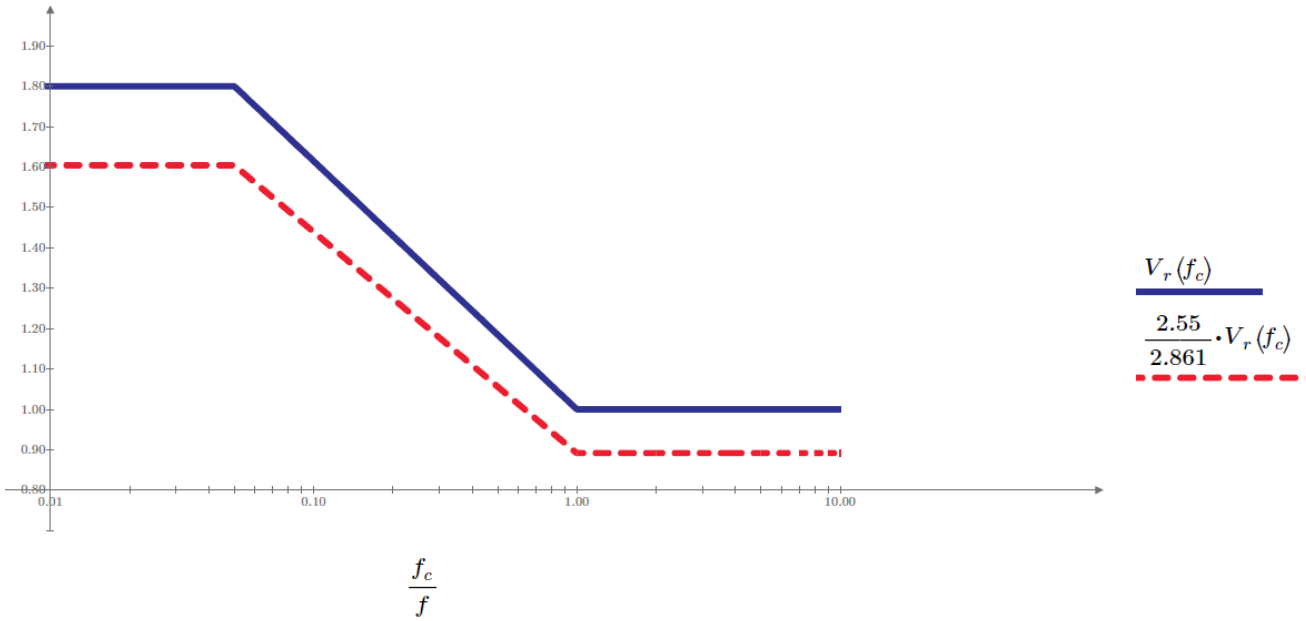
Електродинамичните усилия между тоководящите твърди шини намаляват с ***11%*** за ъгли на включване $33^0 \pm 19^0$, $213^0 \pm 19^0$, $123^0 \pm 19^0$ и $303^0 \pm 19^0$ при запазване на разчетната стойност на трайния ток на к.с. – $\boldsymbol{I_П}$.

При съществуваща изграденост на тоководящи връзки с твърди шини допустимият ток на к.с. по отношение на ЕДУ нараства до

$$I_П \cdot \sqrt{\frac{2{,}861}{2{,}55}} = 1{,}06 . I_П \text{ за ъгли на включване } 33^0 \pm 19^0,\ 213^0 \pm 19^0,\ 123^0 \pm 19^0 \text{ и } 303^0 \pm 19^0.$$

С нарастване на толеранса ефектът от контролираното включване намалява значително.

Ако моделираме графичната зависимост за определяне на фактора отчитащ нарастването на ЕДС в следствие неуспешно АПВ $\boldsymbol{V_r}$ – фиг.5 от стандарта [10], така че в същата да се отчете възможността за контролирано включване, то същата получава вида посочен на фиг.2.8 с червена прекъсната линия. Това дава възможност за директното прилагане на опростения изчислителен метод посочен в [10] в комбинация с приложената коригирана фиг.2.8 за определяне на ЕДУ на РУ ВН при неуспешно АПВ и контрол момента на включване на прекъсвача.



Фиг.2.8. *Графична зависимост на коефициента* $\boldsymbol{V_r}$ *при наличие на АПВ с неконтролирано (плътна синя линия и ъгли на включване съгласно* ***таблица 2.1****) и контролирано (червена прекъсната линия и ъгли на включване съгласно* ***таблица 2.3****) включване на прекъсвача*

Както се вижда от фигурата, най-висока ефективност от прилагането на метода се постига в честотния диапазон на трептения на шините от 0,5÷3,0Hz, след което ефективността започва да намалява. Тук е мястото да се отбележи факта, че за РУ за напрежение 110kV и по-високо собствената честота на трептене най-често се изменя в диапазона 1÷10 Hz [3], като с нарастване на номиналното нап-

режение, поради увеличената маса и дължина между опорите, честотата намалява. За приложенията на твърди шини в нашата страна собствената честота рядко надхвърля 3÷5Hz.

Предложеният метод може да намери приложение както при изграждането на нови РУ ВН, така и при необходимост от повишаване на ЕДУ на съществуващи такива с оглед намаляване на необходимите инвестиции затова. Разбира се към прилагането му следва да се пристъпва след технико-икономически и вероятностен анализ, оценка на приемливите нива на риска от аварии при неправилно заработване, както и възможностите за тяхното настъпване , за всеки отделен случай на приложение. Методи за такава оценка са дадени в [25] ,[26]. В този случай следва да се търси компромис между увеличаването на риска от настъпване на авария и намаляването на стойността на необходимите инвестиции [24], [25], [26].

ИЗПОЛЗВАНИ ОЗНАЧЕНИЯ И СЪКРАЩЕНИЯ

- *ω,rad – ъглова честота*
- *φ_k - ъгъл, определящ положението на вектора на тока във фаза **A** в момента на възникване на късото съединение*
- *f = 50 Hz – честота на ЕЕС*
- *f_c, Hz – собствена честота на трептене на шинната конструкция*
- *$I_{Пm}=\sqrt{2}I_П$, A – максимална амплитудна стойност на периодичната съставяща на тока на трифазно к.с.*
- *K_i – изчислителен коефициент на силата*
- *t, s – отрязъка от време от настъпването на к.с. до разглеждания момент*
- *T_a, s – времеконстанта на затихване на периодичната съставка на тока*
- *V_r – динамичен коефициент отчитащ отношението на динамичната и статичната сили върху опората при неуспешно АПВ* [10]
- *2k – двуфазно късо съединение*
- *3k – трифазно късо съединение*
- *АПВ – автоматично повторно включване*
- *ВН – високо напрежение*
- *ЕДУ – електродинамична устойчивост*
- *ЕДС – електродинамични сили*
- *ЕЕС – електроенергийна система*
- *к.с. – късо съединение*
- *РУ – разпределителна уредба*
- *т.к.с. – ток на късо съединение*

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бурванов К. И.; *Особености при проектирането и внедряването на твърда ошиновка в разпределителни уредби високо напрежение*; ЕНЕРГЕТИКА; 2012;#6: p. 37-51.

[2] Бурванов К. И.; *Изпитване на твърда ошиновка в разпределителни уредби високо напрежение*; Годишник на Технически Университет - София; 2013;#Том 63; книга 6: p. 31-40.

[3] Васильев А. А.; *Электрическая часть станций и подстанций*; 1990.

[4] Двоскин Л. И.; *Схемы и конструкции распредельителных устройств*; Энергоатомиздат - Москва; 1985.

[5] Долин А. П., Г. Ф. Шонгин; *Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой*; Энергоатомиздат - Москва; 1988.

[6] Етърски С. И.; *Електрическа част на електрически централи*; Техника - София; 1994.

[7] Миладинов В., Л. Седмаков; *Относно схемите на страна 110kV на подстанциите 400/110kV*; ЕНЕРГЕТИКА; 1976;#10: p. 29-30.

[8] Радулов Л.; *Ниво на токовете на късо съединение в нашата електрическа система през 1976г.*; ЕНЕРГЕТИКА; 1977;#5-6: p. 34-36.
[9] Хинков Д.; *Проектиране на електрически разпределителни уредби*; София; 1994.
[10] БДС EN 60865-1:2012 (IEC 60865-1:2011) Токове на късо съединение. Изчисляване на въздействията. Част 1: Определения и методи за изчисляване (Short-circuit currents Calculation of effects Part 1: Definitions and calculation methods).
[11] НАРЕДБА № 3 / 2004г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.
[12] Babisci G.,G. Ppirovano, F. Tavano; *ENEL 380 kV substations: short-circuit uprating of rigid busbars systems and of flexible bundled conductors connections between components*; CIGRÉ 1998 : 23-108: p. 1-9.
[13] Carlini E.,M. L. Crociani,E. Colombo,G. Pucci,D. Falorni,A. Freddo, V. Iuliani; *Upgrading of the short-circuit power of a 380 kV substation: problems to cope and possible solutions in a unified context*; CIGRÉ 2010 : B3-213: p. 1-11.
[14] Deter O.,A. Terhorst,N. Stein,W. Lehmann, W. Rameil; *Influence of the prospective very high load and short-circuit currents on outdoor substation design for the highest system voltage of the German interconnected grid*; CIGRÉ 1976 : 23-05: p. 1-13.
[15] Dürschner V. R., E. Hemmeter; *Schaltanlagen in Rohrbauweise für 220 bis 400kV*; Siemens-Zeitschrift 1970;#1: p. 15-22.
[16] Ershevic V. V.,L. F. Krivushkin,B. N. Neklepaev,V. D. Shlimovich, G. A. Slavin; *Short-circuit current levels and basic concepts for limiting them*; CIGRÉ 1982 : 23-09: p. 1-4.
[17] Grijp M. H. B. d.; *Controlled switching in high voltage power networks : case studies in the South African and Dutch transmission networks*; Eindhoven University of Technology Group Electrical Energy Systems; 1993: p. 281.
[18] Hosemann G., D. Tsanakas; *Dynamic short-circuit stress of bus-bar structures with stiff conductors. Parametric studies and conclusions for simplified calculation*; ELECTRA 1980;#68: p. 37-64.
[19] Stefanik W.,G. A. Votta, J. M. Stipcevich; *Short Circuit Test on a 3¢, 230kV Rigid Bus Assembly*; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; 1979;#3(PAS-98): p. 1037-1043.
[20] Thomas R.; *Controlled Switching of High Voltage SF6 Circuit Breakers for Fault Interruption*; Chalmers University of Technology Department of Electric Power Engineering, Sweden; 1994: p. 259.
[21] Tremouille G.,A. Parisot, H. Imagawa; *Short circuit uprating, methodology throughout the diversity of required skills - On behalf of B3-23*; CIGRÉ 2012 : B3-209: p. 1-15.
[22] CIGRE WG 23.11 Brochure 105: The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Rigid and flexible bus-bars). 1996. p. 1-186.
[23] CIGRE WG 23.03 Brochure 161: General guidelines for the design of outdoor AC substations. (2nd version). 2000. p. 1-55.
[24] CIGRE WG A3.07 Brochure 262: Controlled Switching of HVAC CBs: Benefits & Economic Aspects. 2004. p. 1-34.
[25] CIGRE WG 23.03 Brochure 214: The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Part II). 2002. p. 1-207.
[26] CIGRE WG A3.07 Brochure 263: Controlled switching of HVAC CBs - Guidance for further applications including unloaded transformer switching, laod and fault interuptic and circuit-breaker uprating. 2004. p. 1-56.
[27] CIGRE WG A3.07 Brochure 264: Controlled switching of HVAC circuit breakers - Planning, Specifications & Testing. 2004. p. 1-56.
[28] CIGRE WG B3.23 Brochure 532: Substation Uprating and Upgrading. 2013. p. 1-132.
[29] IEEE Std 605™-2008 (incl. IEEE Std 605a-2010) IEEE Guide for Bus Design in Air Insulated Substations.
[30] *TF 13.00.1 Controlled switching. A state of the art survey. Part I*; ELECTRA; 1995;#162: p. 64-96.
[31] *TF 13.00.1 Controlled switching. A state-of-the-art survey. Part II*; ELECTRA; 1996;#164: p. 38-61

Автор: маг. инж. Калоян Бурванов, катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: *K_Burvanov@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2016г. **Рецензент**: доц. д-р Димитър Богданов

ПРОЕКТИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СХЕМИ СЪОБРАЗНО ДЕЙСТВАЩИТЕ СТАНДАРТИ

Юлиан Рангелов, Николай Николаев, Йончо Каменов

Резюме: *Проектирането, изграждането и експлоатацията на системата от първични и вторични съоръжения в електроенергийните обекти е невъзможно без наличието на документация, съставена при спазването на ясни правила. Съществена част от тази документация е комплексът от различни видове схеми, описващи принципите на действие, функционалните възможности и изискванията при монтаж на апаратите, съединителните клеми и връзките с първичното оборудване. Целта на публикацията е предизвикването на дискусия относно изучаването, въвеждането и използването на буквено-цифрови означения в проектирането на електроенергийни обекти по европейски и американски стандарти.*
Ключови думи: *Стандарти, електрически схеми, проектна документация, буквено-цифрови означения*

DESIGN OF ELECTRICAL CIRCUITS IN ACCORDANCE WITH THE RELEVANT STANDARDS

Yulian Rangelov, Nikolay Nikolaev, Yoncho Kamenov

Abstract: *The design, construction and operation of the primary and secondary equipment in power plants and substations is impossible without the presence of technical documentation, created by following predefined and clear rules. Significant part of this documentation consists of different drawings, describing the operating principles, functional capabilities and requirements for equipment installation, terminals and wiring of the equipment. The aim of the paper is to start a discussion regarding the study, introduction and application of reference designations in the design of power plants and substations with compliance to European and American standards.*
Keywords: *Standards, wiring diagrams, project documentation, alphanumeric designations*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Проектирането на електрически схеми е най-тривиалната инженерна задача от гледна точка на ежедневните ни необходимости от онагледяване на конкретни схемни решения. От друга страна това е отговорен процес, тъй като схемите се създават индивидуално или от колектив, а след това трябва да се „четат“ от множество ползватели, като при това е неприемливо да бъдат разбирани неправилно. Чертането и използването на електрически схеми е неразделна част от обучението на всеки електромонтьор или електроинженер навсякъде по света.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Поради изключителната си важност за унифицирането на електрическите схеми са създадени редица стандарти [1,2,3], книги [4], учебни помагала [5,6,7], публикации, проектни разработки [8,9], интернет страници [10,11], CAD каталози [12] и др. Идеята на тази публикация е да покаже гледна точка относно миналото, настоящето и бъдещето в използването на български и световни стандарти при съставянето на електрически схеми.

2. СТАНДАРТИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ СХЕМИ, ИЗПОЛЗВАНИ В БЪЛГАРИЯ КЪМ НАСТОЯЩИЯ МОМЕНТ

За да се съсредоточи вниманието върху стандартите, свързани с използването на буквено-цифрови означения, умишлено е игнорирана темата за графичните означения. При тях в доста по-малка степен се срещат фрапиращи различия. Налична е унификация, важаща в цял свят с някои изключения в американския стандарт [13]. При стандартите, свързани с буквено-цифрови означения общоприетите концепции в Европа и Америка се различават и се налага да им се обърне отделно внимание.

Българският институт по стандартизация (БИС) е националният орган за стандартизация в Република България. в него членуват фирми, организации и институции, чиито интереси са свързани с дейността по стандартизация [14].

От 2006та година е в сила новия закон за националната стандартизация [15]. Според чл. 5, ал. 1 - българските стандарти се прилагат доброволно. Това на практика освобождава от отговорност за спазване на фиксирани държавни правила при разработването на схемна документация. Закона допуска позоваването на стандарти в нормативни актове (например Наредби) само когато с нормативния акт се въвежда европейско право (чл. 5, ал. 2). В допълнение - Нормативен акт може да препраща към български стандарти, които въвеждат европейски или международни стандарти, само когато са въведени и издадени в превод на български език и при спазване изискванията на чл. 57. Той гласи, че въвеждането на европейски и международни стандарти, към които препращат нормативни актове, съдържащи технически изисквания, се финансира от органите на изпълнителната власт, които са отговорни за разработването и прилагането на тези нормативни актове. В закона са правени изменения през 2009, 2010 и 2012та година, касаещи най-вече устройството и управлението на БИС

От изложеното следва, че според българското законодателство стандартите са нужни само когато нормативен акт, съдържащ технически изисквания, какъвто е, например Наредбата за устройство на електрическите уредби и електропроводни линии въвежда европейско право [9].

Във връзка с темата на публикацията от значение са стандартите в табл.1

Стандартът БДС 2.720:1980 класифицира видовете електрически схеми, като ги разделя в четири групи

Група 100 – включва структурни (101) и функционални (102), като вторите са различни с това, че в някои от блоковете

Група 200 – включва принципни (201) и еквивалентни (202);

Група 300 – на съединенията (301), обща схема на съединенията (302); схема за включване (303);

Група 400 – на разположението (401), на електросъоръженията и инсталациите в

проектите (402), на електроснабдяването и връзките (403).

Таблица 1. Стандарти за означения в електрическите схеми

№	Номер	Статус	Заглавие	Забележка
1.	БДС 2.720:1980	Действащ	ЕСКД. Схеми електрически. Правила за изпълнение	-
2.	БДС 2.726:1982	Отменен	Означения условни за проводници и контактни съединения на електротехнически елем. и означения	БДС EN 60445:2010 го заменя и отменя на 2013-11-01
3.	БДС 2.737:1982	Отменен	Означения буквено-цифрови в електрическите схеми	БДС EN 81346-1:2009 го заменя и отменя на 2012-09-20
4.	БДС 2.756:1988	Действащ	Система за означаване на вериги в електрическите схеми	-
5.	БДС EN 60445:2010	Действащ	Идентификация на изводи на съоръжения и на изводни краища на проводници и на проводници	Стандартът е на английски. Преведена е отменената версия от 1999
6.	БДС EN 81346-1:2009	Действащ	Принципи на структуриране и идентификационни означения. Част 1: Основни правила	Само на английски
7.	БДС EN 81346-2:2009	Действащ	Принципи на структуриране и идентификационни означения. Част 2: Класификация на обекти и кодове на класовете	Само на английски

В общи линии електрическите схеми, които могат да се видят в учебната литература, научни публикации и проектна документация влизат в рамките на стандарта, без да се използва предложеното кодиране и точното наименование на видовете схеми.

Стандартът БДС 2.726:1982 заменен от европейския БДС EN 60445:2010 фиксира буквено-цифровите означения на проводниците в трифазни системи и еднофазни системи (L1, L2, L3). Двата стандарта са като цяло идентични, но отменения стандарт предоставя възможност за наименование на фазите да се използват буквите A, B и C. Новият стандарт дава и цветни кодове за разпознаване на проводниците. Във всички класически български учебници в областта на електроенергетиката трите фази се означават с буквите A, B и C, а например в Наредба №3 се използват означенията по стандарт (L1, L2, L3).

Стандартът БДС 2.756:1988 се базира на отменения БДС 2.726:1982 и дава правила за номериране на възли в променливо- и постояннотокови вериги и е основа за номерирането на разгънати схеми от вторични вериги за управление и измерване. Тук възниква противоречие с БДС EN 60445:2010 тъй като буквите A, B и C са в основата на маркирането на разгънати - токови и напреженови вторични вериги.

За буквено-цифровите означения до влизането в сила на БДС EN 81346:2009 се използва БДС 2.737:1982. Той естествено напълно съвпада със стандарта СТ на СИВ 2182-80 и ГОСТ 2.710-81, който е действащ в Русия. По този стандарт са надписани електрическите схеми в българските учебници, писани след 82ра година. Най-незасегнати от промените в стандартите остават проектите и използваните означения в реалните електроенергийни обекти, поради нормалната за бранша консервативност. Използва се разработената от НИППИЕС „Енергопроект“ система за маркиране на първични и вторични вериги с букви на кирилица. Претенции за използване на същата система за обозначаване имат и диспечерските управления за да се запази формата на комуникация с дежурните по обекти и избягването на грешки. От друга страна новия стандарт БДС EN 81346 бавно започва да навлиза в българската енергетика, чрез чуждестранни фирми, дос-

тавчици на оборудване, които работят по него. В сферата на релейните защити и по-точно в документацията, която съпровожда всеки продукт масово се използва американския IEEE C37.2 Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms and Contact Designations (Буквено-цифрови означения и акроними на функционалните възможности на устройствата и контактните съединения в електроенергетиката). Той е много удобен с това, че с поредица от цифри кратко и ясно може да се опише сложната функционалност на съвременен цифров релеен комплект.

Като обобщение на написаното до тук може да се каже следното: Българските учебници в областта на енергетиката са написани по руски стандарт, базиран на латински букви; В бранша се работи със система за маркировка, базирана на кирилица. Техническите средства и проектите, които идват от Европа са по новите изисквания на 81346 и IEEE C37.2.

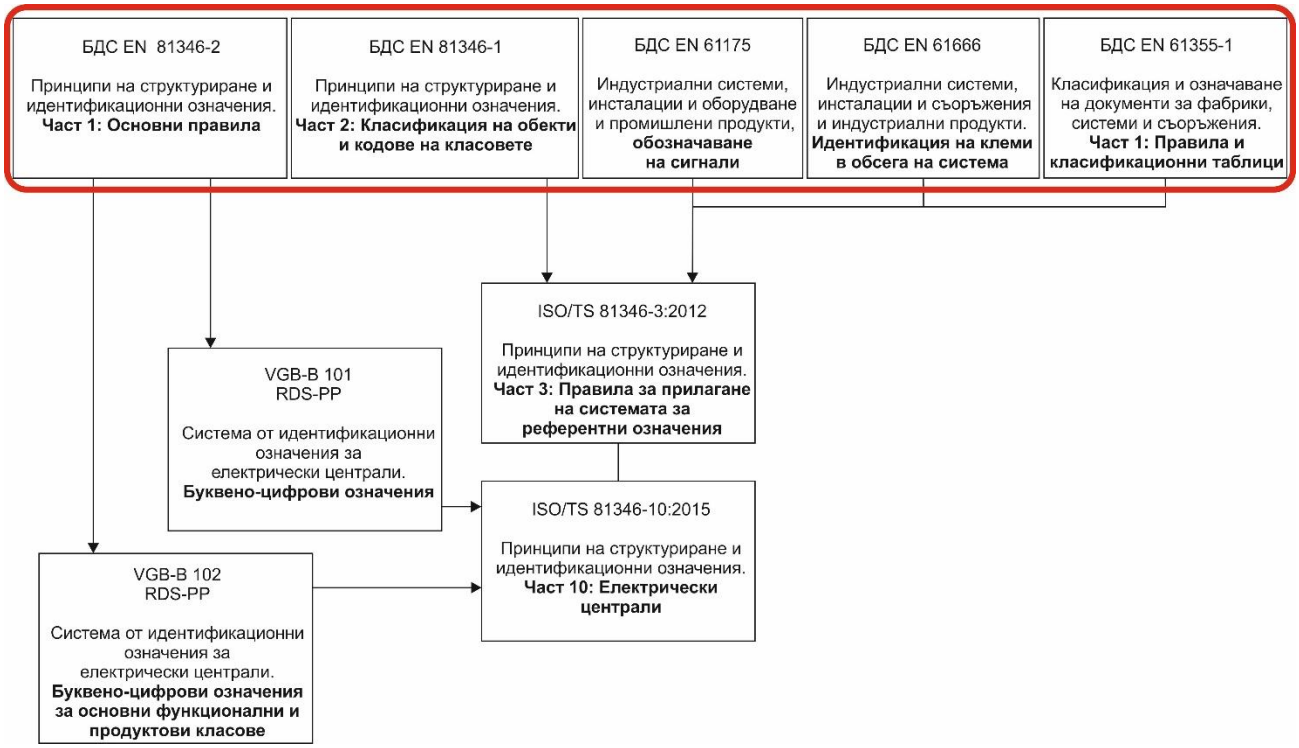
3. ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ В СТАНДАРТА 81346 „ПРИНЦИПИ НА СТРУКТУРИРАНЕ И ИДЕНТИФИКАЦИОННИ ОЗНАЧЕНИЯ

Философията на стандарта е да въведе обща система от референтни наименования (буквено-цифрови означения), важащи във всички браншове на промишлеността [4]. Широко приложение в Европа е намерила системата за номерация на KKS (Kraftwerk-Kennzeichensystem). Това е система за буквено-цифрови означения в електрическите централи, която е разработена от VGB PowerTech (Европейска техническа асоциация за генерация на електрическа и топлинна енергия). Тази организация на практика е най-активния участник в създаването на 81346-10. Стандарта е разпознаваем с името RDS-PP (Reference Designation System for Power Plants). Според информацията на сайта на VGB PowerTech [16], RDS-PP е наследник на KKS. Изискванията към проектантите са нови разработки да се правят на база на RDS-PP, а промени в съществуващи на базата на KKS. На базата на KKS има изградени електрически централи и в България.

Системата RDS-PP използва принципите на структуриране и правилата за референтни наименования за БДС EN 81346 и ги допълва с правила от други стандарти. Също така разширява таблиците с буквени кодове, които предлага 81346. Целта в крайна сметка е независимо от вида на електрическата централа, технологичния процес и етапите на преобразуване на различните видове енергия в електрическа, както и системите за управление, наблюдение и измерване да имат една и съща логика при формиране на буквено-цифровите кодове за обозначаване на съоръженията в периода от проектирането до края на жизнения им цикъл. Към днешна дата връзките между стандартите може да се покаже със структурата на фиг.1. Оградените в червено стандарти са действащи на територията на България.

За да се обясни същността на 81346 е необходимо да се дадат определения за [2]: ОБЕКТ – устройство, съоръжение, предприятие - в процес на разработка, внедряване, използване или извеждане от експлоатация. Обектът може да се отнася до физично или нефизично "нещо", т.е. да има физична или виртуална същност; СИСТЕМА - набор от взаимосвързани обекти, разгледани в определен контекст като цяло и/или отделени от тяхната среда; СТРУКТУРА - организация на взаимоотношенията между обектите на една система, описваща връзки с

и между компонентите; АСПЕКТ - гледната точка, от която се разглежда обекта.



Фиг.1. Структура на еволюцията на стандартите за буквено-цифрово обозначаване в електроенергийни обекти

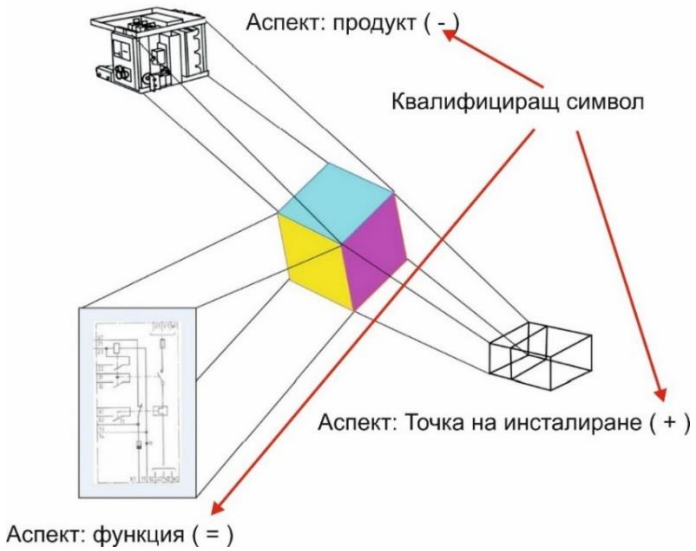
За да може една система да бъде ефективно определена, проектирана, произведена, обслужвана или експлоатирана, системата и информацията за нея обикновено се разделя на части. Всяка от тези части може също да бъде разделена. Това поредно разделение на части и организацията на тези части се нарича „структуриране“.

Според 81346-1 има най-малко три начина за избор на представянето на информацията за дадена система. В стандарта това е известно като представяне на информацията в различни аспекти (фиг.2). Аспектът се явява "филтър" за информацията, с която се работи.

За „фиксиране“ на обекта в даден аспект се използват квалифициращите символи, показани на фиг.2. Стандартът ISO/TS 81346-10:2015 въвежда допълнителни квалифициращи символи според подходящи и действащи стандарти:

- (#) Електроенергиен обект
- (==) Подфункции
- (++) Местоположение
- (**:**) Означение за клема - БДС EN 61666
- (**;**) Означение за сигнал - БДС EN 61175
- (**&**) Означение за документ – БДС EN 61335-1

Въвеждането на аспектите се пояснява лесно с жизнения цикъл на дадена система, както е показано на фиг.3 [4]. Аспектът функция има смисъл, когато трябва да се представи дадена задача в общ план, аспектът продукт е от значение при избора на подходящи компоненти/технически средства за изпълнение на функционалните изисквания. Аспектът място на инсталиране има смисъл по време на изпълнението на проекта и последващата му експлоатация.



Фиг.2. Представяне на обект в определен аспект

Стандартът „изгражда“ буквено-цифровите означения на даден обект чрез три латински букви всяка, от които има определен смисъл. Първата буква определя класа, в който се намира устройството според предназначението си и задачите, които изпълнява. Класификацията е така направена, че да е приложима във всички области на техниката. Например класа „Q“ се отнася до обекти, които управляват енергийни, сигнални или материални потоци или достъп. За да се намери по-нататък точното определение на обекта се използват подкласове, като за обекти, свързани с електрическа енергия се използват букви от „A“ до „E“.

Например при клас „Q“, подклас „A“ присвоява обекта в групата на комутационните устройства, т.е. „QA“ е комутационно устройство в общия смисъл. Когато недвусмислено трябва да се определи какъв е обекта (контактор за ниско напрежение или прекъсвач за високо напрежение) в означението се добавя още един подклас. В случая буквата „A“ се отнася за прекъсвач, „B“ за контактор и „C“ – силов електронен ключ. На фиг.4. е показан пример, как се структурират буквените означения на три най-използваните апарати в електрическите уредби.

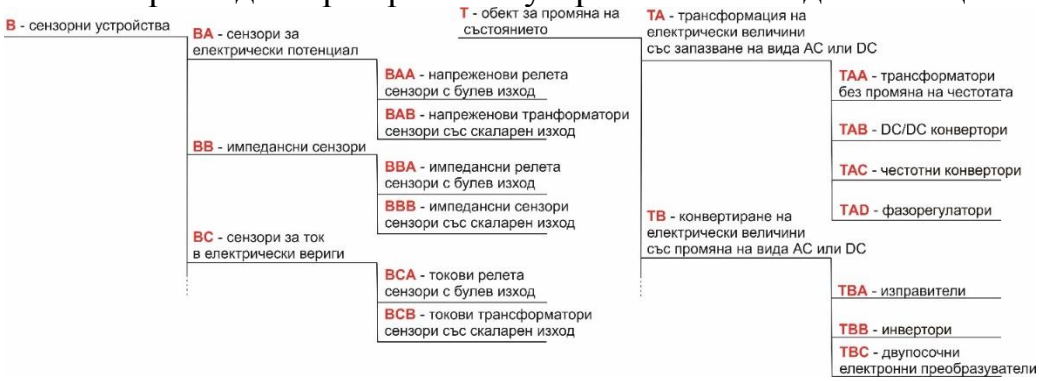
Интересен и случая с измервателните трансформатори. Клас „T“ се отнася за обекти, които извършват трансформация, например на електроенергия или конвертират - изправителни устройства.

Фиг.3. Значение на аспектното представяне според жизнения цикъл на обекта

Работещите в сферата на електроенергетиката са свикнали буквата „Т“ да присъства и в обозначението на измервателните трансформатори, но в 81346 подхода е различен, а за най-консервативно мислещите радикален. Токови и напреженови трансформатори са причислени към клас „В“ – сензорни обекти. На фиг.5 са представени в общ план класовете „Т“ и „В“

Фиг.4. Буквени означения на комутационни апарати за високо напрежение

Ясно се вижда разграничаването на устройства с измервателни функции от технически средства, участващи преноса и потреблението на електроенергия. Според стандарта, представените буквени кодове на фиг. 4,5 могат да се използват в пълния си вид, но могат да се използват и в съкратен вид в зависимост от необходимостта на чертеж да се разграничат устройствата от един и същ клас.

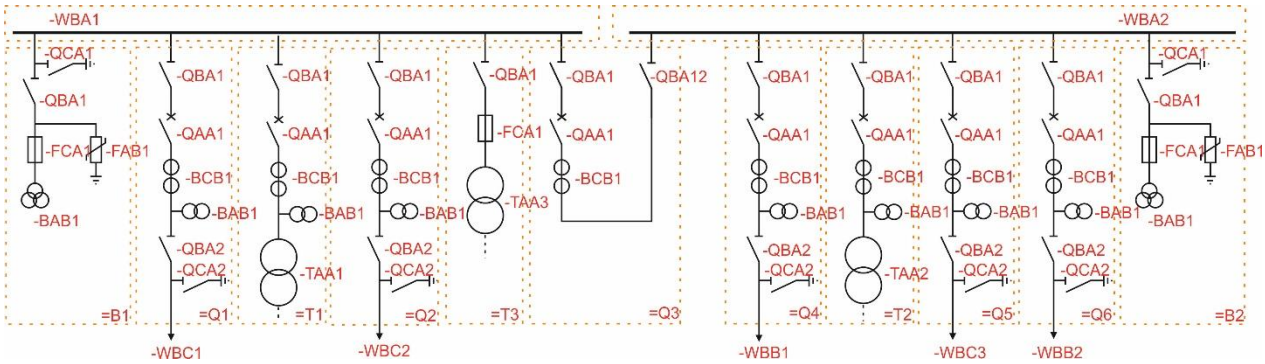


Фиг.5. Буквени означения на сензорни и трансформаторни устройства

По времето на създаването на тази публикация [10] създадоха безплатно приложение за мобилни телефони за дешифриране на буквените означения по стандарта 81346. Според наличните опции в интерфейса на приложението се очаква

то да дава примери от съответната индустрия, за която се отнася референтното означение.

На фиг.6 е показана примерна принципна схема с нанесени референтни означения по 81346. Всяка монтажна единица е означена според функцията си, например „=B“ сензорно устройство (килия мерене). Еднаквите присъединения са номерирани последователно, например „Q1“, „Q2“ и т. н. Всички шинни разединители са номерирани с единица, а линейните с 2. Ако трябва да се говори конкретно за определен прекъсвач се използва пълното означение, например –WBA=Q1–QAA1 или –WBA.Q1.QAA1.



Фиг.6. Принципна схема на разпределителна уредба за средно напрежение

4. IEEE C37.2 СТАНДАРТ ЗА ФУНКЦИОНАЛНИ НОМЕРА, АКРОНИМИ И ОЗНАЧЕНИЯ НА КОНТАКТИ НА ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА В ЕНЕРГЕТИКАТА

Този стандарт е широко използван за описване на функциите на релейните защити, независимо от това къде са произведени. Първата версия на стандарта е издадена през 1928 г. Вместо да се използват букви от латинската азбука за референтни означения на устройствата и функциите, използвани в електрически подстанции и електроцентрали и в инсталации и технически средства за трансформиране на енергия от един в друг вид се използват т. нар. функционални номера от 1 до 99. На по-късен етап, са въведени и акроними, които позволяват чрез стандарта да се описват съвременни електронни устройства и функции със специфично предназначение, например акронима DDR означава „Регистратор на динамични преходни процеси нормален режим (колебания на режимните параметри в диапазона 0,1 до 3 Hz)“. Функционалните номера могат да представят индивидуални или съставни устройства. Те могат да определят функцията на дадено устройство в комплексна техническа система или да определят електрически или друг параметър, на който устройството реагира.

В описанието на функционалните номера, често присъства думата „relay“, и не винаги означава непременно, отделно устройство или единствена функция на устройството.

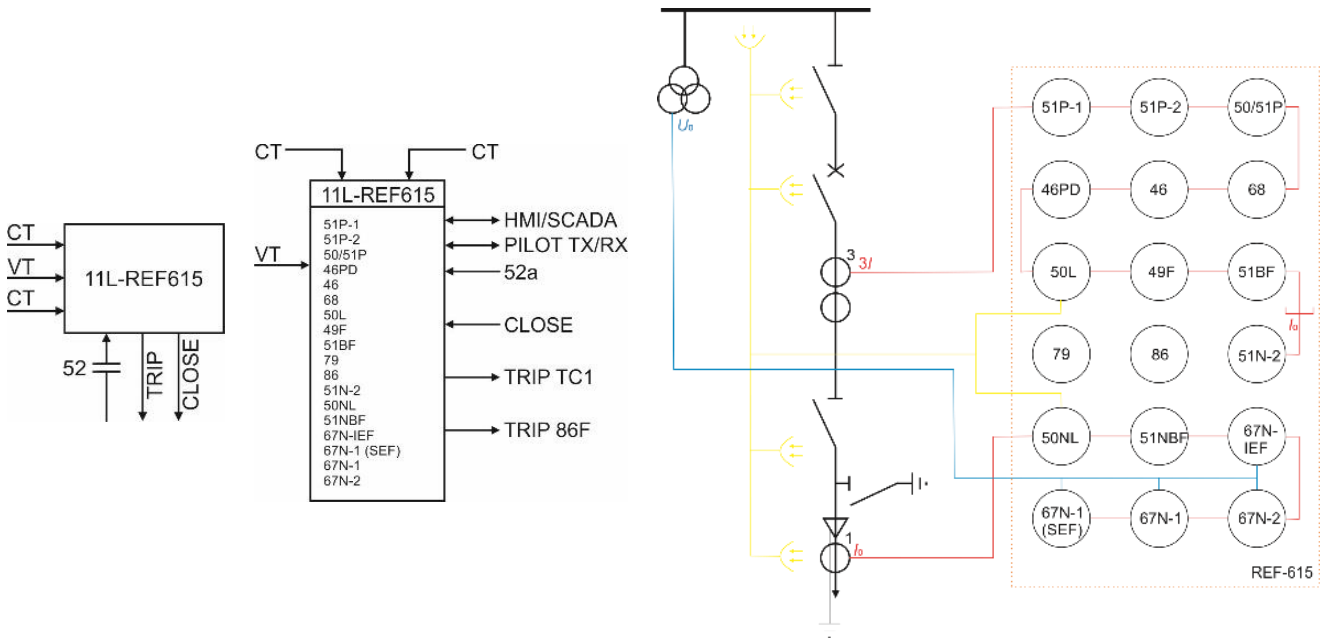
Стандартът въвежда и система от префикси и суфикси, с които се увеличават възможностите за описание на елементи от съставни технически средства.

В табл.2 са описани някои характерни функционални номера, които често могат да се срещнат в документациите към всички цифрови релейни защити

Таблица 2. Значение на функционалните номера по IEEE C37.2:2008

Функционален номер	Значение
11	Мултифункционално / многофункционално устройство
21	Дистанционно реле
32	Посочно мощностно реле
42	Работен (товаров) прекъсвач
44	Автоматично включване на резервно устройство
50	Мигновено максималнотоково реле
51	Времезависещо токово реле за променлив ток
52	Прекъсвач за променлив ток
57	У-во за късо съединение или заземяване - автоматично или ръчно
59	Максималнонапреженово реле
62	Реле за време
67	Посочно максималнотоково реле за променлив ток
68	Блокиращо реле
72	Прекъсвач за постоянен ток
79	Реле за повторно включване за променлив ток - АПВ
83	Автоматично управление на захранващите източници (АВР)
87	Диференциална защита (диференциално защитно реле)
89	Разединител или мощностен разединител

Въвеждат се три вида стандартизирани метода на представяне на технически средства или функционални системи, които в различна степен според необходимостта пояснява характеристиките- „празна кутия“, „кутия списък“ (фиг.7) и „пълна кутия“ [3].



Фиг.7. Методи за изобразяване на цифрови защити

Методът „пълна кутия“ е най-използван от производителите на цифрови защити в съпътстващата документация, защото в компактен вид се визуализират пълните възможности на устройството. Обикновено значението на функционалните номера е представено в съответния документ.

На базата на C37.2 има изградени електрически централи и в България.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отчитайки големия брой ограничения за въвеждане на нови стандарти за буквено-цифрови означения в електроенергийния отрасъл на България и неуспешните опити за промяна на статуквото през годините, би трябвало на такива публикации да не се обръща внимание. Истината е, че темата трябва да присъства в приоритетите на проектантите и преподавателите, а чрез тях и при студентите.
Новите стандарти, така или иначе ще навлизат в ежедневието на българския електроинженер и ако той е предварително подготвен няма да е само наблюдател.
Българският институт по стандартизация трябва да хармонизира международните стандарти ISO/TS 81346-3:2012 и ISO/TS 81346-10:2015, както това са направили сръбските ни съседи, за да могат да се популяризират в по-широк кръг от специалисти в България.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 60445:2010 Идентификация на изводи на съоръжения и на изводни краища на проводници и на проводници
[2] БДС EN 81346-1,2:2009 Принципи на структуриране и идентификационни означения. Част 1: Основни правила; Част 2: Класификация на обекти и кодове на класовете
[3] IEEE Std C37.2-2008 IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations
[4] Balslev, H. A Guide to Reference Designations. DS Handbook 166. Project number M248690. Danish Standards Foundation 2010. 1st edition
[5] Хинков, Д. Ръководство по проектиране на електрически централи. Техника 1977. София
[6] Хинков, Д. Дистанционно управление на електрически централи. ТУ-София 1991. София.
[7] Русева, Сл., К. Папазян, АС. Атанасов, СТ. Петкова. ЕСКД Справочник по конструкторска документация. Техника 1987. София
[8] Нотов, П. Хармонизация на Европейски стандарти, третиращи буквени и графични означения на елементите на преносните и разпределителните електрически мрежи, както и на тези на схемите и на съоръженията в електрическите подстанции и трафопостовете. Договор No ГД-14/2003 г. с Електроразпределение – Столично ЕАД, София
[9] Рангелов, Ю. Обзор на методите за графично и буквено-цифрово означаване на веригите от първична и вторична комутация в електроенергийната система на България. Сборник с научни доклади, pp 83-91.
[10] (http://81346.com/english/) Knowledege Center of Reference Designations
[11] http://myelectrical.com/notes/entryid/24/iec-reference-designations
[12] http://symbols.radicasoftware.com/Index.php
[13] IEEE Std 315-1975 (Reaffirmed 1993) - IEEE Standard American Na-tional Standard Canadian Standard Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams (Including Reference Designation Letters)
[14] http://www.bds-bg.org/ Български институт за стандартизация. Чрез стандартите - винаги крачка напред
[15] Закон за националната стандартизация. В сила от 05.05.2006 г. Обн. ДВ. бр.88 от 4 Ноември 2005 г., изм. ДВ. бр.42 от 5 Юни 2009г., изм. ДВ. бр.97 от 10 Декември 2010г.
[16] https://www.vgb.org/en/ VGB PowerTech - Fachverband der Strom- und Wärmeerzeuger

Автори: Юлиан Рангелов, доц. д-р инж., кат. „ЕЕ“, ЕФ, ТУ-Варна, E-mail address: *y.rangelov@tu-varna.bg*; Николай Николаев, гл. ас. д-р инж., кат. „ЕЕ“, ЕФ, ТУ-Варна, E-mail address: *n.nikolaev@tu-varna.bg*; Йончо Каменов, доц. д-р инж., кат. „ЕЕ“, ЕФ, ТУ-Варна, E-mail address: *j.kamenov@tu-varna.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Димо Стоилов

ПОДДРЪЖКА И ОТКРИВАНЕ НА ПОВРЕДИ ПО ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СЪОРЪЖЕНИЯ С ДРОН

Борислав Бойчев

Резюме: *В работата са разгледани няколко методики за анализ на данни за поддръжка и откриване на повреди в електроенергийните съоръжения с дрон. От направените изследвания се вижда бързият и лесен начин за технически огледи на елементите от въздушна електропроводна линия, ветроенергиен и фотоволтаичен парк.*
Ключови думи: *откриване на повреди в електроенергийните съоръжения, дрон*

MAINTENANCE AND DETECTION OF DAMAGES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS BY DRONES

Borislav Boychev

Abstract: *In the work some methods for data analyzing for maintenance and fault detection in electricity plants with drone are developed. Research shows the quickest and the easiest way for technical inspections of elements of the overhead power line, wind and photovoltaic plants.*
Keywords: *faults locating in the electric equipment drone.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Едно от най-важните мероприятия за качествено и надеждно електроснабдяване е правилната експлоатация и техническата поддръжката на съоръженията за производство, съхранение и пренос на електроенергия [2]. Нарастващият брой вятърни и фотоволтаични централи усложняват техническият им контрол, както и контрола по изградената към тях преносна мрежа. Техническото обслужване се извършва от службите за техническа експлоатация на електроснабдителните предприятия. Целесъобразно е да се използват летящи безпилотни системи – дронове, снабдени с апаратура за наблюдение и измервателни прибори.

2. ОСНОВНА ИНФОРМАЦИЯ ЗА ДРОНОВЕТЕ

Дронът е вид безпилотен летателен апарат. Според броя на двигателите респективно витла, мултироторните системи дроновете биват: квадрокоптери – 4 витла, хексакоптери – 6 витла, окотокоптери – 8 витла и т.н. [4].

Броят на витлата в дроновете е четно число и две по две те се въртят срещупо-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ложно. Предимствата на тези мултироторни системи пред останалите безпилотни летателни апарати се изразяват в изключителната маневреност, зависване на място в определена точка в пространството, много малки габарити, лесна преносимост, неизискване на големи по площ площадки за излитане и кацане. С навлизането и широката употреба на GPS системите, навигацията и позиционирането на тези дронове стана много прецизно. Също така появата на други видове сензори, като оптични, ултразвукови, предпазват мултироторните системи от сблъсък с предмети, препятствия и други летящи обекти. Благодарение на гореспоменатите предимства в последните години дроновете започнаха да се използват за промишлени цели, като носят допълнително научно-изследователско оборудване за инспекции и анализ [7, 8, 9]. С развитието на приложенията за таблети и смартфони стана възможно още по-лесно управлението на полетите на дроновете, предаването на телеметрични данни в реално време към пилота или към команден център, както и анализа на събраните данни от уредите на борда и в по-късен момент от времето.

Благодарение на многобройните приложения, които излязоха напоследък и фърмуерите на летящите платформи, стана възможно тези апарати да изпълняват автономни полети, предварително програмируеми от пилота, изпълнявайки поставените задачи с научни изследвания, респективно откриването на повреди.

Дронът, подходящ за откриване на повреди в електропреносната мрежа, е автономен, доколкото е програмиран за самостоятелно изпълнение на задачи, които са потенциално опасни за човек, но той може да бъде и дистанционно управляем. Снабден е със система за контрол на полета, GPS система, барометричен датчик за височинен контрол и магнитен електронен компас за стабилизация и точно позициониране в пространството. Чрез GPS системата в навигацията се отчита точното позициониране на дрона спрямо земните координати, чрез височинният контрол се отчита височината от точката на излитане, а чрез магнитният компас се отчита ъгъла на завъртане на носа на дрона. Дронът е самонивелираща се платформа благодарение на 3D жироскопа и ъгловия акселератор, вграден във полетния контролер, т.е. при отсъствие на команди от пилота или от софтуера платформата се самонивелира. Микроконтролерът проверява ъгловата скорост на всеки един от двигателите 300 пъти в секунда и съобразно информацията, постъпваща от ъгловия акселератор, коригира ъгловата скорост на въртене на всеки един електродвигател. На всеки двигател е монтирано витло, което се върти между 3000 и 6000 об./мин. и създава подемна сила в съответствие със скоростта си.

Дронът е оборудван със система за обратна връзка, телемтрия, чрез която пилота или оператора получава всички данни за състоянието му в реално време, неговата позиция и данни за задачата, която изпълнява. По време на полета особено важно е пилотът да следи разряда на батерията. При определени нива на разряд на батерията съществуват вградени защити, като звуково-светлинна индикация, автоматично връщане към точката на излитане и самокацане. Върху

летящата платформа могат да бъдат поставени допълнителни датчици (ултразвукови или камери) за предпазване от препятствия по време на изпълнение на неговите задачи. Дронът се управлява дистанционно. Пилотът винаги е с по-висок приоритет от автоматичните процеси на летящата платформа, за да може да взема интелигентни решения в реално време. За да вижда от борда на дрона, пилотът получава върху монитор видеоизображение от камерата в дрона, където е насложена графика с телеметричните данни. По този начин пилотът обхваща цялостно състоянието на летящата платформа. Обхватът на работната среда на дрона е до 2 км. в градски и до 5 км. в извънградски условия от дистанционното управление. Ограничението във височината на полета е софтуерно ограничено до 500 метра от точката на излитане, за да бъдат избегнати конфликтите във въздушното пространство с по-големите летателни средства – самолети, вертолети. Полетното време на съвременните дронове е между 15-30 минути, време достатъчно за изпълнение на задачи по откриването на повредите. Хоризонтална скорост на полета до 50-80 км/ч, вертикалната скорост е 10 м/с. Метеорологичното време, в което може да се изпълняват полети за територията на България, е около 70 % от астрономическото време. Максималната скорост на вятъра е до 10 м/с и не е желателно да вали. За нощни полети и ориентирането на носа, дронът е снабден със светодиодна индикация със различни цветове. Цените на дроновете варират от 1000 до около 30 000 евро в зависимост от оборудването, с което разполагат.

3. МЕТОДИКА ЗА ПОДДРЪЖКА И ОТКРИВАНЕ НА ПОВРЕДИ ПО ТРАСЕТО НА ВЪЗДУШНИ ЕЛЕКТРОПРОВОДИ

Всички елементи на въздушните електропроводи са подложени на статични и динамични механични натоварвания, породени от възникването на токове при къси съединения, при изменения на метеорологичните фактори и климатичните условия. Във всеки един от елементите може да възникне проблем. Ето защо е нужно да се обърне голямо внимание на техническата им поддръжка. Някои от съоръженията в България са на над 30 годишна възраст. Ето защо е нужна методика, с която да се улесни инспекцията, да се намалят разходите по обходи, взимането на бързи решения при аварии и събирането на база данни за последващ анализ.

Текущата поддръжка е експлоатационната дейност, която се извършва в междуремонтните периоди на въздушните електропроводни линии. Тя включва обходи, огледи, проверки и измервания.

Обходите се извършват по предварително зададен график - планово или извънпланово, когато има авария и за нейното отстраняване. Плановите обходи могат да се правят, когато линията е под напрежение и обхождащият не се качва на стълба. Такъв оглед се нарича низов обход. Когато при обхода напрежението на линията е изключено и обхождащият се качва на стълба и работи по проводниците, той се нарича върхов оглед или ревизия. Ако обхождащият екип има на разположение дрон е възможно да се прави трети вид оглед от въздуха, при което

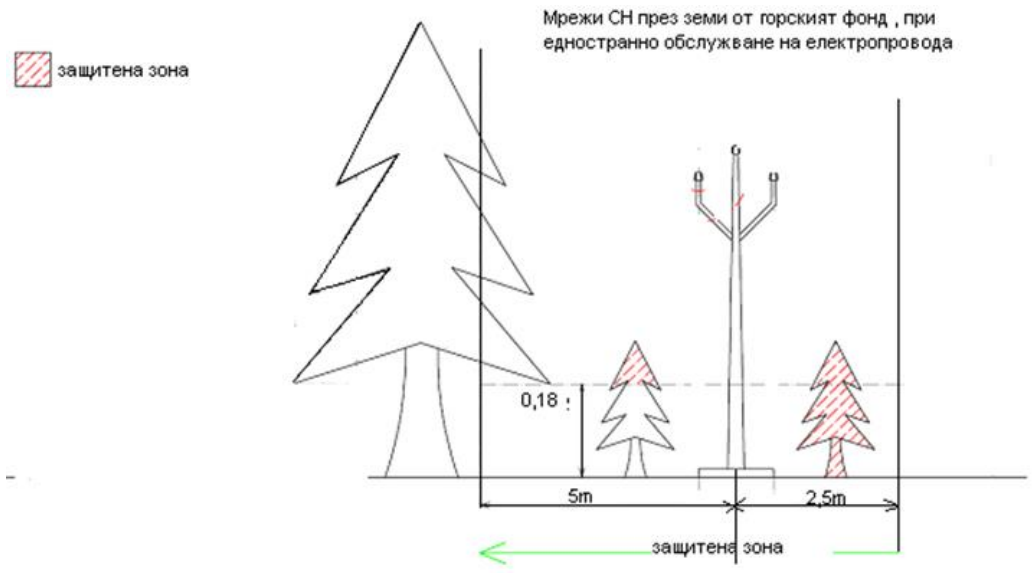
не е необходимо да бъде изключването на напрежението. По време на обходите се следи за следните проблеми:

- обрастване на просеките и сервитутните зони с растителност;
- инспектиране на проводниците за дефекти, като частични разкъсвания и замърсявания;
- отклонение на стълбовете от вертикалното им положение;
- инспектиране на състоянието на конструкцията и прилежащите елементи на стълбовете.

За бързото установяване на проблеми по трасето е целесъобразно използването на дрон за наблюдение от въздуха.

Сервитутът на въздушните линии е ивица с определена ширина по трасето на въздушната електропроводна линия, определена от Наредба 16 чл.7 ал.1 за сервитута на електроенергийните обекти (фиг.1). За поддържането на просеките от съответните органи се правят редовни обходи.

При обрастване на просеките гледната точка, от която може да се видят и снимат от въздуха е много по-добра за установяване на проблемите.

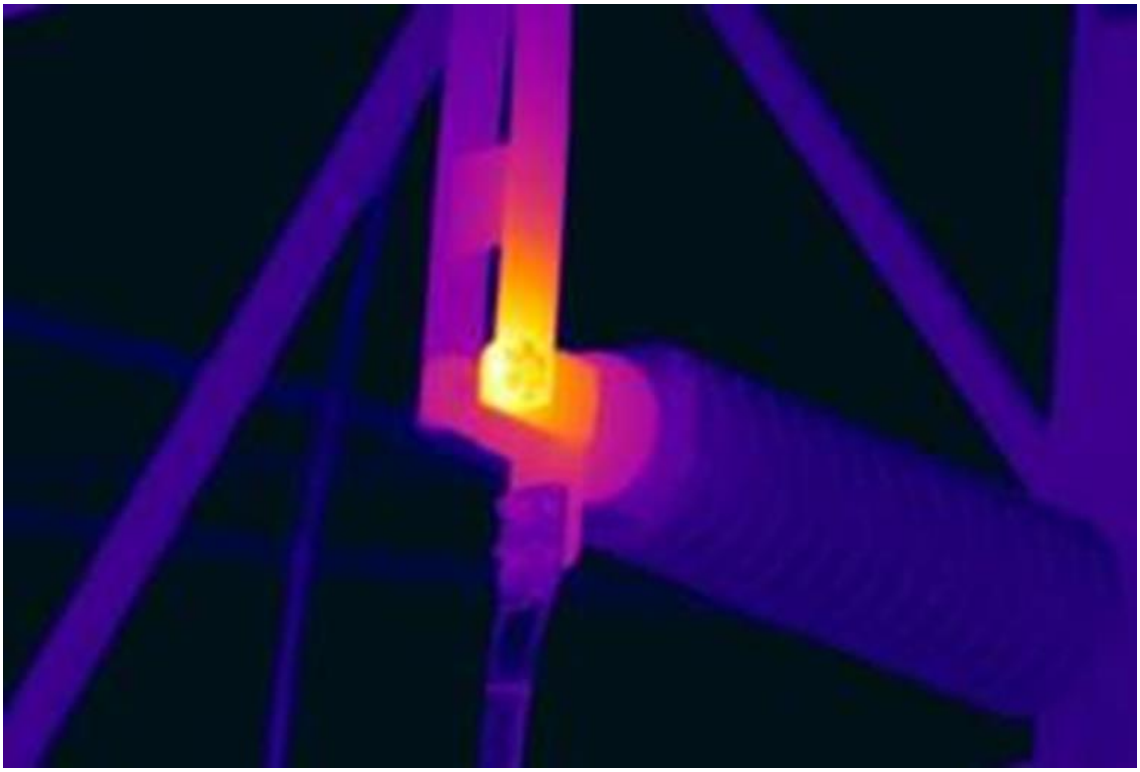


Фиг.1. Изисквания за просека при мрежа СН, преминаващи през земи от горски фонд, при едностранно обслужване на електропровода [1]

Снимковият материал, направен преди почистването и след почистването, може да се използва за архив и създаване на база данни за извършените дейности (фиг.2).

Фиг.2. Снимка на сервитутна зона на електропровод СН.

За установяване на проблеми по стълбовете и техните конструктивни елементи е необходимо с дрона да се снима във видимия и в термалния спектър (фиг.3). В последния могат да бъдат видяни всички повишени съпротивления и утечки по трасето.

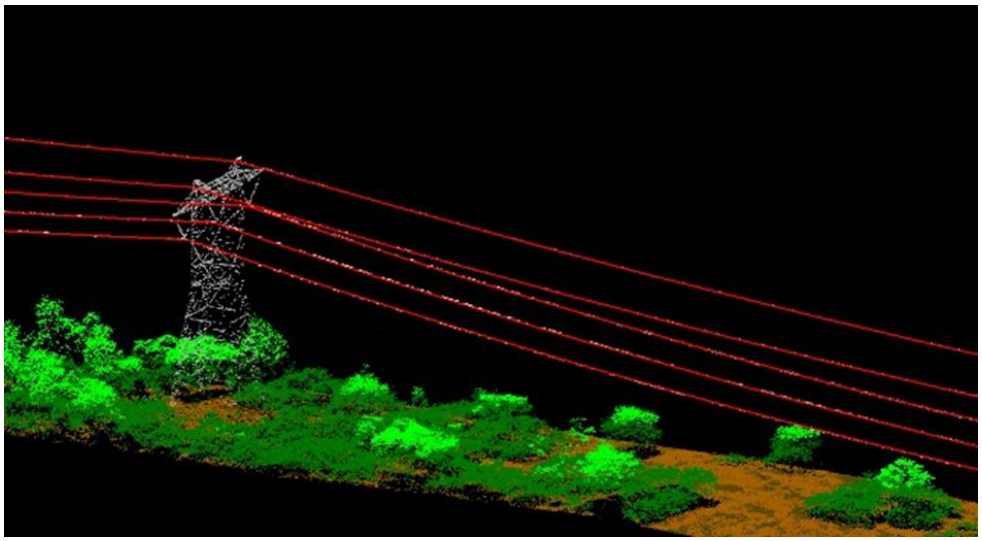


Фиг.3. Снимка с термална камера на повишено съпротивление от лош контакт на елемент от ВЕЛ ВН.

Фиг.4. Снимка на проводник ВН.

На фиг.4 се вижда разкъсване на проводник на една от фазите на въздушен електропровод ВН. При такова скъсване, повреденото място се възстановява чрез бандаж.

Заснемането на серия от кадри по метода за 3D моделирането установява отклоненията на вертикалността на стълбовете, което говори за корозия в основите или поддаване на фундаментите. Такова заснемане може да бъде правено чрез лидар, както е показно на фиг.5. Освен това със събраните данни от лидара и фотоапарата може да се създаде тримерна карта на даден електропровод и с времето да се надгражда с данните от новонаправените инспекции. Тази карта с база данни ще може да се анализира, за да се подчертаят зоните, в които трябва по-честа инспекция и наблюдение, както и да се вземат бързи и правилни решения при авария в някоя част от електропроводната линия.



Фиг.5.Сканирано изображение с лидар на електропроводна линия ВН.

ПЛАН ЗА ПОДДРЪЖКА НА ВЪЗДУШНИТЕ ЕЛЕКТРОПРОВОДИ С ДРОН

1. Подготвя се дрон за нужната инспекция.

2. Чрез дрона се заснема цялата електроенергийна система и се прави тримерна карта с база данни за последващ анализ и с възможност за промяна след всеки нов оглед или ремонт, като се поставят GPS координати на всеки стълб от електропроводната мрежа.

3. Инспектират се просеките и се нанася в база данни информацията, получена от дрона за последващ анализ.

4. Инспектира се състоянието на елементите на въздушните електропроводни линии и се нанасят в базата данни за последващ анализ.

5. След анализ на трасето и елементите на електропроводната линия, лесно може да се вземат решения за ремонти дейности и почистване на просеките, като се знаят GPS координатите на всяко проблемно място, нужните средства за отстраняването на проблема и необходимия персонал.

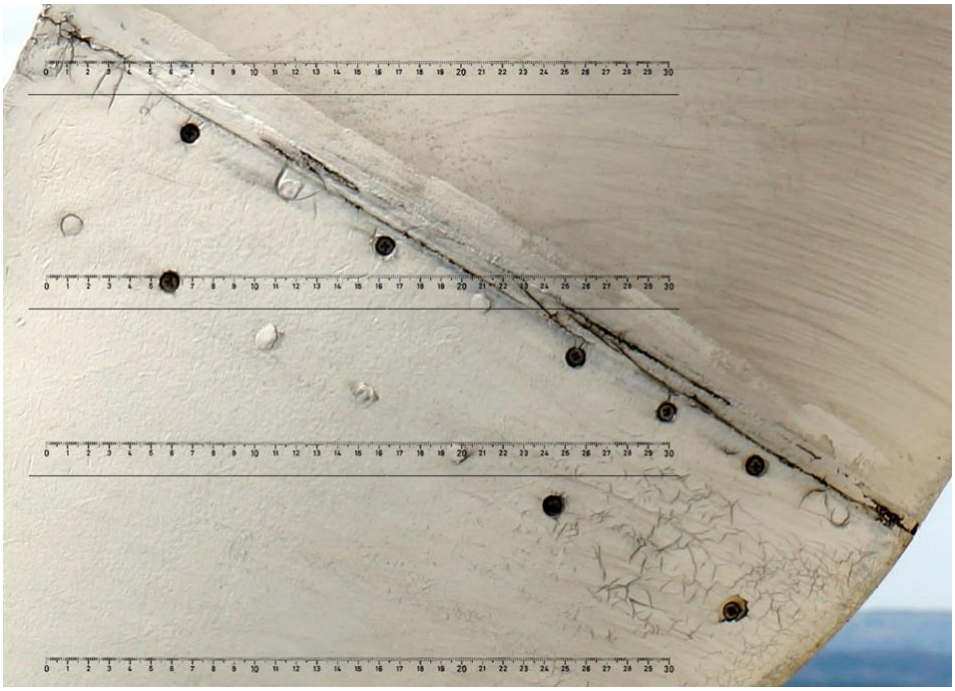
6. След отстраняване на проблема се прави нов полет за заснемане на подобрените участъци и новата информация се нанася в базата данни.

7. При авария по някоя от електропроводните линии, дронът се изпраща до мястото на проблема, за да се установи точно причината за тази авария и необходимите средства за отстраняването и. След това се изпраща дежурният екип за отстраняване на проблема.

4. МЕТОДИКА ЗА ПОДДРЪЖКА И ОТКРИВАНЕ НА ПОВРЕДИ ВЪВ ВЕТРОГЕНЕРАТОРНИ ПАРКОВЕ

За поддръжката на един ветрогенератор е необходимо да се извършва редовна инспекция за състоянието на цялостната конструкция и да се обръща особено внимание на лопатките на генератора [3]. Те са подложени на силни натоварвания от външните метеорологични условия и често се разкриват незначителни недостатъци, които трудно се откриват с конвенционалните методи за поддръжка.

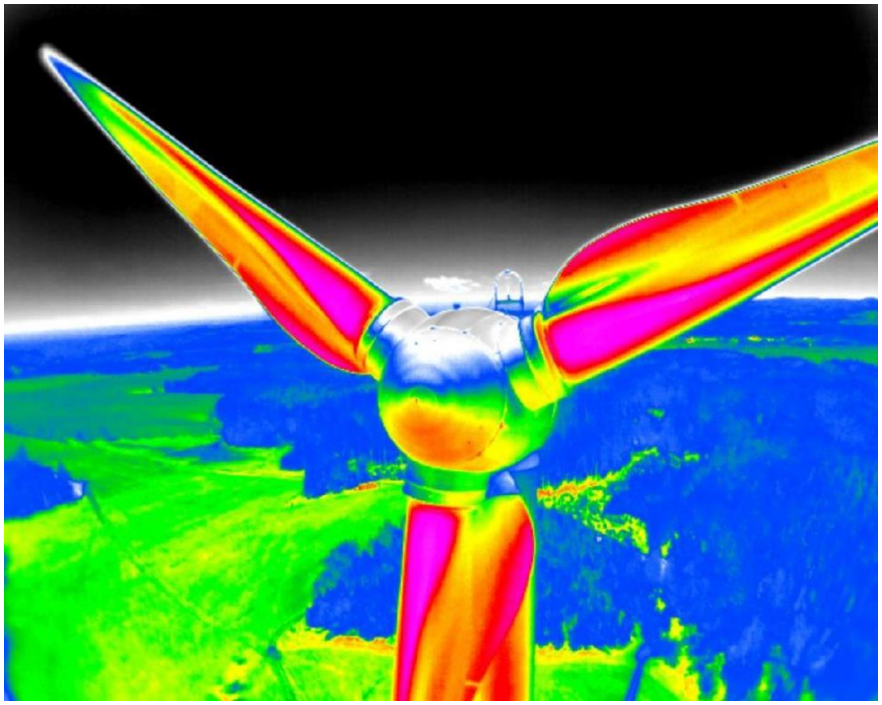
Тези дефекти биха довели в бъдеще до катастрофални щети, застрашаващи живота на съоръжението и намаляване на общественото доверие, което ограничава по-нататъшното развитие на парка. Поради голямата височина на вятърната турбина е трудно нейното инспектиране, тъй като това отнема много време, средства и персонал. Освен това спускането на поддържащия персонал с въжета по лопатките, с цел инспектиране, застрашава техния живот. А лесен, бърз и безопасен оглед може да се направи, като се използва дрон.



Фиг.6. Снимка на част от витлото на ветрогенератор.

На фиг.6 ясно се вижда нарушаването на горния слой на витлото, пукнатините, получени от вятъра, както и корозия във винтовете.

При използване на термална камера могат да се видят натоварванията в различните части на генератора - както на витлото така и на цялостната конструкция [6].



Фиг.7. Снимка на част от витлото на ветрогенератор.

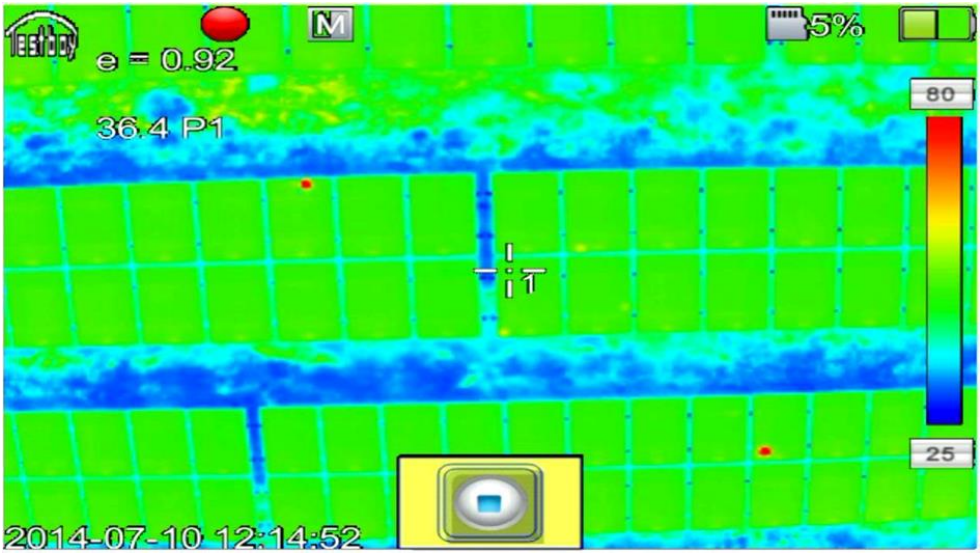
На фиг.7 се вижда равномерното натоварване на витлото в термалната област, което показва, че ветрогенераторът е в добро състояние.

ПЛАН ЗА ПОДДРЪЖКА НА ВЕТРОЕНЕРГИЕН ПАРК:

1. Подготвя се дронът за полет и се поставят камерите, нужни за съответната инспекция.
2. Чрез дрона се заснема и се създава тримерна карта с база данни на ветроенергийния парк, като се посочват GPS координатите на всеки един ветрогенератор.
3. Прави се редовна инспекция на конструкцията на генератора – поне веднъж месечно. Данните от инспекцията се нанасят в базата данни с тримерната карта за последващ анализ.
4. След анализиране на елементите на вятърната турбина и при наличие на проблеми се взимат съответните мерки за отстраняването им.
5. След отстраняване на проблемите се прави нов оглед с дрона и снимките се нанасят отново в базата данни.

5. МЕТОДИКА ЗА ОТКРИВАНЕ НА ПОВРЕДИ ВЪВ ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАРКОВЕ

Чрез дрон с термална камера може да се обхване голяма част или пълната площ от фотоволтаичния парк само с едно издигане на платформата. Чрез дрона се откриват горещи точки в панелите и се изследва тяхната енергийна ефективност [5]. При мъртва клетка тя абсорбира в себе си светлинната енергия и не излъчва електрони, поради което тя се загрява много повече от останалата част на панела.



Фиг.8. Снимка с термална камера на част от фотоволтаичен парк от дрон.

На фиг.8 ясно се виждат изгорели клетки на два от панелите.

ПЛАН ЗА ПОДДРЪЖКА НА ФОТОВОЛТАИЧЕН ПАРК С ДРОН

1. Подготвя се дронът за инспекцията с необходимото оборудване.
2. Чрез дрона се снима и се прави тримерна карта с база данни, като за всеки фотоволтаичен панел се нанасят GPS координатите.
3. Задава се мисия на дрона да облети всеки един ред панели и събраните снимки и данни се нанасят в тримерната карта за последващ анализ.
4. Прави се анализ на изображенията и при откриване на проблем се взимат нужните мерки по отстраняването им. Проблемното място лесно се локализира от картата.
5. На поправените места се прави ново заснемане и получената информация се нанася в базата данни.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа са описани няколко методики за анализ на данни за поддръжка и откриване на повреди в електроенергийните съоражения с дрон. От направените изследвания се вижда този подход предоставя бърз и лесен начин за извършване на технически огледи на елементите на въздушна електропроводна линия, ветроенергиен и фотоволтаичен парк. Методиките освен, че са бързи и спестяват време и средства, също така гарантират безопасността на обслужващия персонал. Въвеждането на тримерна карта с геопозоцията на всеки един стълб от електропроводната мрежа, както и възможността за база данни към нея ще улесни при възникване на даден проблем да се локализира точно мястото, да се знае пътя до там и нужните средства за отстраняването му. Същото се отнася и за ветроенергийните и фотоволтаични паркове, където нанасянето на данните на тримерна карта ще улесни поддръжката на всяка една вятърна турбина и фотоволтаичен панел.
Приложението на дроновете в сферата на енергетиката тепърва ще нараства.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Методика за техническа политика за просеки 30 200 500-П. Глава I. Обща част.
[2] Наредба № 16-116 от 8 февруари 2008 г. за техническа експлоатация на енергообзавеждането, ДВ бр.26 от 07.03.2008.
[3] Георги Тончев, Вятърни електроцентрали I част – стр. 175- 181
[4] http://aerocam.bg – магазин за дронове
[5] http://elmedia.net/bg/index.html
[6] http://www.flir.eu/home/
[7] http://rovdrone.eu/en/
[8] http://visualworking.com/uav-wind-turbine-inspection/
[9] http://airfilmsinspections.com/ - инспекции с дронове

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

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Симона Петракиева

СТАРЕЕНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ИЗОЛАЦИЯ НА ВЪРТЯЩИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ ПОД ДЕЙСТВИЕТО НА ЧАСТИЧНИ РАЗРЯДИ

Лилия Антонова, Петър Наков, Виктор Райчев

Резюме: *Стареенето на електрическата изолация на въртящи се електрически машини зависи от условията на околната среда, експлоатационните параметри на машината и интензивността на частичните разряди. В статията се обсъжда динамиката на изменение на частични разряди в зависимост от експлоатационните фактори.*
Ключови думи: *частични разряди, стареене на електрическа изолация на статорна намотка*

AGING OF THE INSULATION OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES FROM IMPACTS OF PARTIAL DISCHARGES

Lilia Antonova, Petar Nakov, Victor Raychev

Abstract: *The Aging of the electrical insulation of rotating electrical machines depends on environmental parameters, operational parameters of the machine and the intensity of the partial discharges. The article discussed dynamics of change of partial discharges according Lifecycle and operational factors of rotating electrical machines.*
Keywords: *partial discharges, aging of stator winding insulation*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Генераторите, въртящи се електрически машини, са най-отговорните елементи в електроенергийната система. Повредата на изолационната им система може да предизвика пълен отказ на машината, което води до големи финансови загуби за производители и потребители. Това налага прилагането на методи и средства за прогнозиране на надеждността на работа по данни, получени от измерване на параметрите на електрическата машина.

Установено е, че 56% от отказите на машини са от повреди в изолацията и 44% по други причини (механични, топлинни и повреди в лагерите), както е показано на фиг.1.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Фиг.1. Видове повреди в хидрогенераторите.

Три от основните причини за повреда в електрическата изолацията на статорната намотка са:

- Стареене – 31%;
- Замърсяване и влага в намотката – 25%;
- Вътрешни частични разряди, породени от дефекти при производство – 22%.

Фиг.2. Причини за повреда в изолационната система на въртящи се електрически машини.

2. ЧАСТИЧНИ РАЗРЯДИ. ЗОНА НА ДЕФЕКТА

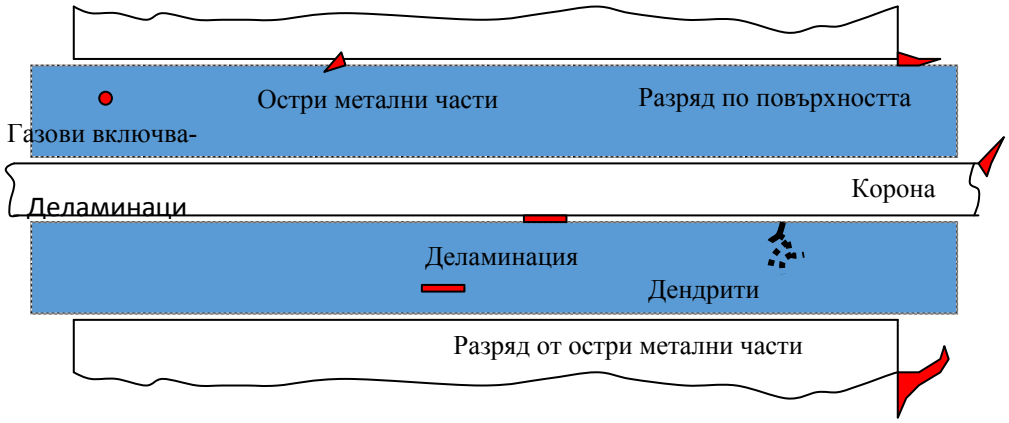
Частичен разряд е електрически разряд, който се развива в част от изолацията между електродите, намиращи се под различен потенциал.

Явлението се свързва с:

- частични разряди в обема на електрическата изолация;
- частичен разряд по повърхността;
- частични разряди от елементи на „плаващ“ потенциал;
- корона;
- частични разряди между метални части;
- електрически шум от високочестотни устройства.

Най-голяма опасност за електрическата изолация представлява действието на частичните разряди. Електрическата изолация старее ускорено под действието на частични разряди пропорционално на интензивността им. Видът на електрическата изолация има различна устойчивост, в зависимост от енергията на свързване на атомите в макромолекулата, което обуславя различно време на деградация и образуването на продукти на стареене. Особено важно е да се свърже източникът на частични разряди с вида на изолацията, върху която се въздейства. Локализирането на източниците на частични разряди е решаващ фактор при определяне на ресурса на изолационната система, чрез анализ на интензивността на стареене за всеки дефект.

За електрически генератори, скоростта на развитие на дефекта зависи от засегната зона и интензивността на разрядите.

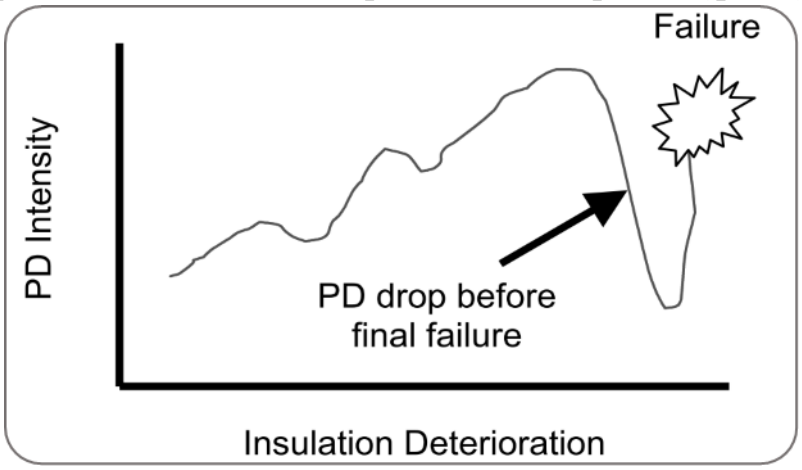


Фиг.3. Зони на дефектите в електрическата изолация на статорна намотка.

3. ДИНАМИКА НА РАЗВИТИ НА ЧАСТИЧНИ РАЗРЯДИ

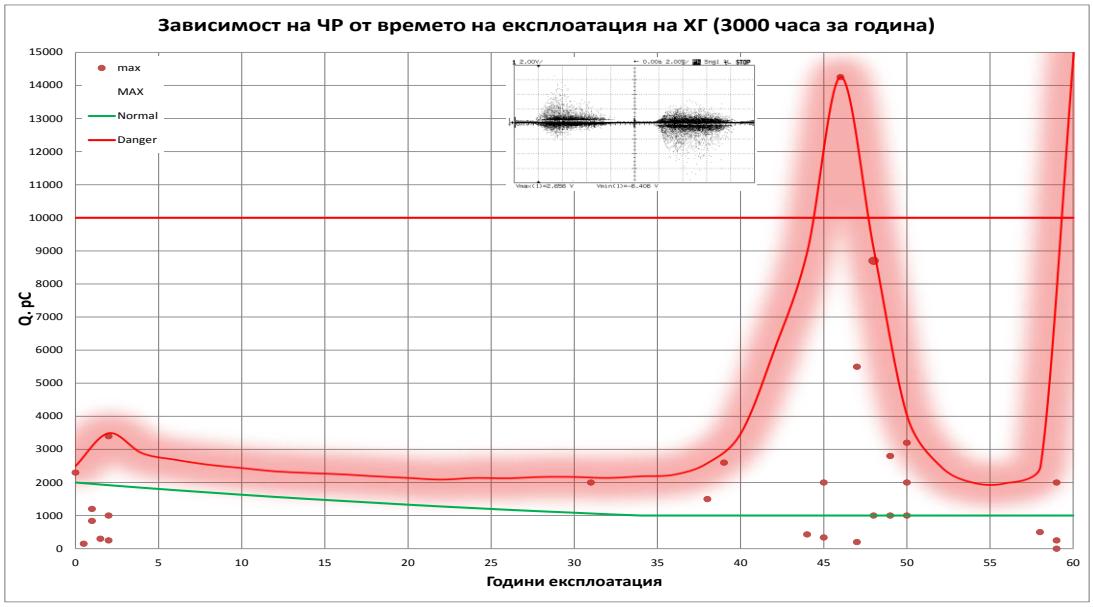
В стандартите [3, 4] се представя опростен модел на дефекта, описан със съсредоточени елементи, резистори и кондензатори. При стареене на изолационния материал под действие на частични разряди, по стените на дефекта (дендрит или трек) се отлагат проводими продукти. Електрическото съпротивление на стените на дефекта намалява, което води до намаляване на количеството електричество натрупано на електродите на еквивалентния кондензатор. Частичните разряди са с по-малка интензивност и дори може да се прекрати развитието им.

Процесът продължава с електро-химичното стареене в мястото на дефекта с по-голям интензитет, което довежда поява на нови пукнатини и възникване на частични разряди. В действителност се наблюдава намаляване на интензитета на частичните разряди една две години преди пълния пробив (фиг.4).



Фиг.4. Зависимост на интензивността на частични разряди за статорна намотка на генератори по литературни данни [1]

На фиг.5 е показана обвивната крива на стойностите на привидния заряд на частични разряди, които са измерени на 29 хидрогенератори в експлоатация. От авторите са регистрирани два пробива в хидрогенератори, съответно за един месец и три месеца след датата на измерване, с привиден заряд на частични разряди 14,5 nC и 40 nC, а останалите генератори са продължили нормалната си работа.



Фиг.5.

На фиг.5 се наблюдават три зони вероятно типични за кривата на надеждност на електрическите машини. Първата зона е характерна за нова изолационна система и има привиден заряд 1 – 3 nC. Във втората зона, с продължителност от 2 до 35 години, не са наблюдавани частични разряди, по-големи от 2 nC. Тази стойност може да се приеме като норма за нормална експлоатация на статорната на-

мотка, без риск от пробив. В третата зона, в края на ресурса на статорната изолация, са възможни няколко максимума на привидния заряд. Няколкото максимума се получават при различните видове изолационни системи, технология и качество на изработка.

4. ВЛИЯНИЕ НА РАЗЛИЧНИ ФАКТОРИ ВЪРХУ ИНТЕНЗИВНОСТТА НА ЧАСТИЧНИТЕ РАЗРЯДИ

4.1. Влияние на ***влажността*** на въздуха върху частичните разряди в статорната намотка

От множество направени проучвания [2] е установено, че отношението между влажността и активността на частичните разряди е обратно пропорционално: броят и амплитудата на частичните разряди намалява с увеличаване на влажността.

Повишената влажност на охлаждащия газ повишава проводимостта на повърхностите на изолационната система. Влагата играе роля на полупроводимо покритие за равномерно разпределение на интензитета на електрично поле, което намалява възможността за възникване на частични разряди в зоните на изхода на секциите от статорния пакет и между секции от различни фази в еволвентната част на намотката.

Влажността на газа в електрическата машина не оказва влияние на вътрешната изолация на намотката, когато не е разрушена целостта на импрегниращия материал от електрическата изолация на секциите. В случаите на старяла електрическа изолация, влагата прониква в обема на изолационната система и пасивира частичните разряди в газовите включвания. Този процес е свързан със значително намаляване на съпротивлението на електрическата изолация на намотката, под 500 MΩ.

4.2. Влияние на ***температурата*** върху частичните разряди в статорната намотка

Температурата влияе значително върху механизма на развитие на частичните разряди и ускорява процеса на стареене на изолационната система и на изолационните материали с органичен произход.

Измервания на частични разряди при ускорени изпитвания на слюдено-епоксидна изолация показват, че частичните разряди имат по-голяма интензивност при 135˚ C, отколкото при 20 ˚C [1].

В експлоатационни условия, температурата води до разширяване на елементите на генератора и на изолационната система в различна степен, при което може да се намали интензивността на частични разряди в газовите включвания [1]. При бърза промяна на режима на работа на машината (ПАВЕЦ) не се наблюдава значителна промяна на привидния заряд на частичните разряди.

4.3. Влияние на ***товара***

Измерването на частични разряди на изводите на електрическите машини на празен ход и при товар на агрегата, може да информира експерта за проблеми, свързани с електрическата изолация (от анализа на резултатите при измерване на празен ход) и за проблеми, свързани с веригата по която протича токът на то-

вара (разряди в спойки и контакти повърхности в главната верига и в магнитната система).

Повишената амплитуда и брой на частичните разряди при работа с товар (включен е агрегата към енергийната система) може да се дължи на частични разряди в съседни съоръжения или в елементи, които са свързани към заземителния контур.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Измерването на параметрите на частичните разряди и определяне на мястото им, позволява да се направи достоверно заключение за състоянието на електрическата изолация и да се прогнозира времето за отказ с достатъчна инженерна точност.

2 Диагностиката по време на експлоатацията на въртящите се електрически машини може да информира собствениците за своевременно планиране на ремонти, с което да се намали непредвиденото прекъсване на работата на машините.

3 Поддържането на оптимални експлоатационни условия (влажност на газа в охладителната система, работна температура на намотката, намалено замърсяване чрез поддържане на системата за филтриране на газа в машината) удължава живота на изолационната система на електрическите машини.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Continuous On-Line Partial Discharge Monitoring of Generator Stator Windings B. A. Lloyd, Member, IEEE S. R. Campbell, G. C. Stone, Fellow, IEEE Iris Power Engineering Inc., Etobicoke, Ontario, Canada M9C 1B2 PE-388-EC-0-2-1998 A paper recommended and approved by the IEEE Electric Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society for publication in the IEEE Transactions on Energy Conversion. Manuscript submitted August 12, 1997; made available for printing March 2, 1998. (Pages 1131–1137)

[2] Vicki Warren, Qualitrol - Iris Power - Toronto, Ontario Canada Stator Winding Partial Discharge Activity for Marine Air-Cooled Generator

[3] IEC 60270 High-voltage test techniques – Partial discharge measurements

[4] 1434-2014 - IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery

Автори: Лилия Антонова, маг. инж. докторант, кат. ЕЕ, Електротехнически Факултет, ТУ-София; доц. д-р Петър Наков, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *pnakov@tu-sofia.bg;* Виктор Райчев, маг. инж. НИС при ТУ София,

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Антоанета Тодорова

ТЕХНОЛОГИЧНИ РАЗХОДИ ОТ КОРОНА

Петър Наков, Валентин Колев, Ива Драганова, Виктор Райчев

Резюме: *Загубите на мощност и енергия от корона трябва да се има предвид при проектирането на електропроводи за високо напрежение. Електрическият интензитет на полето на електропроводи високо напрежение и свръх високо напрежение, геометрията на линията, влажността на въздуха, валежите, отлагането на лед и замърсяване на проводници ще се отрази на загуба на мощност от короната. Интензивността на загуби на енергия, радиочестотни смущения* (*RFI*)*, звуков шум, както и генериране на озон зависи от метеорологичните условия и надморска височина. В работата са представени резултатите от изследване на преобразуваната електрическа мощност от корона във въздушни електропроводни линии високо и свръхвисоко напрежение - технологични разходи от корона.*
Ключови думи: *корона, въздушни електропроводни линии, технологични разходи*

POWER LOSSES FROM CORONA DISCHARGES

Petar Nakov, Valentin Kolev, Iva Draganova, Victor Raychev

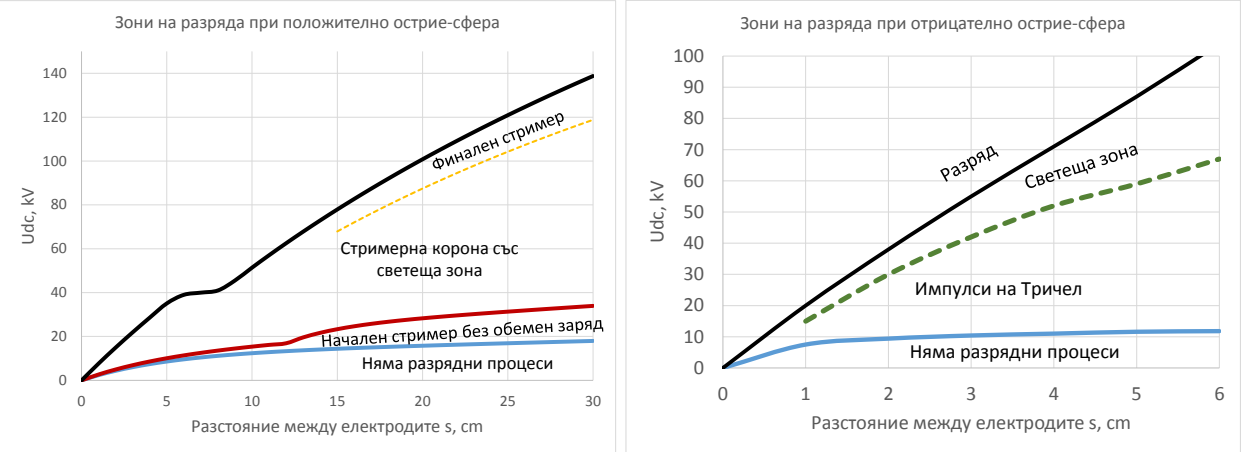
Abstract: *Power losses from corona discharges have to be considered in the design of high voltage transmission lines. The electric field intensity of the high voltage transmission lines, line geometry, humidity, raining, ice and pollution of conductors will be affect to the power loss from corona. The intensity of power losses, radio frequency interference* (*RFI*)*, audible noise, and ozone generation depends of weather conditions and altitude. This paper presents a study of power losses from corona discharges on high voltage and extra high voltage transmission lines.*
Keywords: *corona, corona losses, overhead transmission lines*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Коронен разряд, или *корона* е непълен, самостоятелен разряд, който възниква в нееднородно електрично поле. Йонизационните процеси протичат в зоната на максимален интензитет, обикновено в близост до електродите с интензитет на полето по-голям от началния интензитет на корониране. Най-често изследванията се представят с електродна система острие - плоскост или еквивалентната система острие - сфера. На фиг.1 са показани зоните на поява и развитие на явлението корона в зависимост от приложеното постоянно напрежение на острието и разстоянието между електродите.

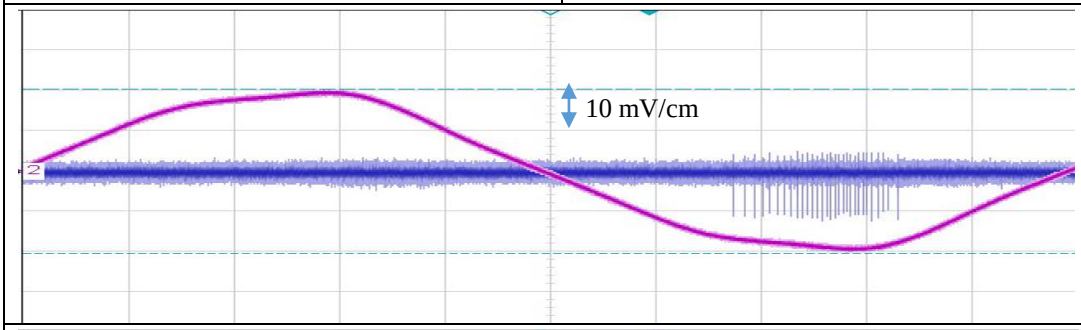
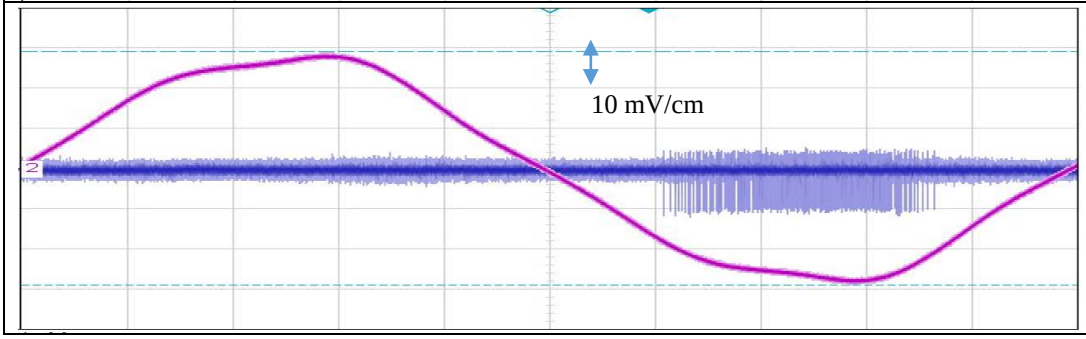
© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

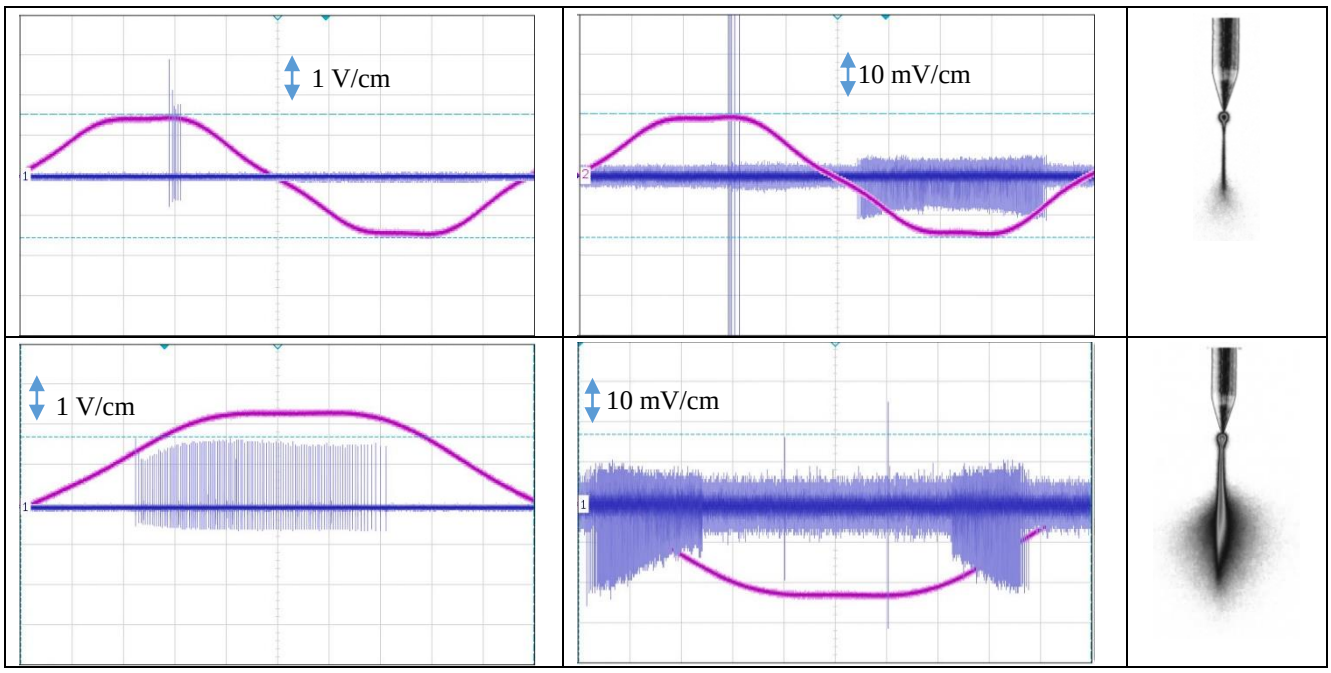
ISSN 1311-0829



Фиг.1. Зони на развитие на корона в зависимост от разстоянието между електроди острие - сфера.

При прилагане на променливо напрежение, интензитетът на повърхността на електрода се променя синусоидално. На осцилограми фиг.2 са показани етапите на промяна на амплитуда, честотата на повторение и зоната на поява на импулсите от корона. При малък радиус на острието 0,1 mm, началното напрежение на поява на отрицателна корона, импулси на Тричел, е при напрежения 10 – 12 kV, а положителната корона възниква при 35 - 40 kV. С повишаване на напрежението броят на импулсите нараства. Амплитудата на импулсите на отрицателната корона не се променя до момента на поява на положителната корона. Влиянието на обемните заряди не позволява развитието на отрицателни стримери. Наблюдават се положителни стримери с изразено светлинно излъчване в зоната на стримерите.

Положителна полярност	Отрицателна полярност	Снимки на корона
		
		



Фиг.2. Зависимост на амплитудата от корона при променливо напрежение и зона на светлинно излъчване.

2. СЕЧЕНИЕ НА ПРОВОДНИЦИТЕ ЗА ВЪЗДУШНИ ЕЛЕКТРОПРОВОДНИ ЛИНИИ

Изборът на сечение и вид на проводника трябва да изпълнява условията за обезпечаване на преносната способност на електропроводната линия при с приемливи технологични разходи. Изборът на сечение с отчитане на загубите от корона е в съответствие с условието да не се наблюдава явлението при най-продължителните, благоприятни метеорологични услови. Обикновено това е сухо време с относителна влажност на въздуха по-малка от 80% и атмосферно налягане близко до 1000 метра над морското равнище.

С един проводник не е възможно да се овладее короната за напрежения над 220 kV. Класическият подход, прилаган от 1910 г., е да се монтират снопови проводници за напрежения над 220 kV. Броят на проводниците, тяхното сечение и разположение в снопа се конструира така, че да се обезпечи условието за приемливи загуби от корона. Условието за приемливи загуби се изпълнява, ако интензитетът на електрическото поле на повърхността на проводника е по-малък от началния интензитет на поява на положителна корона.

Максималният интензитет на електрическото поле на повърхността на проводника се изчислява от закона на Гаус

$$\varepsilon_0 \oiint_S E da = \iiint_V \rho dv .$$

Приема се цилиндрична форма на електрическото поле, където интензитетът на електрическото поле E е равен на

$$E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 r},$$

q е линейна плътност на заряда, C/m;

ε_0 – абсолютната диелектрична проницаемост, F/m

r – разстоянието от центъра на проводника, m.

Максималният интензитет на електрическото поле се получава на разположен над земната повърхност проводник

$$E_m = \frac{U}{r_0 \ln\left(\frac{2h}{r_0}\right)},$$

където E_m е максималният интензитет на електрическото поле, V;

U – максималната стойност на фазното напрежение на проводника, V;

r_0 – радиусът на проводника, m;

h = височина на окачване минус две-трети провес на проводника, средна височина на проводника, m.

За снопови проводници интензитетът на полето по повърхността на проводника се приема

$$E_m = \frac{U}{r_e \ln\left(\frac{2h}{r_e}\right)}\left[1+(n-1)\frac{r_0}{R}\right],$$

$$r_e = \sqrt[n]{n r_0 R^{(n-1)}}$$

където r_e е еквивалентният радиус на снопа; R – радиусът на снопа.

Максималният интензитет на електрическото поле на повърхността на проводника при номинално напрежение на електропровода трябва да е по-малък от допустимия

$$E_m \le E_{доп},$$

където $E_{доп} = kE_н$ е допустим интензитет на повърхността на проводника;

Ен – начален интензитет на възникване на корона, определен по 1.1 или 1.2;

k – коефициент, който отчита отклоненията на напрежението и относителната плътност на въздуха.

В практиката се използват следните стойности за коефициента k:

- *k=0,80* за електропроводни линии 110kV;
- *k=0,80* за електропроводни линии 220kV;
- *k=0,85* за електропроводни линии 400kV;
- *k=0,90* за електропроводни линии 750kV.

Условието да не се получава корона за сух период от време на морското равнище е

$$30{,}3m\delta r \cdot \ln\frac{S}{r} \ge \frac{U_{л.еф}\sqrt{2}}{\sqrt{3}}.$$

Ако се използва коефициент на гладкост m = 0,82, относителна плътност на въздуха δ =1, и ако се приеме $\ln\frac{S}{r} \approx 6{,}1$ (типично на електропроводни линии високо напрежение), за необходимия радиус на единичен проводник се получава условието радиусът на проводника да бъде по-голям от

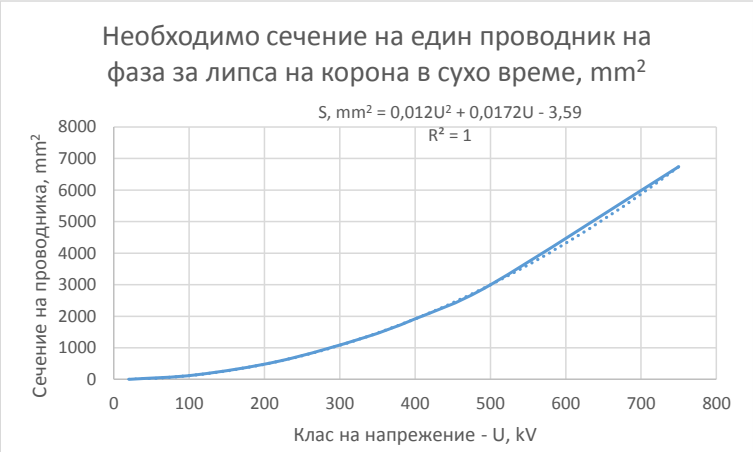
$$r_0 \ge 0{,}0065\ U_{л.еф}\ \text{, mm},$$

където $U_{л.еф}$ е ефективната стойност на линейното напрежение, kV.

За единичен проводник на фаза необходимия диаметър на проводника за да няма корона в сухо време, изчислено със запас 20% е като следва

Таблица 1. Необходим диаметър и сечение на проводник за липса на корона в сухо време

Клас на напрежение U, kV	Сечение на проводника S, mm^2	Диаметър на проводник D, cm
110	145	1,5
220	580	2,9
400	1920	5,4



Фиг.3. Необходимо сечение на единичен проводник за липса на корона.

3. ТЕХНОЛОГИЧНИ РАЗХОДИ ОТ КОРОНА

Средната мощност от корона на трифазна линия се определят при сумиране на произведението от специфичната мощност на короната и продължителността на конкретното метеорологично време [1]

$$P_к = \frac{nr^2}{8760}\left\{\begin{array}{l}\left[\sum_t F_{хв}\left(\frac{E_m}{E_н}\right)E_m\right]\delta^2 T_{хв} + \left[\sum_t F_{д}\left(\frac{E_m}{E_{н,\delta=1}}\right)E_m\right]\delta^2 T_{дъжд} + \\ + \left[\sum_t F_{с}\left(\frac{E_m}{E_{н,\delta=1}}\right)E_m\right]\delta^2 T_{сняг} + \left[\sum_t F_{л}\left(\frac{E_m}{E_{н,\delta=1}}\right)E_m\right]\delta^2 T_{лед}\end{array}\right\}, \text{ kW/km}, \qquad (1)$$

където δ е относителната плътност на въздуха

Активната специфична мощност на корона за един проводник се изразява във функционална зависимост

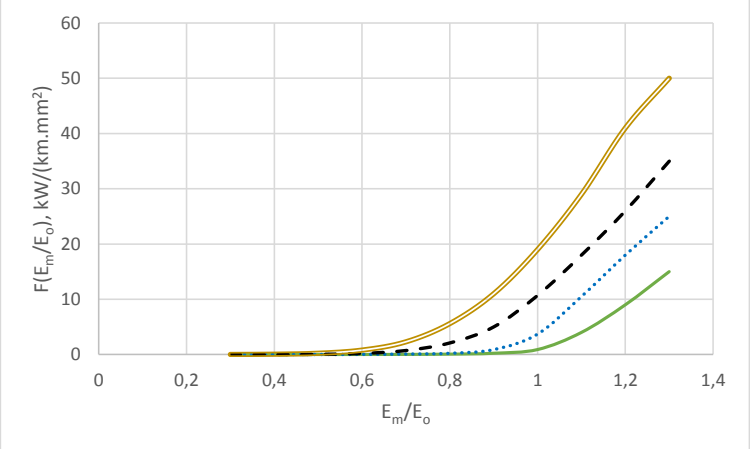
$$\frac{P}{r_0^2 E_m} = F\left(\frac{E_m}{E_н}\right), \qquad (2)$$

- P е специфичната мощност на корона;
- r_0 – радиус на проводника;
- E_m – интензитет на повърхността на проводника;
- $E_н$ – начален интензитет на корона.

Обработването на данните, получени в [1], се апроксимират чрез експоненциална функция

$$\frac{P}{nr_0^2 E_m} = ae^{-b\left(\frac{E_m}{E_н}-c\right)^2}, \qquad (3)$$

където a, b, c са емпирични коефициенти.

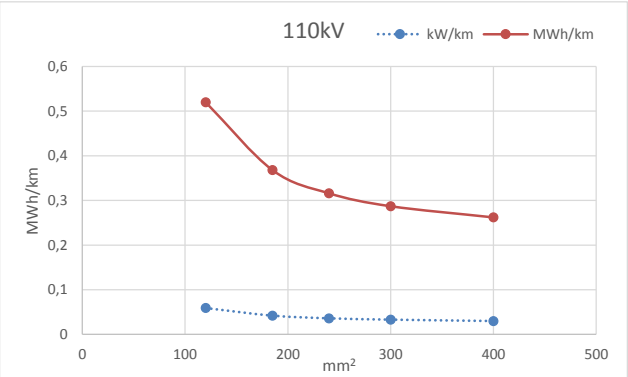


Фиг.4. Функция на загубите за различни атмосферни условия: ___ $F_{х.в}$ – хубаво време; …. $F_д$ - дъжд и мокър сняг; - - - $F_с$ – сняг; === $F_л$ – скреж, лед за голи проводници

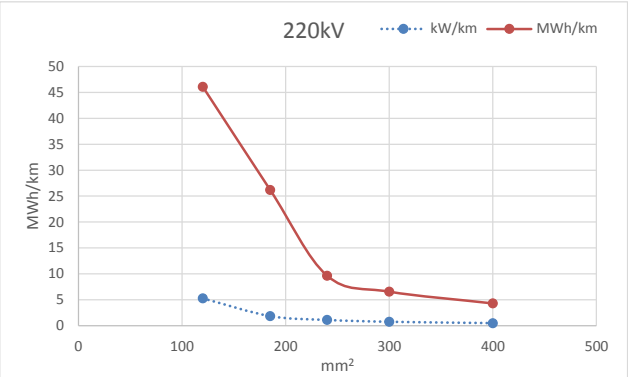
Намаляването на технологичните разходи се постига чрез повишаване на сечението на проводниците и намаляване на специфичната мощност с полагането на покрития на проводниците, което намалява възможността за образуване на капки и скреж по повърхността. Характеристиките на покритието (хидрофилни, гладки, срещу образуване на лед и дебелина на покритието) се избират в зависимост от преобладаващите технологични разходи от корона за даден район.

4. РЕЗУЛТАТИ

На фиг.5, фиг.6, фиг.7 и фиг.8 са показани изчислените специфична средна мощност енергия от корона за електропроводни линии високо и свръх високо напрежение в зависимост от сечението на проводниците.

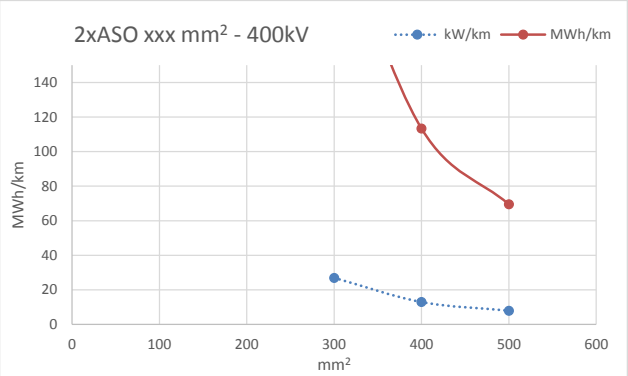


Фиг.5.

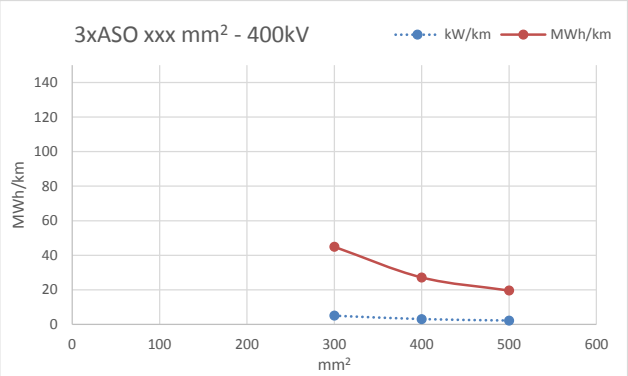


Фиг.6.

Зависимост на средната мощност и енергия на технологичните разходи от корона.



Фиг.7.



Фиг.8.

Зависимост на средната мощност и енергия
на технологичните разходи от корона.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приемливи от експлоатационна гледна точка технологични разходи се постигат чрез използване на следните сечения и конфигурация на снопа проводници:

- За електропроводни линии 110 kV е необходим по-голям диаметър на проводника от 11,4 mm, което кореспондира на тип проводник АС70 mm ^{2}, но се препоръчва минимално сечение АСО150 mm ^{2}.
- За електропроводни линии 220 kV, в съответствие с наредба №3, е необходим по-голям диаметър на проводника от 21,6 mm, което кореспондира на тип проводник АСО240 mm ^{2}. Препоръчително е използването на проводници със сечения 500 mm ^{2} или гладки проводници.
- За електропроводни линии 400 kV е необходим по-голям диаметър, което налага използване на снопови проводници. Използват се снопови проводници 2хАСО 500 mm ^{2} и 3хАСО 400 mm ^{2} за надморски височини до 1000 метра. За планински райони е подходящо изпълнението 3хАСО 500 mm ^{2}.

2. Възможно е да се намалят технологичните разходи от корона чрез използване на хидрофобни покрития и покрития повишаващи радиуса и гладкостта на проводниците. Прилагат се специфични покрития за даден район.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Руководящие указания по учёту потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330 – 750 кВ и постоянного тока 800 – 1500 кВ. М. СЦНТИ. 1975.

Автори: доц. д-р Петър Наков, кат. „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *pnakov@tu-sofia.bg*; Валентин Колев, доц. д-р инж., кат. „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, ТУ София; Ива Драганова, гл. ас. д-р инж. ТУ София; Виктор Райчев, маг. инж. НИС при ТУ София

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Димо Стоилов

ИЗСЛЕДВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА „БРАУНОВ ГАЗ“ ГЕНЕРАТОР

Иван Петров

Резюме: *В работата са представени резултати от проведено изследване за влиянието на генератор за „Браунов газ“ с различни електроди върху енергийните показатели. За целта е разработен стенд за изследване на параметрите на генератор на „браунов газ“. Показаните резултати имат практическо приложение при разработване на генератори на „Браунов газ”. Те са представени в табличен вид. Направен е и кратък анализ на получените резултати.*
Ключови думи: *генератори на „Браунов газ”(HHO генератори), енергийни характеристики на генератори за „Браунов газ”*

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF BRAUN GAS GENERATOR

Ivan Petrov

Abstract: *We present the results of a study of Braun gas generator with different electrodes and their power parameters. A special stend has been developed for this purpose. The show results have practical application in the development of Braun gas generators with higher power efficacy. The results of the experimental studies are presented in tables. A short discussion on the results has also been made.*
Keywords: *Braun Gas Generator (HHO Generator); power parameters of Braun Gas Generator*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Нарастващото енергийно потребление придружено от прогресивно нарастване на населението при изчерпване на природните горива, води до все по актуален проблема за създаване на нови източници на енергия . Ускореното глобално затопляне и замърсяване на околната среда, допълнително причиняват 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 енергия /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.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ПРИНЦИПИ, ЗАВИСИМОСТИ И МЕТОДИ ПРИ ГЕНЕРАТОРИТЕ ЗА „БРАУНОВ ГАЗ”

Електролиза е физикохимичен процес, при който при преминаване на електрически ток през разтвор се получава отделяне върху електродите на съставните части на разтвореното вещество или на други вещества, получени при вторични реакции. Положителният електрод е анод, а отрицателният катод, положителните йони – катиони, а отрицателните – аниони.

През 1970 г. професор Юл Браун открива собствен метод на водна електролиза, при която се получава взривоопасен газ - смес от водород и кислород в съотношение на два обема от водород за един кислород. Той открива, че газовете водород и кислород може да бъдат безопасно смесени (плюс или минус 5%), ако това съотношение е строго запазено. Резултатът е Браун газ, смес водород и кислород, която може да бъде икономически генерирана, сгъстен и използван безопасно. В процеса на проф. Браун, газовете водород и кислород са смесени в точни съотношения (известен като "стехиометричен микс"). Газът на Браун се произвежда в рамките на електролизна клетка, без мембрани и с изискванията за безопасност, изобретен от проф. Юл Браун [1].

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

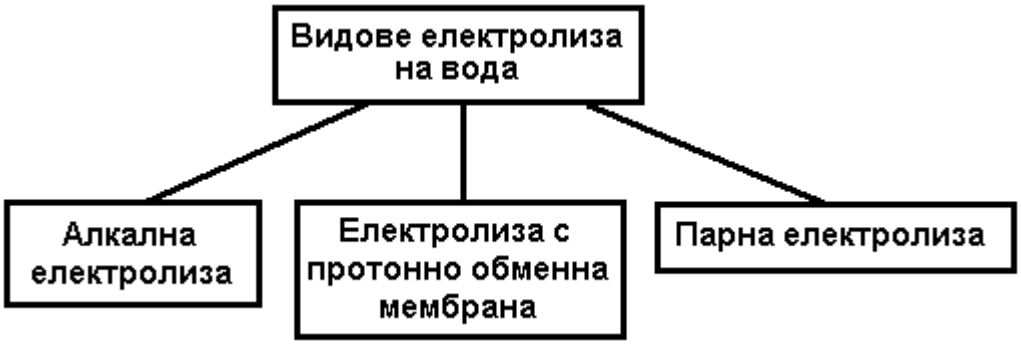
- Работно напрежение;
- Съпротивление на генератора;
- Плътност и големина на тока;
- Климатични условия – атмосферно налягане, температура на околната среда и др.

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.

Методи за производство на водород и кислород чрез електролиза на вода могат също така да са като например електролиза с протонно-обменна мембрана и парна електролиза (фиг.1.1).

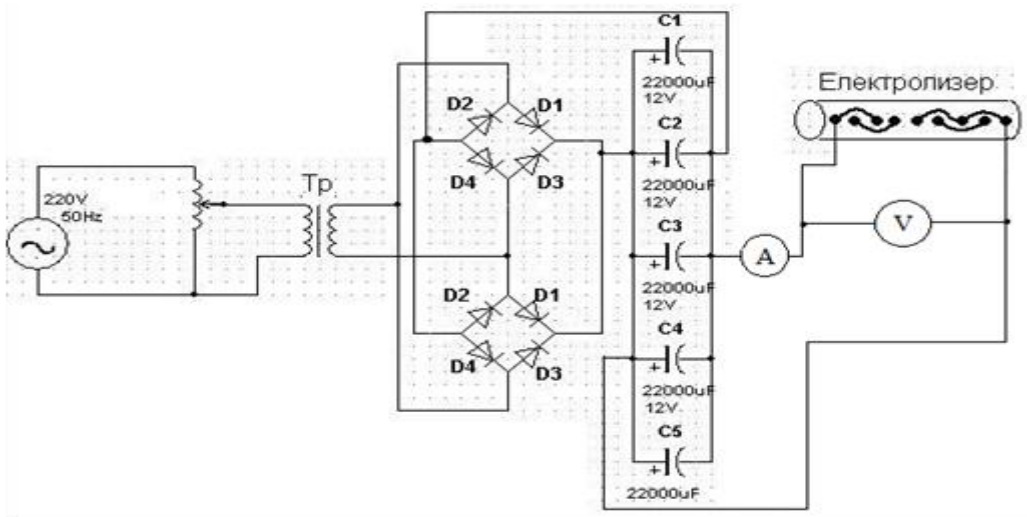
Независимо от факта, че откриването на електролизно разлагане на вода за пръв път е наблюдавано в кисела вода, в промишлени предприятия. Алкалната среда е за предпочитане, тъй като корозията се контролира по-лесно и по-евтини градивни материали могат да бъдат използвани, в сравнение с киселинната електролизна технология.



Фиг.1.1. Блок схема на електролиза на вода.

3. ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ГЕНЕРАТОР НА „БРАУНОВ ГАЗ”

За изследване на параметрите на генератора на „Браунов газ” е изработен стенд. Той включва захранващ източник на напрежение, генератор на „Браунов газ” и резервоар или бълбучник, който да съдържа електролит. Принципната електрическа схема на постоянно токовият източник е показана на фиг.1.2



Фиг.1.2. Електрическа схема на опитната постановка.

Тя се състои от автотрансформатор, токоизправители и филтриращи кондензатори.

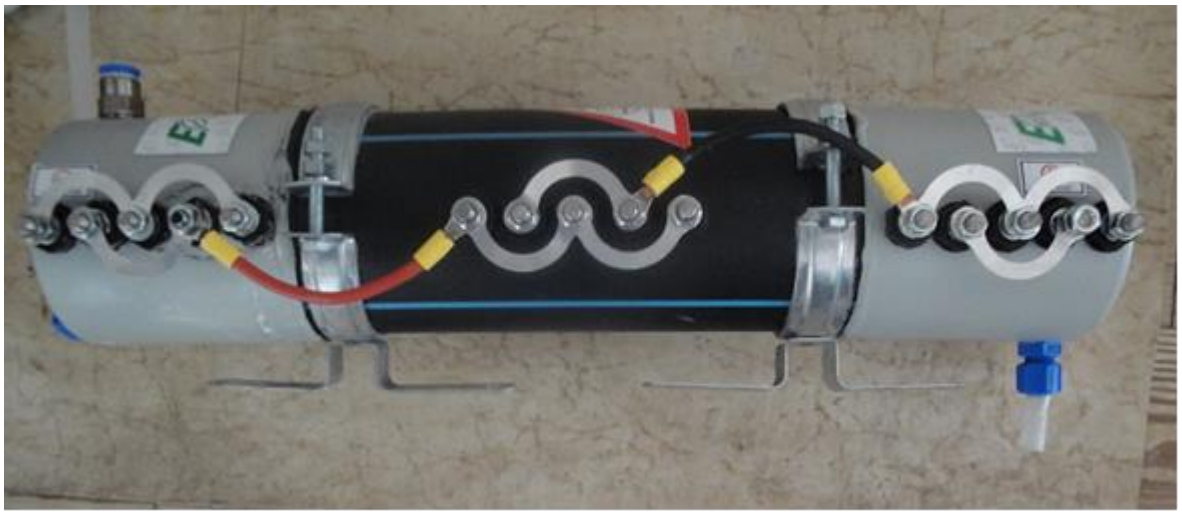
3.1. ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА «БРАУН ГАЗ» ГЕНЕРАТОР С ЦИЛИНДРИЧНИ ЕЛЕКТРОДИ

В опитната постановка за определяне на изследванията е използван един малък портативен генератор модел ЕНО-450 на фирмата «Хидрокареколоджик България» ЕООД. Генератора по спецификации на производителя произвежда до 1,67 l/min, но има сравнително по-голяма консумация на енергия за тази производителност. Както се вижда максималната консумираната мощност е от 240W. Характеристиката на «Браун газ» генератора модел ЕНО-450 са:

- DC напрежение: 12V;
- Консумация на ток: 18A - 22A;

- Литри водород на час: 96 - 100 l/h;
- Ефективност (MMW): 6,5.

Електролизера е изпълнен с електроди частично потопени в електролита, корпуса на електролизера е с цилиндрична форма. Електродите са общо петнадесет разделени на три групи по пет. Характерно за този генератор е, че може електродите да се свързват както активни така също и пасивни. На фиг.1.3 е показан генератор с цилиндрични електроди.



Фиг.1.3. Генератор с цилиндрични електроди.

3.2. ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА «БРАУН ГАЗ» ГЕНЕРАТОР С ДИСКОВИ ЕЛЕКТРОДИ*

При този електролизер електродите са изцяло потопени в електролита. Вътрешната структура на електролизера е показана на фиг.1.4.
Този електролизер е съставен от 61 електрода (ламели) положителните са 31, също колкото отрицателните. Заради паралелното свързване на клетките, работното напрежение на една клетка остава еднакво за целия електролизер, докато максималния ток за него възлиза на сумата от максималния от всички клетки. Поради голямата работна площ през този електролизер може да протече и по-голям ток.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИ НА ГЕНЕРАТОР НА „БРАУНОВ ГАЗ“

4.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА «БРАУН ГАЗ» ГЕНЕРАТОР НА БАЗАТА НА ЕЛЕКТРОЛИЗЕР С ЦИЛИНДРИЧНИ ЕЛЕКТРОДИ

Изследване на електролизер с цилиндрични електроди обхваща с ниска концентрация (5%) и с по-висока от 20%. Изследването с концентрация от електролит от 5% е проведено при сравнително ниска концентрация на натриева основа във водата. Това предполага ниската електропроводимост на електролита и високото работно напрежение. Резултатите от проведените изследвания са посочени в табл.1.

***Лабораторния стенд е разработен със съдействието на Димитър Хайдушки**

Фиг.1.4. Разрез на електролизер с дискове за електроди.

Таблица 1

I[A]	U[V]	P[W]	Q[l/min]	T_l [sec]	E_l[Wh]	MMW[ml/W.min]
10	8,6	86	0,30	201	4,77	3,49
15	9,9	149	0,46	131	5,40	3,08
18	10,8	194	0,57	106	5,70	2,93
20	11,2	224	0,63	95	5,91	2,82
25	12,4	311	0,79	76	6,56	2,54
30	13,7	410	0,98	61	6,95	2,40
35	14,7	515	1,13	53	7,57	2,20
40	15,7	628	1,30	46	8,02	2,08
45	17,9	807	1,5	40	8,97	1,86

При по-висока концентрация на електролита водата става с по-малко съпротивление. Това би трябвало да понижи напрежението, при което се достига определен ток и съответно да доведе до увеличаване на ефективността му. На табл.2 са показани резултатите от изпитването.

Таблица 2

I[A]	U[V]	P[W]	Q[l/min]	T_l [sec]	E_l[W.h]	MMW[ml/W.min]
10	8,5	85	0,31	192	4,52	3,69
15	8,9	133	0,45	134	4,96	3,36
18	9,4	169	0,55	110	5,17	3,22
20	9,8	196	0,61	98	5,35	3,12
25	10,5	263	0,77	78	5,70	2,92
30	11,5	345	0,95	63	6,04	2,76
35	12,2	428	1,09	55	6,53	2,55
40	12,8	512	1,30	46	6,54	2,55
45	16	720	1,50	40	8	2,08

В табл.3 са показани резултати „Браун газ“ генератор на базата на електролизер с цилиндрични електроди (без пасивни) при 20% концентрация.

Таблица 3

I[A]	U[V]	P[W]	Q[l/min]	T_l [sec]	E_l[Wh]	MMW[ml/W.min]
10	2,25	22,5	0,13	480	3	5,56
15	2,4	36	0,18	330	3,3	5,05
18	2,5	45	0,22	278	3,48	4,8
20	2,55	51	0,24	249	3,53	4,72
25	2,68	67	0,3	203	3,78	4,41
30	2,85	85	0,36	168	3,98	4,18
35	2,93	103	0,42	144	4,11	4,06
40	3,07	123	0,47	127	4,33	3,85
45	3,22	145	0,51	117	4,71	3,54

От направеното изследване на генератор на „браунов газ“ с цилиндрични електроди могат да се направят следните по-важни изводи:

1. По-високото съдържание на електролит /натриева основа/ във водата се увеличава и захранващото напрежение;

2. По- добрата ефективност води до увеличаване на дебита. И с двете концентрации се достига дебит от 1,5 l/min, но при 5% това става при по-голяма мощност;

3. Производството на газ при 20% разтвор изисква по-малко мощност , но и с по-висока ефективност.

4.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА „БРАУН ГАЗ“ ГЕНЕРАТОР НА БАЗАТА НА ЕЛЕКТРОЛИЗЕР С ДИСКОВИ ЕЛЕКТРОДИ

Този електролизер поради начина си на изпълнение има много голяма площ на електродите, които са паралелно свързани и разположени на 4mm един от друг. Последните две осигуряват ниско работно напрежение на генератора и по-голям максимален ток.

Ниската концентрация на електролит води до по-високо напрежение за работата на генератора. В табл.4 са показани резултатите от изпитването.

Таблица 4

I[A]	U[V]	P[W]	Q[l/min]	T_l [sec]	E_l[Wh]	MMW[ml/W.min]
10	1,95	19	0,08	728	3,93	4,24
15	1,97	30	0,13	453	3,72	4,48
18	1,99	36	0,17	346	3,43	4,85
20	2,00	40	0,21	286	3,18	5,24
25	2,02	51	0,27	225	3,16	5,27
30	2,04	61	0,33	181	3,08	5,42
35	2,07	72	0,38	157	3,16	5,28
40	2,09	84	0,45	134	3,11	5,35
45	2,11	95	0,50	119	3,14	5,30

При по-високата концентрация (20%) на електролит води до по-ниско напрежение и възможност за повишаване на ефективността му. В табл.5 са показани резултатите.

Таблица 5

I[A]	U[V]	P[W]	Q[l/min]	T_l [sec]	E_l[Wh]	MMW[ml/W_{min}]
10	1,96	20	0,11	540	2,94	5,67
15	1,98	30	0,17	358	2,95	5,64
18	2,00	36	0,20	295	2,95	5,66
20	2,01	40	0,23	258	2,88	5,80
25	2,03	51	0,29	207	2,91	5,72
30	2,05	61	0,35	171	2,91	5,72
35	2,06	72	0,41	147	2,94	5,66
40	2,07	83	0,47	129	2,97	5,62
45	2,09	94	0,53	114	2,98	5,60

От таблиците могат да се направят следните по-важни изводи:

1. Електролизер с пасивни електроди (такива които не са свързани към захранването) е предпоставка за по-високо работно напрежение.

2. При електролизера без пасивни електроди, протича ток при по-ниско напрежение (от около 2-3V), отколкото при тези с пасивните. Използването на по-малко активни електроди, намалява работната площ на клетките в един електролизер, Ефективността на електролизер с пасивни електроди е по-ниска спрямо този с активни електроди. Разликата в ефективността при двете свързвания на електродите е около 40%.

5. АНАЛИЗ, ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Електролизерът с дискове електроди запазва почти постоянна ефективност при промяна на тока. Консумацията на енергия за получаване на един литър газ е около 3Wh при 20% концентрация на електролит.

Това го прави най-ефективният от всички изследвани електролизери. При изследвания електролизер с дискове, тя достига най-малко 2,91Wh, тогава коефициента на полезно действие е 1,86/2,91=0,64. КПД на генератора се явява 64%. Според Юл Браун един генератор произвежда „браун газ“, когато енергийната му ефективност надхвърли 100%.

Следователно при проведените изследвания с така избраните електролизери не се получава „браун газ“, а просто газ оксиводород, който няма енергията и качествата на първия. Така проектирания и изработен стенд дава възможност да се изпитват различни конструкции на електролизери и да се търси по-висока ефективност, които да работят с „Браунов газ“.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Браун Д., ННО генератор на автомобил, Велико Търново, 2000 г.

[2] Браун Д., Теория на брауновия газ, Велико Търново, 2003 г.

[3] Браун Д., Химическо оксидиране, Велико Търново, 2005 г.

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

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: гл. д-р Тодор Йонов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФАКТОРА НА МОЩНОСТ И МЕРКИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕТО МУ

Иван Петров

Резюме: *В работата са представени резултати от проведено изследване за влиянието на фактора на мощност във фирма „Балканкерамик“ с цел мерки за подобряването му. Резултатите от измерването са представени в табличен вид. Направен е и кратък анализ на получените резултати.*
Ключови думи: *електротехника, енергетика и др.*

INVESTIGATION OF POWER FACTOR AND WAYS OF ITS IMPROVEMENT

Ivan Petrov

Abstract: *We present the results of a study showing the impact of power factor in Balkanceramic Ltd. with the aim to improve it. The results are presented in tables. A short discussion on the results has also been made.*
Keywords: *electrical engineering, energetics, reactive energy*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електрическата енергия е основен енергиен ресурс, който трябва да бъде доставен на потребителите с определено качество. За потребителите качеството на електроенергията се характеризира с непрекъснатост на захранването, постоянна честота, постоянна големина и синусоидална форма на захранващото променливо напрежение. В практиката тези параметри не могат да бъдат строго постоянни, защото им влияят редица системни и случайни фактори.

2. ОСНОВНИ ЗАВИСИМОСТИ И ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

С въвеждането на автоматизиран цех за производство на бетонови изделия промени характера на товара на фирма „Балканкерамик“ АД. Това доведе до необходимостта от по-сложни решения за коригиране на товара с подобряване на качеството на захранване и намаляване на санкцията от лош фактор на мощността.

Когато електрическите товари имат линейна волт-амперна характеристика т.е. е налице линейна електрическа верига за моментните стойности на напрежението и тока са в сила следните зависимости [1]:

$$u(t) = u_m sin(\omega_0 t + \delta_1) \quad \text{и} \quad i(t) = i_m sin(\omega_0 t + \theta_1) \tag{1.1}$$

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

където:

u(t) и *i(t)* са моментни стойности на напрежението и тока;

u_m и i_m – амплитудни (максимални) стойности съответно на напрежението и тока;

δ_1 и θ_1 – начални фазови ъгли съответно на напрежението и тока.

За ефективните стойности на синусоидалните напрежение и ток са в сила следните зависимости [1]:

$$U_{eff} = \frac{u_m}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad I_{eff} = \frac{i_m}{\sqrt{2}} \tag{1.2}$$

Въвежда се понятието действителният фактор на мощност, който се означава с *PF* и се дефинира със следното отношение [1]:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \tag{1.3}$$

където:

P е активната мощност на товара, W;

Q – реактивната мощност на товара, VAr.

S – привидна мощност на товара, VA.

Ако в (1.3) съответните мощности се изразят чрез ефективните стойности на напрежението и се вземат под внимание началните фази на напрежението и тока, за действителния фактор на мощност се получава [1]:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\frac{u_m}{\sqrt{2}} . \frac{i_m}{\sqrt{2}} . \cos(\delta_1 - \theta_1)}{\frac{u_m}{\sqrt{2}} . \frac{i_m}{\sqrt{2}}} = \cos(\delta_1 - \theta_1) = \cos\varphi \tag{1.4}$$

където $\cos(\delta_1 - \theta_1)$ представлява фазовата разлика между тока и напрежението, означавана обикновено с ъгъл φ.

От (1.4) може да се заключи, че действителният фактор на мощността *PF* за синусоидални режими, съвпада с използвания в практиката термин, означаван с cos φ. В новата терминология този фактор на мощност се нарича „фактор на мощност от дефазиране" и се отбелязва с PF_{disp}.

Когато електрическите товари се захранват с несинусоидални напрежения и ток, моментните стойности на тези величини се определят по следните зависимости [1]:

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} u_{(k)\,m} sin(k\omega_0 t + \delta_k) \quad \text{и} \quad i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} i_{(k)\,m} sin(k\omega_0 t + \theta_k) \tag{1.5}$$

където:

u(t) и *i(t)* са моментни стойности на напрежението и тока;

$u_{(k)\,m}$ и $i_{(k)\,m}$ – амплитудни (максимални) стойности съответно на k-тия хармоник на напрежението и тока;

δ_k и θ_k – начални фазови ъгли съответно на k-тия хармоник на напрежени-

ето и тока.

За ефективните стойности на несинусоидалните напрежение и ток са в сила следните зависимости [1]:

$$U_{eff} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(u_{(k)\,m}\right)^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(k)m}^2} \quad \text{и} \quad I_{eff} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(i_{(k)\,m}\right)^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{(k)m}^2} \tag{1.6}$$

където: $U_{(k)\,m}$ и $I_{(k)\,m}$ са ефективните стойности съответно на k-тия хармоник на напрежението и тока;

За дефиниране степента на деформация на кривите на напрежението и тока са въведени понятията общи хармонични изкривявания на напрежението THD_U % и тока THD_I %, които се определят по следните зависимости [1]:

$$THD_U\ \% = 100.\frac{\sqrt{U_{(2)}^{\ 2} + U_{(3)}^{\ 2} + \ldots + U_{(n)}^{\ 2}}}{U_{(1)}} = 100.\frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_{(k)}^2}}{U_{(1)}}$$

$$THD_I\ \% = 100.\frac{\sqrt{I_{(2)}^{\ 2} + I_{(3)}^{\ 2} + \ldots + I_{(n)}^{\ 2}}}{I_{(1)}} = 100.\frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}} \tag{1.7}$$

където:

$U_{(2)} \ldots U_{(n)}$ са ефективните стойности на напреженията на висшите хармоници, V;

$U_{(1)}$ – ефективна стойност на напрежението на основния хармоник, V.

$I_{(2)} \ldots I_{(n)}$ са ефективните стойности на токовете на висшите хармоници, A;

$I_{(1)}$ – ефективна стойност на тока на основния хармоник, A.

От (1.6) и (1.7) за ефективните стойност на напрежението и тока са в сила зависимостите [1]:

$$U_{eff} = U_{(1)}.\sqrt{\left(1 + \frac{THD_U\ \%}{100}\right)^2}$$

$$I_{eff} = I_{(1)}.\sqrt{\left(1 + \frac{THD_I\ \%}{100}\right)^2} \tag{1.8}$$

За действителният фактор ма мощността при несинусоидални режими е в сила следната зависимост [1]:

$$PF = \frac{P}{U_{(1)}.I_{(1)}}.\frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{THD_U\ \%}{100}\right)^2}.\sqrt{\left(1 + \frac{THD_I\ \%}{100}\right)^2}} \tag{1.9}$$

където PF_{dist} е компонент на действителния фактор на мощността PF, отразяващ

влиянието на несинусоидалните напрежение и ток.

В литературата, когато се дефинира привидната мощност при несинусоидални режими се използва (1.10):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{1.10}$$

където: D е мощността за деформиране кривите на напрежението и тока, наричана „деформационна мощност".

В практиката много често напрежението е синусоидално или THD_U % < 10%. В този случай напрежението не влияе и зависимостта (1.9) добива вида [1]:

$$PF = \frac{P_{(1)}}{U_{(1)}.I_{(1)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1+\frac{THD_I\ \%}{100}\right)^2}} = \cos\varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1+(THD_i/100)^2}} = \frac{I_1}{I_{eff}} \cos_{\varphi_1} \tag{1.11}$$

$$\cos\varphi_1 = PF_{disp} \tag{1.12}$$

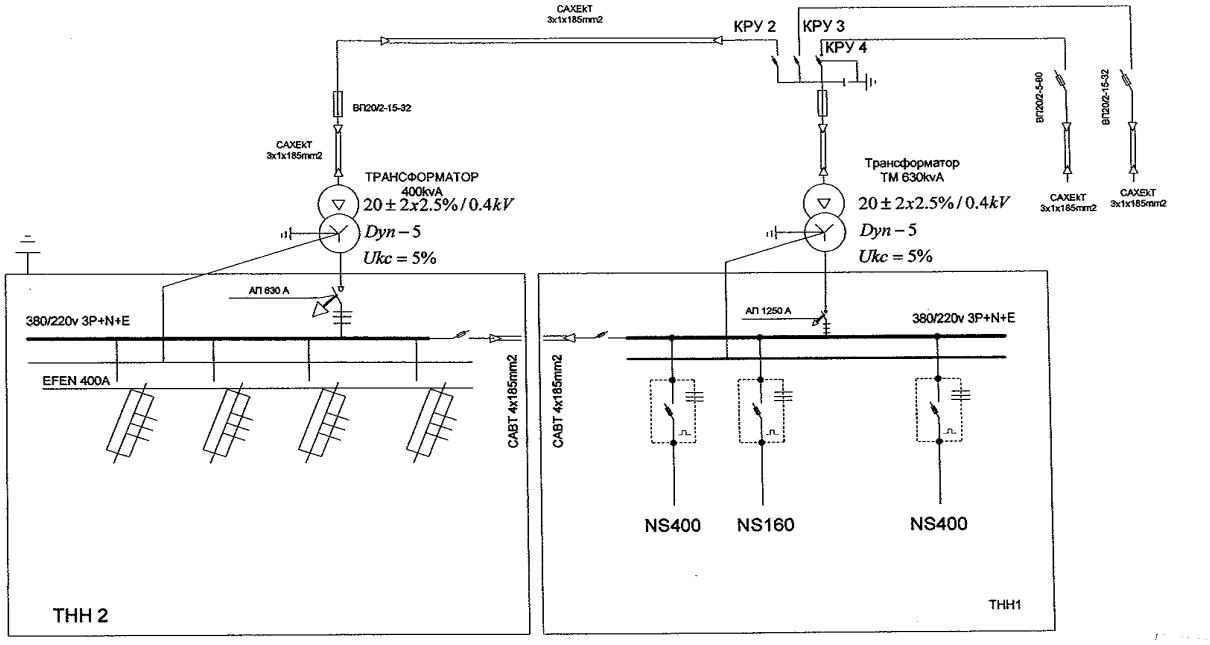
където $P_{(1)}$ е активната мощност на 1-вия хармоник, W.

В действителност това показва, че дори при липса на дефазиране между тока и напрежението (PF_{disp} = 1), действителният фактор на мощност PF ще има стойност различна от 1.

Целта на изследването е определяне фактора на мощност и мерки за подобряването му във фирма „Балканкерамик" след пускане в производство и експлоатация на цеха за бетонови изделия.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ФАКТОРА НА МОЩНОСТТА

В електрозахранването на фирма „Балканкерамик", включва цех за бетонови керемиди и бетонови изделия. Те се захранват от трасформатор 630 kvA. Вторият трансформатор от 400 kvA е предвиден за захранване на административни нужди. При ниско потребление се използва за резервно захранване. Еднолинейната схема на захранване на фирма „Балканкерамик" е показана на фиг.1.



Фиг.1. Обща еднолинейна схема на електрозахранване на „Балканкерамик" оод

Фирмата има два цеха за производство. Единият се произвежда бетонови керемиди, а другият бетонови изделия. В първият цех има асинхронни задвижвания с контакторно пускане, с продължителен режим на работа.

С пускане в експлоатация на втория цех, през 2008 г. се увеличиха асинхронните двигатели с честотно управление и повторно-крактовременен режим на работа на съоръженията.

Осветлението на завода е осъществено от луминесцентни лампи с електронно пускане. Резервирано е захранването на страна средно и ниско напрежение.

Измерването е проведено с портативното устройство Blackbox за определяне на качеството на електрическа енергия, записва параметри постоянно през цялото време позволявайки получаването на всички данни в течение на един период.

Blackbox се захранва с променливо напрежение 220V, уреда се заземява, след което на всяка от фазите под напрежение [2], включително и на неутралния проводник се прикача О-пръстен, и се пристъпва към измерването.

Получените данни за потребление на електрическа мощност са измерени на страна ниско напрежение от трансформаторен пост 630 kvA. Резултатите са показани в табл.1.

4. АНАЛИЗ, ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Анализът показва, че с намаляване на електрическата мощност, рязко се влошава действителния фактор на мощност.

Честите пускания и спиране на машините води до рязко намаляване на фактора на мощността. От резултатите за действителният фактор на мощност и компонентната на дефазиране, може да се заключи, че не са налице значителни несинусоидални явление в напрежението и тока, които да надхвърлят определените от стандартите стойности.

Влошеният фактор на мощност се дължи на неритмичния начин на натоварване на производствените машини и съоръжения. Това е свързано с производствения цикъл. Затова е необходимо да се направят по-задълбочени и продължителни измервания /седмични, месечни/.

Налице е влошен фактор на мощност и следва да се определят параметрите на комплектна кондензаторна уредба. Внедряването й би довело до подобряване на качеството на електроенергия и намаляване на санкциите от влошен фактор на мощност.

Таблица 1

Дата/час 15/10/2012 12:12:20	Активна мощност, kW	Реактивна мощност,kVAr	Пълна мощност, KVA	Действителен фактор на мощност, PF	Фактор на мощност при несинусоидални изкривявания, PF_{disp}
Фаза 1	37.135	27.319	46.101	0.8055	0.8085
Фаза 2	37.501	25.077	45.113	0.8313	0.8344
Фаза 3	38.903	25831	46.698	0.8331	0.8360
Неутрала	0.0011	0.0115	0.0116	0.0945	-
Дата/час 15/10/2012 12:13:51	**Активна мощност, kW**	**Реактивна мощност,kVAr**	**Пълна мощност, KVA**	**Действителен фактор на мощност, PF**	**Фактор на мощност при несинусоидални изкривявания, PF_{disp}**
Фаза 1	35.761	26.470	44.492	0.8038	0.8047
Фаза 2	37.946	25.048	45.468	0.8346	0.8355
Фаза 3	38.455	25.735	46.272	0.8311	0.8321
Неутрала	0.0013	0.0129	0.0130	0.0997	-
Дата/час 15/10/2012 12:14:49	**Активна мощност, kW**	**Реактивна мощност,kVAr**	**Пълна мощност, KVA**	**Действителен фактор на мощност, PF**	**Фактор на мощност при несинусоидални изкривявания, PF_{disp}**
Фаза 1	34.836	27.865	44.609	0.7809	0.7831
Фаза 2	34.403	26.136	43.205	0.7963	0.7989
Фаза 3	36.070	27.462	45.334	0.7956	0.7981
Неутрала	0.0013	0.0118	0.0119	0.1104	-
Дата/час 15/10/2012 12:17:00	**Активна мощност, kW**	**Реактивна мощност,kVAr**	**Пълна мощност, KVA**	**Действителен фактор на мощност, PF**	**Фактор на мощност при несинусоидални изкривявания, PF_{disp}**
Фаза 1	26.087	29.897	39.678	0.6575	0.6597
Фаза 2	27.379	27.760	38.990	0.7022	0.7047
Фаза 3	27.517	28.955	39.945	0.6889	0.6911
Неутрала	0.0010	0.0102	0.0103	0.0966	-
Дата/час 15/10/2012 12:18:05	**Активна мощност, kW**	**Реактивна мощност,kVAr**	**Пълна мощност, KVA**	**Действителен фактор на мощност, PF**	**Фактор на мощност при несинусоидални изкривявания, PF_{disp}**
Фаза 1	18.263	27.330	32.870	0.5556	0.5571
Фаза 2	17.757	25.128	30.769	0.5771	0.5786
Фаза 3	21.069	26.424	33.795	0.6234	0.6254
Неутрала	0.0005	0.0071	0.0071	0.0743	-
Дата/час 15/10/2012 12:19:22	**Активна мощност, kW**	**Реактивна мощност,kVAr**	**Пълна мощност, KVA**	**Действителен фактор на мощност, PF**	**Фактор на мощност при несинусоидални изкривявания, PF_{disp}**
Фаза 1	37.456	33.518	50.264	0.7452	0.7464
Фаза 2	37.167	31.564	48.762	0.7622	0.7633
Фаза 3	39.937	31.791	51.045	0.7824	0.7845
Неутрала	0.0015	0.0130	0.0131	0.1158	-

ЛИТЕРАТУРА

[1] W. Mack Grady, R. J. Gilleskie, Harmonics and How They Relate to Power Factor, Proc. Of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA ’93), San Diego, CA, November 1993.

[2] Георги Павлов, Т. Лалев, Я. Исаев, М. Тончева, Л. Секулов. Проектиране и изграждане на товарно устройство за конвенционални и цифрови релейни защити. VII Научна Конференция ЕФ 2015, Технически университет – София, гр. Созопол. 2015 г.

Автори: Иван Петров Петров, доцент доктор инженер, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *ivanpetrov60@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Николай Матанов

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА МЕТРОВЛАКОВЕТЕ НА СТОЛИЧНИЯ МЕТРОПОЛИТЕН В РЕАЛНИ ЕКСПЛОАТАЦИОННИ УСЛОВИЯ

Иван Петров, Георги Димитров, Тодор Лалев

Резюме: *В настоящата разработка са представени резултати от проведено изследване върху енергийното потребление на метровлаковете на Софийския метрополитен в реални експлоатационни условия. В изследването са обхванати метровлаковете, съставени от вагони модел 81-717.4/81-714.4 и модел 81-740.2/81-741.2. Получените по експериментален път данни за са аналитично обработени и са представени в табличен вид. Въз основа на получените резултати е проведен сравнителен анализ на основните енергийни показатели на изследваните метровлакове, като са формулирани конкретни изводи и препоръки.*
Ключови думи: *Влакове на метрополитена, разход на електроенергия, енергийна ефективност на метровлаковете*

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE ENERGY EFFICIENCY OF THE UNDERGROUND TRAINS OF SOFIA METRO IN REAL EXPLOITATION CONDITIONS

Ivan Petrov, Georgi Dimitrov, Todor Lalev

Abstract: *In this study are presented the results of research carried out on the energy consumption of the underground trains of Sofia metro in real exploitation conditions. The research encompasses underground trains which consist of wagons type 81-717.4/81-714.4 and type 81-740.2/81-741.2. The experimentally received data are analytically processed and introduced in a table form. On the basis of the reached results is carried out a comparative analysis of the main energy indicators of the researched underground trains, and particular conclusions and recommendations are made.*
Keywords: *Underground trains, Electric power consumption, Energy efficiency of underground trains*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Софийският метрополитен е най-голямото строително, транспортно и екологично съоръжение, изградено през последните десетилетия в Република България. Неговото строителство започва през далечната 1979 г., но едва през февруари 1998 г. е пуснат в експлоатация първият участък с дължина 6,5 km и пет

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

метростанции. До 2003 г. са изградени още 3,4 km и нови 3 метростанции. От 2004 г. до средата на 2016 г. строителството на метрото се развива с бързи темпове, като през този период са завършени основните етапи на изграждане на първи и втори метродиаметри. Така към юли 2016 г. общата експлоатационна дължина на линиите на метрото е 40 km с 35 метростанции.

В настоящия момент Софийският метрополитен е основна транспортна артерия в столичния град, като с него ежедневно в делничен ден пътуват около 320 хил. пътника, превозени от над 500 влака в денонощие.

В доклада са представени основните резултати от проведени експериментални изследвания върху енергопотреблението на експлоатираните влакове от „Метрополитен“ ЕАД. Изследванията са проведени през периода 2010-2015 г. Енергийните измервания са направени с използване на специализирани измервателни средства, монтирани в два от влаковете на метрото. Единични измервания са извършени и в тягово-понижаващи станции /ТПС/ на метрополитена. Въз основа на получените резултати е проведен сравнителен анализ на основните енергийни показатели на отделните серии и модификации метровлакове и са формулирани конкретни изводи и препоръки.

2. СЪЩНОСТ НА ПРОБЛЕМА

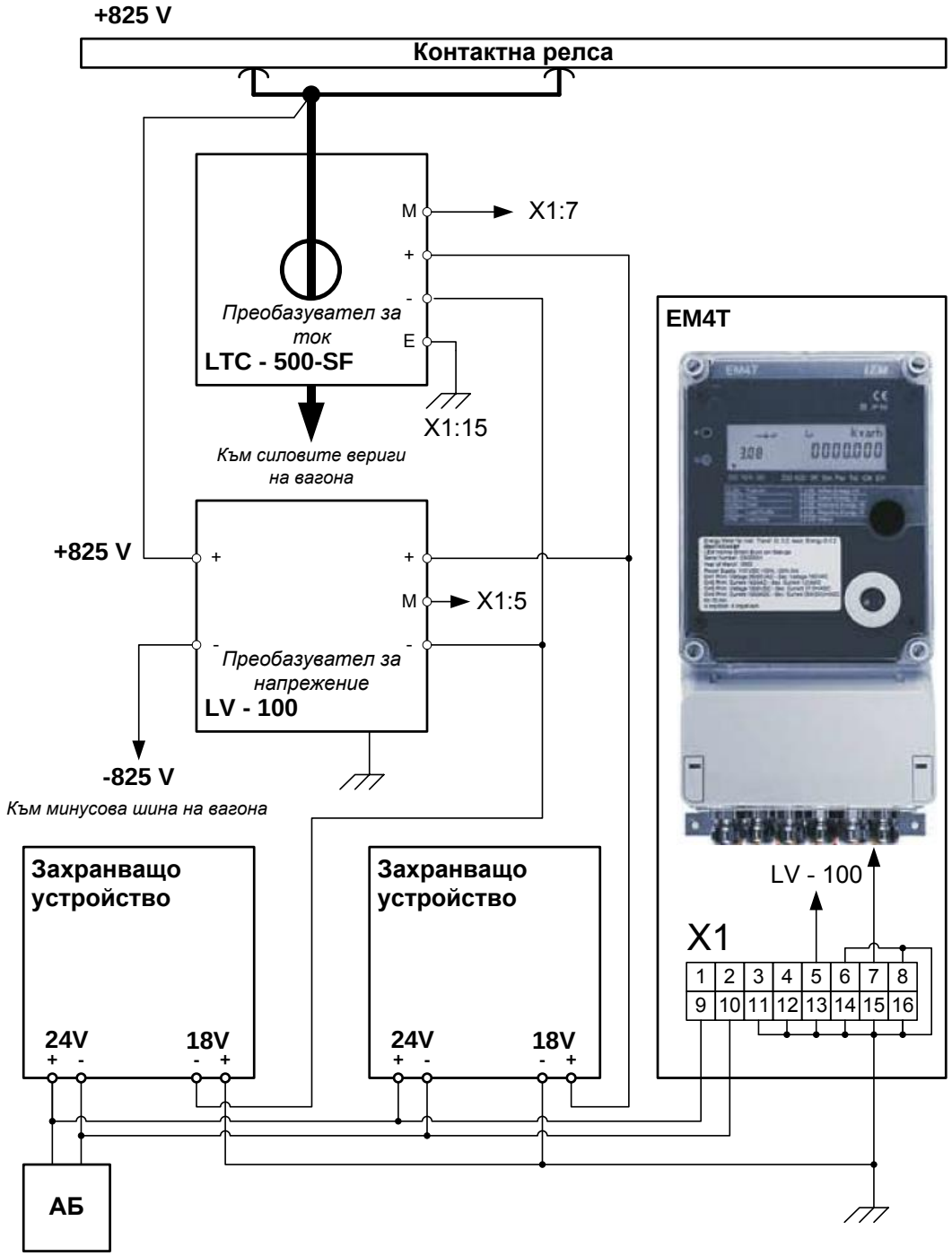
В метрото на гр. София се експлоатират два типа (серии) метровлакове, всеки един от тях съставен от два модела метровагони. Влаковете, съставени от вагони модел 81-717.4/81-714.4 са производство от края на 80$^{-те}$ години на миналия век. Те са с постояннотоково тягово електрозадвижване /ПТЕЗ/ и резисторно-контакторно управление на тяговия и спирачния режими. Влаковете, съставени от вагони модел 81-740.2/81-741.2 са производство 2005-2013 година. Тези вагони са с асинхронно тягово електрозадвижване /АТЕЗ/ захранвано чрез инвертори, изградени с IGB транзистори, които реализират векторно управление на двигателите и режим на рекуперативно спиране. Именно различните по тип и начин на регулиране електрозадвижвания оказват съществено влияние върху разхода на електроенергия.

Цялостния процес на управление движението на метровлаковете по предварително зададен график за движение се определя от машиниста и се контролира от системите за автоматична локомотивна сигнализация и автоматично регулиране на скоростта. Водещата роля на машинистите в задаване параметрите на режимите на движение (ускоряване, движение по инерция, задържане и спиране) се явява важен фактор, оказващ влияние върху цялостния характер на потребление на електрическа енергия, респективно на енергийната ефективност.

Детайлното познаване на електроенергийното потребление на влаковете на метрото е от съществено значение при изготвяне на заявките за доставка на необходимите количества електрическа енергия. Последното се явява и основна предпоставка за проведеното изследване.

3. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА И МЕТОД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА РАЗХОДА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Влаковете експлоатираните в столичното метро не са оборудвани от производителя със средства за измерване на електрическата енергия. За целите на експерименталното изследване в един метровлак от всяка серия бяха монтирани специализирани измервателни средства, производство на фирма LEM – преобразуватели на постоянен ток и напрежение и комбиниран електромер EM4T.
Електромерът модел EM4T е сертифициран по европейски и световни стандарти за измерване на електрическа енергия в електрически транспортни средства за постоянен и еднофазен променлив ток.



Фиг.1. Схема на свързване на измервателните средства в метровагона.

Методът, използван за измерване на електрическата енергия е индиректен. Електромерът е присъединен към входната силова верига на метровагона с помощта на първични преобразуватели за ток и напрежение – токов сензор тип LTC 500-SF и сензор за измерване на напрежението тип LV 100 [2] – фиг.1.
Поради икономически и технически причини измервателните средства (електромер EM4T и сензори) са монтирани да измерват енергията само на един от главните вагони на съответната серия метровлак. Тъй като в метровлаковете от серия 81-740.2/81-741.2 са три, а при влакове от серия 81-717.4/714.4 – четири, и отчитайки обстоятелството, че отделните вагони в един влак имат еднотипно силово електрообзавеждане (еднакви инсталирани електрически мощности, еднакъв брой и тип тягови двигатели, приблизително една и съща обща маса) и режим на управление, може с достатъчна точност да се твърди, че общият експлоатационен разход на енергия $\boldsymbol{E_T}$, kWh, респективно общата върната в тяговата мрежа енергия $\boldsymbol{E_R}$, kWh, за съответния влак може да се получи като показанията на електромера се умножат по 3, съответно по 4.
Получените чрез измервания данни за потреблението на електрическа енергия не позволяват непосредствено извършване на сравнителен енергетичен анализ на двата модела влакове. Това налага получените по експериментален път данни да бъдат вторично обработени за целите на изследването.
Основните показатели, използвани при анализа на данните от изследването са следните:

Специфичен експлоатационен разход на енергия за ускоряване и тяга – $\boldsymbol{e_T}$, Wh/t.km. Той се дефинира като отношение на общата консумирана от тяговата мрежа електрическа енергия $\boldsymbol{E_T}$, kWh и брутната превозна работа на метровлаковете. За определянето на този показател се използва зависимостта:

$$\boldsymbol{e_T = \frac{1000.E_T}{m_{br}.s}} \qquad (1)$$

където:
$\boldsymbol{E_T}$ е измереният общ разход на електроенергия за определен период от време, kWh;
$\boldsymbol{m_{br}}$ – брутна маса на метровлака, t.
$\boldsymbol{s}$ – пробег на метровлака през периода, за който е измерен разхода на електрическа енергия, km.

Показателят, определен с (1), дава общата енергоемкост на извършената транспортна работа. В практиката този показател често се използва за оценка на енергоемкостта на превозите.

Относителен експлоатационен разход на енергия за ускоряване и тяга – $\boldsymbol{e_T^*}$, kWh/km. Той се дефинира като отношение на общата консумирана от тяговата мрежа електрическа енергия $\boldsymbol{E_T}$, kWh и пробега на метровлака $\boldsymbol{s}$, km и се определя по формулата:

$$\boldsymbol{e_T^* = \frac{E_T}{s}} \qquad (2)$$

Чрез (2) се отчита разхода на енергия за единица пробег на транспортните средства.

Специфична енергия, върната в тяговата мрежа, при рекуперативно спиране

– $\boldsymbol{e_R}$, Wh/t.km. Този показател се изчислява по формулата:

$$\boldsymbol{e_R = \frac{1000.E_R}{m_{br}.s}} \qquad (3)$$

където $\boldsymbol{E_R}$ е стойността на върнатата в тяговата мрежа електроенергия за определен период от време, kWh;

Относителна енергия, върната в тяговата мрежа, при рекуперативно спиране

– $\boldsymbol{e_R^*}$, kWh/km. Изчислява се с използване на следната формулата:

$$\boldsymbol{e_R^* = \frac{E_R}{s}} \qquad (4)$$

Относителен нетен разход на енергия

– $\boldsymbol{e_N^*}$, kWh/km. Този показател се дефинира като отношение на разликата между общата консумирана от тяговата мрежа електрическа енергия и върнатата в нея енергия ($\boldsymbol{E_T - E_R}$), kWh и пробега на метровлака $\boldsymbol{s}$, km. Определя се по зависимостта:

$$\boldsymbol{e_N^* = \frac{(E_T - E_R)}{s}} \qquad (5)$$

Чрез (5) се отчита реално необходимата електрическа енергия за единица пробег на метровлака. В практиката този показател е основен при планиране на необходимите количества трафична електрическа енергия.

Специфична нетна енергия за извършване на транспортна работа по превозването на 100 пътника на разстояние 1 km

– $\boldsymbol{e_{100p}}$, kWh/100p.km. Той се дефинира като отношение на нетния относителен разход на енергия $\boldsymbol{e_N^*}$ и приведения към 100 пътника среден брой на пътуващите в един метровлак. Този показател се изчислява с използване на следната формула:

$$\boldsymbol{e_{100\,p} = \frac{e_N^*}{0{,}01.p_{ave}}} \qquad (6)$$

където: $\boldsymbol{e_N^*}$ е относителният нетен разход на енергия на метровлака, kWh/km; $\boldsymbol{p_{ave}}$ – среден брой пътници, пътуващи в метровлака.

Показателят, определен по (6), дава енергоемкостта на пътническата превозна работа. В практиката този показател се използва за сравнителна оценка на енергийната ефективност на превозите при различни пътнически транспортни средства.

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ

За двете изследвани серии метровлакове, експерименталните измервания са проведени за период на експлоатация от 3 години. Резултатите от контролните отчети за разхода на електрическа енергия и пробега на влаковете, както и стойностите на относителните енергии e_T* и e_R* са показани в табл.1 и в табл.2.

Таблица 1

Контролни отчети за разхода на електрическа енергия на влак серия 81-717.4/81-714.4

Дата на отчитане	Показание на километража	Показание на електромера		Относителен разход на енергия за целия влак, e_T*	Относителна рекуперирана енергия за целия влак, e_R*
		Регистър 1.08 Потребление	Регистър 2.08 Рекуперация		
-	km	MWh	MWh	kWh/km	kWh/km
14.05.2010 г.	637215	196,241	-	-	-
04.07.2011 г.	744775	424,268	-	8,48	-
04.06.2012 г.	821320	590,373	-	8,68	-
11.10.2012 г.	849155	646,320	-	8,04	-
28.05.2013 г.	900275	757,248	-	8,68	-

Таблица 2

Контролни отчети за разхода на електрическа енергия на влак серия 81-740.2/81-741.2

Дата на отчитане	Показание на километража	Показание на електромера		Относителен разход на енергия за целия влак, e_T*	Относителна рекуперирана енергия за целия влак, e_R*	Относителен дял на върнатата енергия
		Регистър 1.08 Потребление	Регистър 2.08 Рекуперация			
-	km	MWh	MWh	kWh/km	kWh/km	%
22.06.2012 г.	517540	984,044	136,112	-	-	-
23.05.2013 г.	596843	1233,664	199,307	9,44	2,39	25.3
08.05.2014 г.	606406	1263,038	205,642	9,21	1,99	21.6
03.07.2014 г.	620263	1305,294	215,940	9,15	2,23	24.4
29.10.2015 г.	688631	1515,617	266,781	9,23	2,23	24.2

В табл.3 са показани обобщени стойности на енергетичните показатели за изследваните серии метровлакове.

Таблица 3

Обобщени стойности на специфичния и относителния разход на енергия на метровлаковете серии 81-717.4/81-714.4 и 81-740.2/81-741.2

Период на провеждане на изследванията	Пробег	Серия метровлак и средна обща експлоатационна маса на влака		Консумирана и върната електроенергия за целия влак		Специфичен нетен разход на електроенергия за целия влак	Относителен нетен разход на електроенергия за целия влак
	s	серия	m_{br}	E_T	E_R	e_N	e_N*
	km	-	t	MWh	MWh	Wh/t.km	kWh/km
05.2010 – 05.2013 г.	269764	81-717.4/ 81-714.4	149	2244,028	-	55,83	8,32
06.2012 – 10.2015 г.	171091	81-740.2/ 81-741.2	159	1594,719	393,007	44,17	7,02

От получените резултати представени в табл.1, табл.2 и табл.3 се вижда, че метровлаковете от серия 81-740.2/81-741.2 са със значително по-високата енергийна ефективност в сравнение с тези съставени от вагони модел 81-717.4/81-714.4.

Това се дължи на възможностите на системата за регулиране на тяговото електрозадвижване да реализира режим на електрическо рекуперативно спиране. В реални експлоатационни условия върнатата електрическа енергия в тяговата мрежа се движи в границите от 24% до 25% от консумираната.

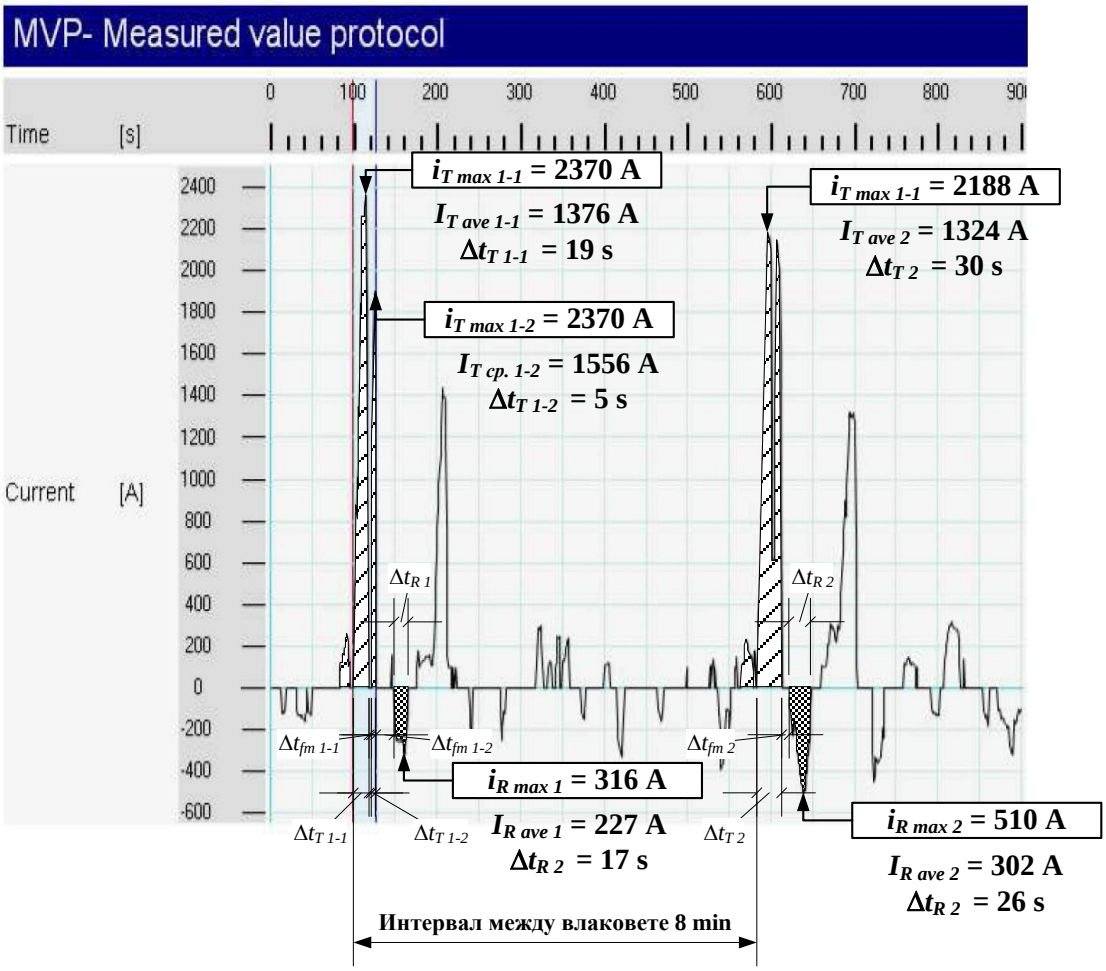
За метровлаковете съставени от вагони модел 81-740.2Б и 81-741.2Б към настоящият момент не е осигурена техническа възможност за измерване на електрическата енергия в тях. С помощта на числени методи, и с отчитане влиянието на допълнителните мощности за климатизация, са определени относителните енергии за тази модификация метровлакове, чиито стойности са: $\boldsymbol{e_T}$* = 10,1 kWh/km; $\boldsymbol{e_R}$* = 1,98 kWh/km; $\boldsymbol{e_N}$* = 8,03 kWh/km.

Важен показател за определяне енергийната ефективност на пътническата превозна работа е изразходваната енергия за извършване на превозна работа 100 пътник-километра (100p.km). Проведените, с използване на (6), изчисления показват, че този показател за метровлакове серия 81-740.2/81-741.2 е 4,38 kWh/100p.km, за серията модифицирани метровлакове 81-740.2Б/81-741.2Б – 4,95 kWh/100p.km и 5,20 kWh/100p.km за метровлакове серия 81-717.4/81-714.4. С отчитане на средното дялово участие на различните модели и модификации метровлакове в графика за движение, средната стойност на този показател за цялата маршрутна мрежа на метрото е 4,92kWh/100p.km. За сравнение този показател за метровлаковете на Лондонското метро, пътуващи в час пик на делничен ден, е 4,4 kWh/100p.km [5]. По високият разход за единица превозна работа при експлоатираните от „Мерополитен" ЕАД влакове може да се обясни със сравнително късите разстояния между метростанциите (1000÷1200 m), някои специфични характеристики на определени метроучастъци, както и с непълното използване на превозния капацитет на вагоните (в час пик плътността на запълване на вагоните е около 5,5 пътника/m^2 и то само в около 50% от общата разгъната дължина на маршрутната мрежа на метрото).

За установяване влиянието на машинистите върху енергийното потребление на метровлаковете са проведени допълнителни изследвания. За целта в тягово-понижаващата станция /ТПС/ на МС „Хан Кубрат", със специализирана измервателна апаратура, са извършени серия от записи на тяговите токове, консумирани от метросъстави модел 81-740.2/741.2 и 81-740.2Б/741.2Б.

На фиг.2 е представена осцилограма на изменението на тяговия ток, заснета на един от изводите в ТПС на МС „Хан Кубрат". Измерването е проведено за интервал от 15 min (900 s), който обхваща всички основни режими на движение на състава – ускоряване и движение под ток, движение по инерция и електрическо спиране с използване на рекуперация (на осцилограмата това са интервалите от време, през които кривите на тока имат отрицателни стойности). Върху заснетата осцилограма ясно се различават два последователни процеса на потегляния на метровлакове серия 81-740.2Б/81-741.2Б.

За целите на анализа графиките на фидерния ток, отнасящи се двата пускови процеса, са допълнително обработени. На фиг.2 са посочени максималните моментни $\boldsymbol{i_{T\,max\,i}}$, $\boldsymbol{i_{R\,max\,i}}$ стойности на тяговите и рекуперативните спирачни токове и средните им стойности $\boldsymbol{I_{T\,cp.\,i}}$, $\boldsymbol{I_{R\,cp.\,\text{i}}}$ за интервалите от време $\boldsymbol{\Delta t_{T\,i}}$ и $\boldsymbol{\Delta t_{R\,i}}$, през които те са протичали.



Фиг.2. Осцилограма с нанесени стойности на фидерния ток, заснета в ТПС на метростанция „Хан Кубрат”

За да може да се установи кой от двамата машинисти е управлявал влака с по-нисък нетен разход на енергия, са използвани следните формули за определяне на общата тягова и рекуперативна енергии [1, 4]:

$$E_T = \bar{U}_T \int_{t_i}^{t_{i+1}} i_T(t).dt \qquad E_R = \bar{U}_R \int_{t_j}^{t_{j+1}} i_R(t).dt \ , \tag{5}$$

където:

$\bar{U}_T$, $\bar{U}_R$ са съответно средните стойности на напреженията в тяговата мрежа за режим на ускоряване и тяга и режим на рекуперативно спиране, V;

$i_T(t)$, $i_R(t)$ – съответно моментните стойности на тока за режим на ускоряване и тяга и рекуперативния спирачен ток, А.

В (5) решенията на интегралите дават количеството електричество за определените интервали от време. Средните стойности на напреженията за двата режима на движение са изчислени на база измервания в ТПС [3].

С използване на (5) са изчислени енергиите за режим на ускоряване и движение под ток и режим на рекуперативно спиране за двата влака поотделно. Резултатите от изчисленията са показани в табл.6.

Таблица 6

Параметри	Първи влак	Втори влак
Разстояние между МС, m	1165	1165
Средна стойност на напрежението в режим ускорение и тяга, V	865	866
Средна стойност на напрежението при рекуп. спиране, V	930	931
Разход на енергия за ускорение и тяга, kWh	8,219	9,557
Върната в тяговата мрежа ел. енергия при рекуп. спиране, kWh	0,996	2,034
Нетен разход на ел. енергия, kWh	7,223	7,523
Относителен дял на върнатата в тяговата мрежа електрическа енергия, %	**12,0**	**21,3**
Относителен нетен разход на електрическа енергия, kWh/km	**6,200**	**6,450**
Специфичен нетен разход на ел. енергия за времето на движение, Wh/t.km	**41,3**	**43,0**

Анализът на данните в табл.6 показва, че машиниста на първия влак е реализирал с около 4% по-нисък нетен разход на енергия.

5. ОСНОВНИ ИЗВОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Получените резултати от проведеното изследването дават основания да са направят следните изводи:

❖ В режим „Тяга” (пускане, ускоряване и движение под ток) специфичният разход на енергия на двете изследвани серии метровлакове, съставени съответно от вагони модели 81-717.4/81-714.4 и 81-740.2/81-741.2, е приблизително еднакъв. Това може да се обясни със следните особености:

- Времетраенето на резисторния пусков процес при метровагони модел 81-717.4/81-714.4 е около 10 s, при средно времетраене на теглителния режим около 25÷30 s;
- Разликата в средния работен к.п.д. на електрозадвижванията с ПТД и АТД след завършване на началния процес на регулиране – $\eta_{ПТЕЗ} \approx 0,94$ и $\eta_{АТЕЗ} \approx 0,90$;
- По-високо потребление на енергия при новите метровлакове за захранване на системите за управление, вентилацията и климатизацията, която формира допълнителен относителен разход на електроенергия около 0,15÷0,2 kWh/km при метровагони модел 81-740.2/81-741.2 и около 0,8÷1,0 kWh/km при метровагони модел 81-740.2Б/81-741.2Б.

❖ При метровагони модел 81-740.2/81-741.2 средният относителен дял на върнатата в тяговата мрежа електрическа енергия при режим на рекуперативно спиране е около 24%.

❖ Аналитичните енергийни разчети за метровлаковете съставени от вагони модел 81-740.2Б/81-741.2Б показват по-висок общ относителен разход на енергия – около 10÷10,1 kWh/km и по-нисък относителен дял на върната в тяговата мрежа енергия при рекуперация – около 19÷20%, които са следствие на инсталираните във вагоните климатично-вентилационни уредби.

❖ Техниката на управление на метровлаковете от страна на машинистите може да окаже съществено влияние върху енергийното потребление, като в отделни случаи преразходът на електроенергия може да достигне до 8÷10% от оптималните стойности.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното експериментално изследване дава възможност да се направи реална оценка на енергийната ефективност на експлоатираните от „Метрополитен“ ЕАД метровлакове. Получените резултати за енергийните показатели на различните серии метровлакове показват, че метровлаковете задвижвани с асинхронни тягови двигатели и режим на рекуперативно спиране реализират по-нисък нетен разход на енергия в реални експлоатационни условия.

Анализа на резултатите от изследването за влиянието на машинистите върху енергийното потребление се вижда, че чрез начина на водене на влака те могат да окажат съществено влияние върху енергийния разход на влаковете. В тази връзка целесъобразно се явява провеждането на специализирано обучение на машинистите за управление на метровлаковете с минимален нетен разход на електрическа енергия.

Получените резултати за енергийните параметри на метровлакове серия 81-717.4/81-714.4 дават основание да се препоръча на ръководството на фирма „Метрополитен“ ЕАД, при доказана икономическа целесъобразност, от 2018 г. да предприеме действия по модернизирането им, като системите за резисторно регулиране бъдат заменени със съвременни импулсни регулатори за постояннотокови тягови електрозадвижвания, осигуряващи и режим на рекуперативно спиране.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Българанов Л., ***Електрически транспорт***, София, 2009

[2] Димитров Г., Т. Лалев, ***Експериментално изследване на разхода на електроенергия от метровлаковете на столичния метрополитен в реални експлоатационни условия***, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, София, 2009, стр. VII-7 – VII-12

[3] Лалев Т., ***Изследване на входни преобразуватели и цифрови релейни защити в тягови мрежи за постоянен ток***, Дисертационен труд за придобиване на ОНС „Доктор”, ВТУ „Тодор Каблешков”, София, 2014

[4] Розенфельд В. Е., И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров, ***Теория электрической тяги***, Транспорт, Москва, 1995

[5] David JC MacKay, ***Sustainable Energy – without the hot air***, UIT Cambridge, England, 2009, стр. 120

Автори: Иван Петров Петров, доц. д-р инж., кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *ivanpetrov60@abv.bg*; Георги Иванов Димитров, ас. инж., кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *dimitrov_gd@mail.bg*; Тодор Кънчев Лалев, д-р инж., „Сименс България” ЕООД, E-mail address: *lalev85@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Иван Ангелов

МОДЕЛИРАНЕ РАБОТАТА НА СИЛОВИ ЕЛЕКТРОННИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ, ИЗПОЛЗВАНИ ВЪВ ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ

Ивайло Стоянов, Васил Иванов, Теодор Илиев,
Григор Михайлов, Елена Иванова

Резюме: *В работата е извършено компютърно моделиране на еднофазен инвертор на напрежение в програмна среда Matlab-Simulink. Получени са графики и диаграми на изходните токове и напрежения за различни работни режими за инвертор с малка мощност. Направен е анализ и оценка на коефициентите на полезно действие и ефективност и нивата на хармоници, от режима на работа.*
Ключови думи: *инвертор, кпд, мощност, форма на вълната, хармоници, фотоволтаични системи*

MODELLING THE OPERATING MODE OF POWER ELECTRONIC INVERTERS OF ELECTRICAL ENERGY, USED IN PV SYSTEMS

Ivaylo Stoyanov, Vasil Ivanov, Teodor Iliev,
Grigor Mihaylov, Elena Ivanova

Abstract: *In the study has been performed computer modelling of single-phase voltage inverter in the programming environment Matlab-Simulink. The graphs and charts of the output currents and voltages were obtained for different operating modes of a low-power inverter. The efficiency and the levels of harmonics, depending on the working mode, were evaluated and analyzed.*
Keywords: *Inverter efficiency, output waveform spectrum of harmonics, photovoltaic systems*

1. INTRODUCTION

It is known that in order to be able to use the electrical energy from photovoltaic systems (PVS) it has to be converted to an appropriate type. Therefore, the PVS architecture includes power electronic converters – inverters. They convert Direct Current to Alternating Current with so that the requirements of the load are satisfied [3]. The most efficient mode of operation is the impulse regime. This mode provides minimum energy losses in the power semiconductor components and the efficiency of the inverter could reach up to 98%.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

In most cases the invertors operate simultaneously with other types of power converters (transformers, capacitors and inductors), which can act as a galvanic isolation of circuits and/or filtering aiming to improve/stabilize the output parameters. For example, capacitors and inductors are used in invertors for energy accumulation and subsequent discharge of the electrical energy, which ensures the smooth (continuously) amendment of current and voltage in the circuits of force transducers, regardless of their impulse nature of work.

The aim of the article is to model the operation of a single-phase current bridge inverter in the Matlab-Simulink programming environment.

2. EXPOSURE

The voltage at the exit of the invertors has a well-defined form, which depends on algorithm of power management of the elements. Depending on the system of variable currents for powering the load are used single-phase and three-phase inverters of voltage [1]. The basic elements of the power part of the inverters are semi-conductor devices managed by the on/off method. Such semiconductor devices include the bipolar transistors with an insulated gate (IGBT), high-power field-induced channel transistors (MOSFET power) or GTO-thyristors. The voltage inversion could be implemented using hard and soft switching of the power devices. Soft switching allows to reduce the losses of the power devices at the expense of more complicated circuit.

For hard switching voltage invertors, a large capacitance is connected in parallel to the direct current source at the input of the inverter.

The management algorithm of power elements determines the waveform of the output voltage, but for a limited time intervals it remains constant and equal to the voltage of the source.

The main objective is to pass only the first harmonic component (50 Hz) from the output voltage, and use it to power the loads. Therefore, in voltage inverters an important issue is the total harmonic distortion (THD) of the output voltage (THD_U).

3. INVESTIGATION METHOD

Fig.1 shows the circuit schematic of a single-phase voltage inverter, which consists of four (IGBT) NPN transistors with built-in diode, connected in the opposite direction of the transition E-C. The load impedance Z_T might have various character, but most often it has an active-inductive (L, R) nature. This is caused the primary winding of the transformer or the filter, which is usually connected at points A and B (where the output voltage U_d is).

Each pair of upper and lower transistor amplifies either the positive or negative half-wave, and are marked as A and B. The gate signals of the transistors for the two half-waves are inverted from each other.

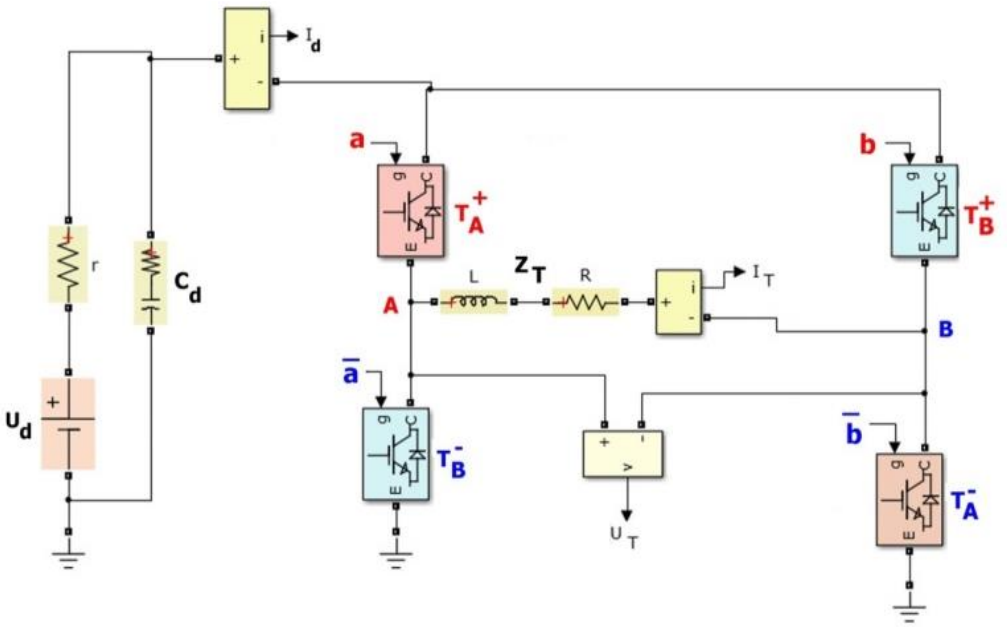


Figure 1. Bridge scheme of single-phase voltage inverter

In Fig.2 is shown the waveform of current i_d. The average value is equal to the constant current consumed by the power source.

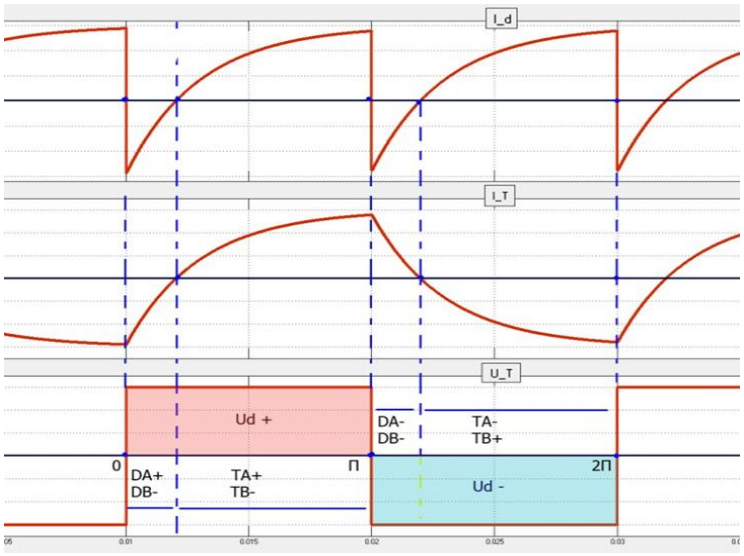


Figure 2. Time charts of the voltage inverter obtained in the Matlab-Simulink simulation environment.

If the load is purely active, the waveform of the current would be the same as that of the output voltage and the intervals of conductance of the inversed diodes would be missing. For the selected management algorithm of power devices, the value of the output voltage is equal to + U_d in the positive half period and equal to – U_d in the negative half period.

The law of variation of the load current i_T through one half period (for example, positive) of the output voltage U_T is given by:

$$i_T = \frac{U_d}{R_T} \cdot \left[1 - \frac{2.e^{-\frac{\pi}{\omega.\tau}}}{1+e^{-\frac{\pi}{\omega.\tau}}}\right], \quad (1)$$

where $\tau = \frac{L_T}{R_T}$ is the load's time-constant; U_d – - the direct voltage from the PVS,

R_T – the active component of the load Z_T.

Considering that for $\vartheta = \pi$, adjustment angle and $i_T = I_M$, from (1) can be obtained the peak value of the current through the power devices:

$$I_M = \frac{U_d}{R_T} \cdot \frac{1 - e^{\frac{-\pi}{\omega \cdot \tau}}}{1 + e^{\frac{-\pi}{\omega \cdot \tau}}}. \quad (2)$$

If the switching overvoltage is ignored when switching the power elements, on one element (transistor or diode) will be applied the whole supply voltage (on/off operating mode). From the graph in Fig.2 you can be obtained the RMS value of the output voltage:

$$U_T = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} U_d^2 \cdot d\vartheta} = U_d. \quad (3)$$

The peak value for the first harmonic of the output voltage is:

$$U_{TM}^1 = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} U_d \cdot sin\vartheta d\vartheta = \frac{4}{\pi} \cdot U_d, \quad (4)$$

with an RMS value

$$U_T^1 = \frac{U_{TM}^1}{\sqrt{2}} = \frac{2.\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_d. \quad (5)$$

3. RESULTS

A simulation has been performed in the Matlab-Simulink environment [2] of a single-phase voltage inverter bridge (Fig.3). In Fig.4 is shown the internal structure of the control unit.

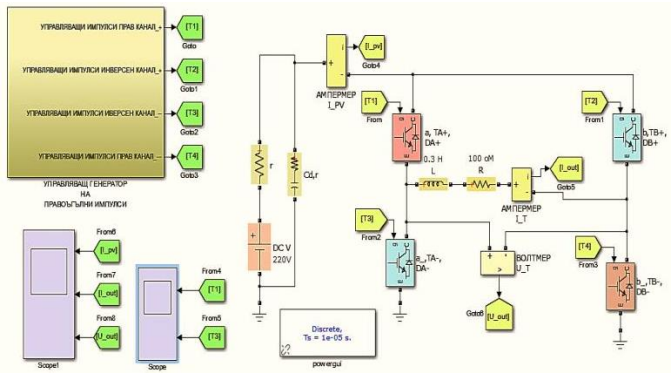


Figure 3. Architecture of a single-phase voltage inverter in Matlab-Simulink.

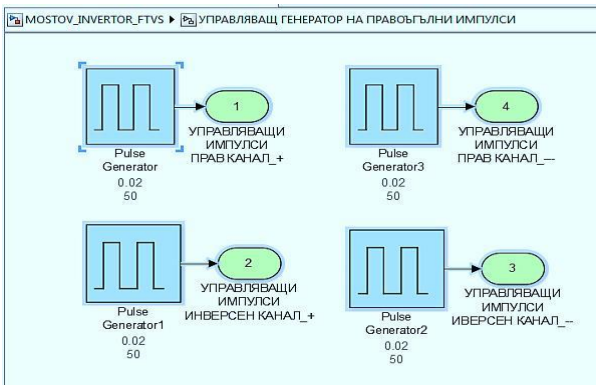


Figure 4. Dialog window of subsystem – managing generator of rectangular pulses with a duty cycle of 50%.

The control generators are connected to the gates of each transistor. The rectangular impulses used to manage the two diagonal transistors are shown in Fig.5.

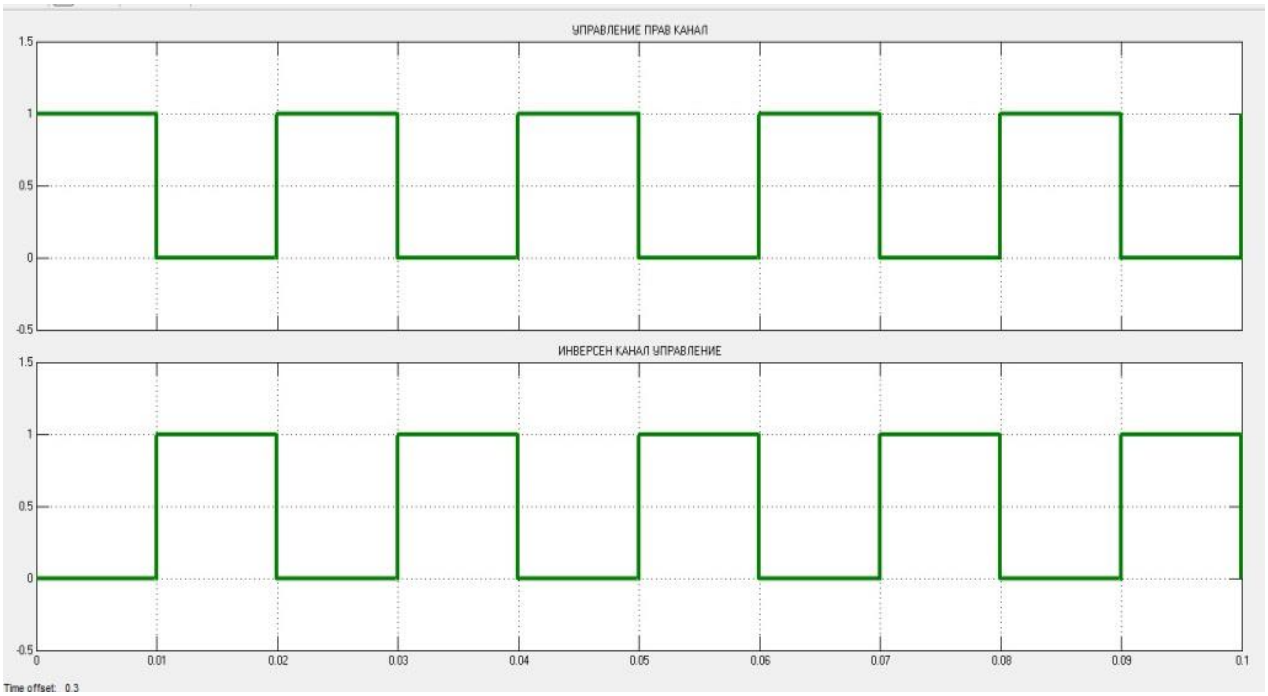


Figure 5. Managing signals for transistors switching for straight and inverse channel, phased of $\pi = 180$ o, with amplitude 1 V.

Through simulation of the model from Fig.3 has been obtained information about the size and shape of the power from the battery I_{BAT}, output current I_T and output voltage U_T.

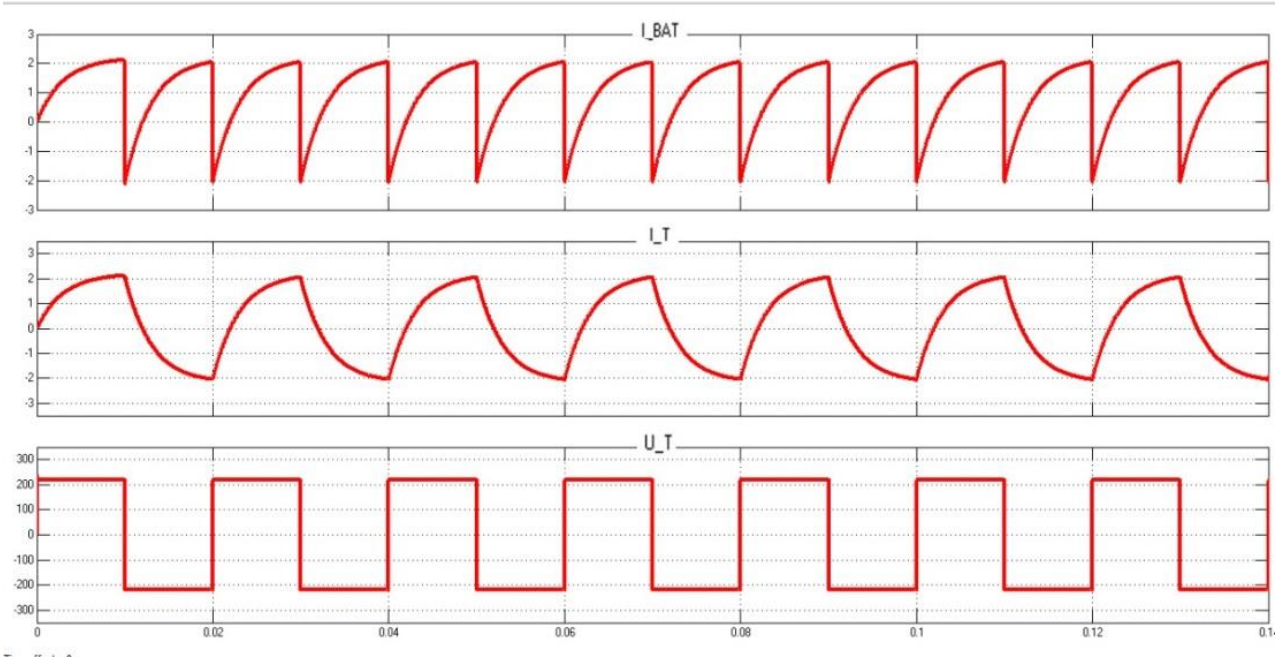


Figure 6. Time-charts of I_{BAT}, I_T and U_T with R-L load.

The analysis of diagrams of Fig.6 shows that the shape of the waveform of the output current depends on the complex nature of the load. The waveform of output voltage should be rectangular with a duty cycle of 50% and frequency 50 Hz.

In Fig.7 is shown the amplitude-frequency response (AFR) and tabular data for the magnitude of the harmonics of the direct current I_{DC}.

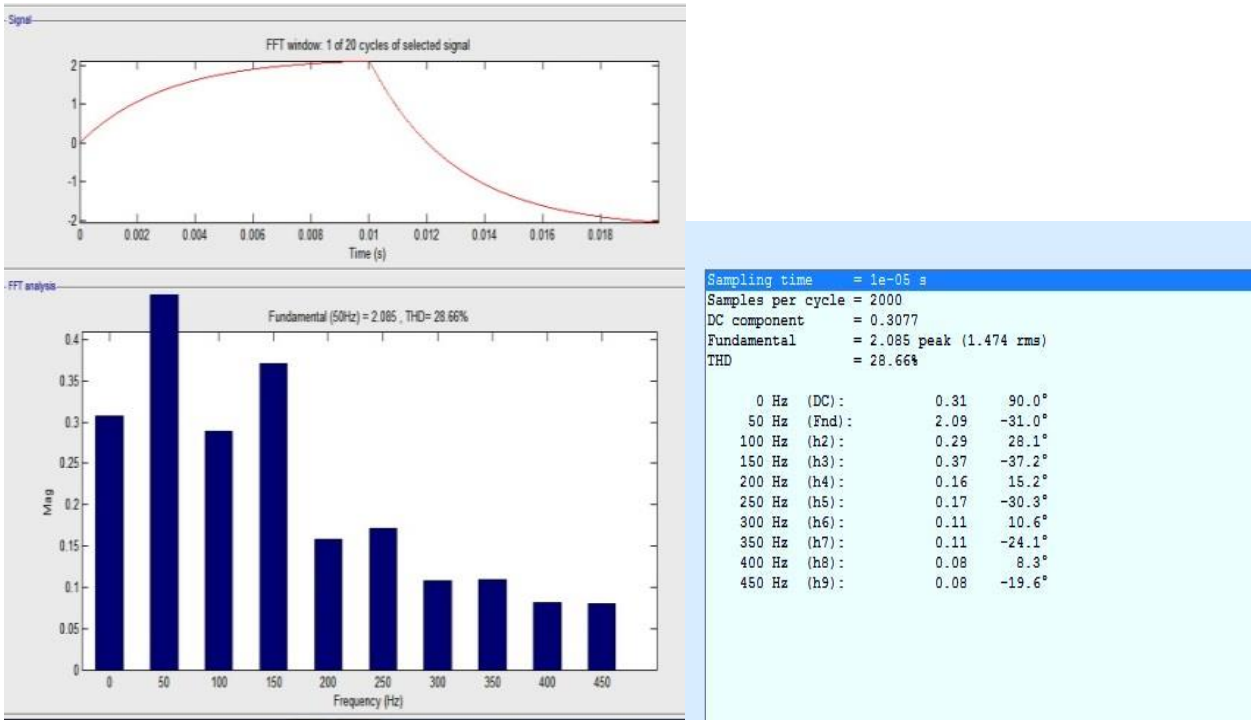


Figure 7. AFR and measured values of the harmonics of the inverter, contained in the AC output current I_T

The simulation results for the output voltage is presented in Fig.9. The waveform is rectangular with the typical function of a Fourier series with only odd harmonics.

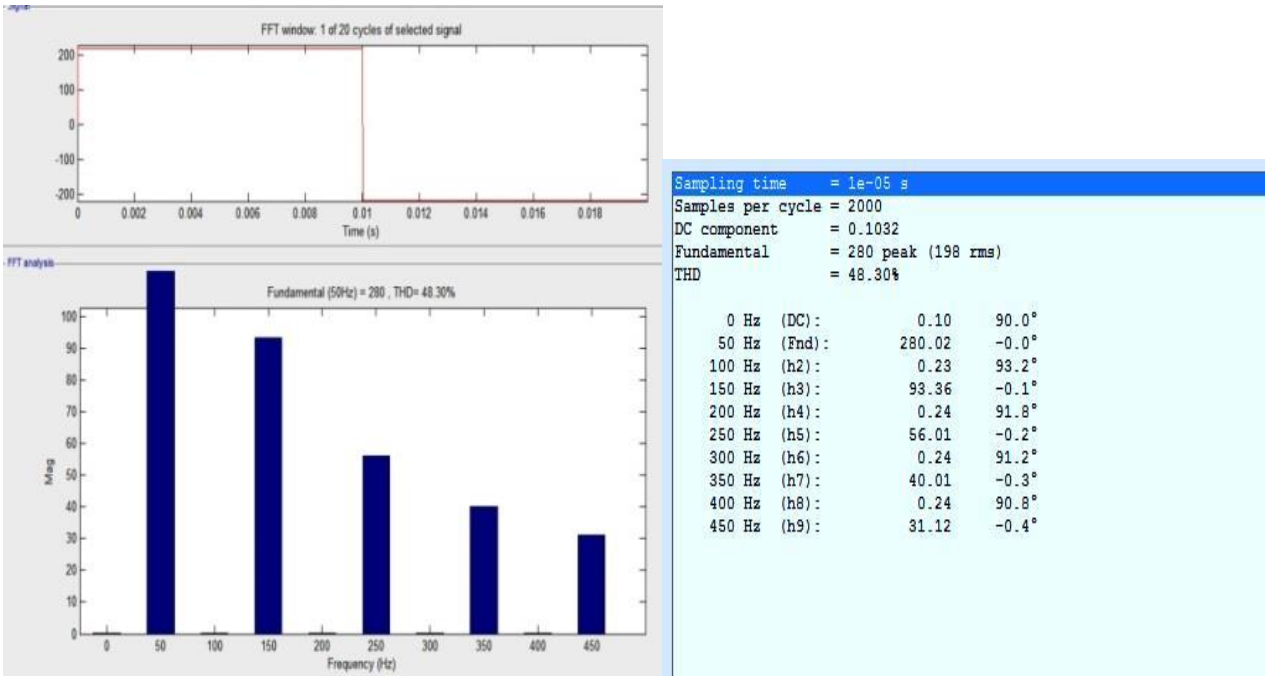


Figure 8. AFR and measured value of harmonics in inverter's work, contained in output voltage U_T

From Fig.9 is measured the value of the first harmonic from the output voltage, which has a RMS value of 198V.

From the obtained simulation results is determined the efficiency of the inverter system with the expression:

$$\eta = \frac{P_{1out}}{P_{1in}}, \quad (6)$$

where P_{1out} is the active output power for the first harmonic; P_{in} is active input power. Active output power is calculated using the RMS values of the first harmonics of current and voltage, determined from Fig.8 and Fig.9. The DC active power input is calculated according to (6) and after substitution with the numbers in (7) the efficiency is obtained:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{250,1}{277,2} = 0,902. \quad (7)$$

Phase shift angle is $\varphi_1 = -31^0$.

4. CONCLUSION

The voltage invertors with rectangular shape of the output signal have high efficiency. The circuit schematics of a single-phase bridge inverter have been synthesized in the Matlab-Simulink programming environment.

A simulation has been performed for various operation modes, and data for the levels of harmonic components of voltage and current have been obtained.

The results showed that a band-reject filter is required at the output in order to reduce the higher harmonic components in the output circuit.

REFERENCES

[1] Анчев, М., (2007), ***Силовите електронни устройства***, София, 2007.

[2] Худяков, Вл., Герман – Галкин, С. ***Силовая Электроника, №1, №2, №3, №4"2005, №1"2006, №4'2007, №1'2008, №2'2008, №4'2008, №4"2009, №2'2010, №4"2011.***

[3] Й. Колев., (1994), ***Токозахранващи устройства***, Печатна база при ВМЕИ-Варна.

Authors: Ivaylo Stoyanov, Assoc. Prof, PhD Eng., Department Electric Power, University of Ruse, E-mail address: *stoyanov@uni-ruse.bg*; Vasil Ivanov, Prof. Dr. Eng. Assen Zlatarov, University Burgas, E-mail address: *vasil_bi@abv.bg;* Teodor Iliev, Department Telecommunication, University of Ruse, E-mail address: *tiliev@uni-ruse.bg*; Grigor Mihaylov, Department Telecommunication, University of Ruse, E-mail address: *gmihaylov@ecs.uni-ruse.bg*; Elena Ivanova, Department Telecommunication, University of Ruse, E-mail address: *tiliev@uni-ruse.bg*

Received 15 December 2016 **Reviewer:** Assoc. prof., PhD Nikolay Matanov

ОЦЕНКА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ, ПОЛУЧАВАНА ОТ ФОТОВОЛТАИЧНА СИСТЕМА С МАЛКА МОЩНОСТ

Ивайло Стоянов, Васил Иванов, Теодор Илиев,
Григор Михайлов, Елена Иванова

Резюме: *В работата е извършен сравнителен анализ и оценка на електрическата енергия, произведена от фотоволтаична система с малка мощност и обменена със захранващата мрежа. С помощта на мрежов анализатор са построени графики и диаграми на тока и напрежението. Получена е информация за енергийния обмен при работата на фотоволтаичната система.*
Ключови думи: *фотоволтаична система, качество на електрическата енергия, форма на вълната, хармонични съставящи*

EVALUATION OF ELECTRICAL ENERGY PRODUCTION FROM A LOW POWER PV SYSTEM

Ivaylo Stoyanov, Vasil Ivanov, Teodor Iliev,
Grigor Mihaylov, Elena Ivanova

Abstract: *In the present study a comparative analysis and evaluation are performed, of the electrical energy, produced by a low-power PV system and exchanged with the electrical grid. Using a power quality analyser the diagrams of the current and voltage were obtained. Information about the energy exchange in the work of the PV system was obtained.*
Keywords: *photovoltaic system, quality of the electrical energy, waveform, total harmonic distortion*

1. INTRODUCTION

Photovoltaic systems (PVS) are one of the most widespread renewable energy sources. According to the installed power they divide into: low power PVS (up to several tens of kWp) and high power PVS (hundreds of kWp and more). According to their purpose, low power PVS can be divided into stand alone and grid connected. The latest work in parallel with the public electricity distribution network (Fig.1).

The goal of this study is to examine and analyze the efficiency of the energy, generated by a low-power PVS and exchanged with the loads of the electrical network. The evaluation of this energy depends on the direction of the energy exchange with the loads of the electrical network as well as on the reactive character of the loads.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

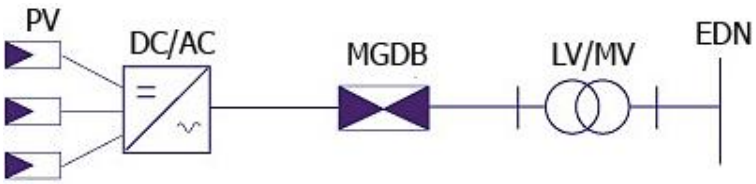


Figure 1. Principal electric diagram of a grid connected PVS: DC/AC inverter; MGDB - main general distribution board; Transformer LV/ML; EDN - Electricity Distribution Network.

The energy balance is obtained by four-quadrant energy meters for indirect remote measurement, whose accuracy is 1.0 for active and 2.0 for reactive energy.

2. MATERIAL AND EXAMINATION METHOD

The principle scheme of the laboratory system is presented in Fig.2. The power of the PV system is 2 kWp. The PVS supplies the inverter (1) with DC voltage, which converts it to AC voltage with 50 Hz frequency. The connection with the electrical network is implemented through the main distribution board (2). The electrical parameters (current, voltage and power) are measured with the power quality analyser type Qualistar C. A 8334B [4]. The output data is stored on a personal computer (4) for further analysis.

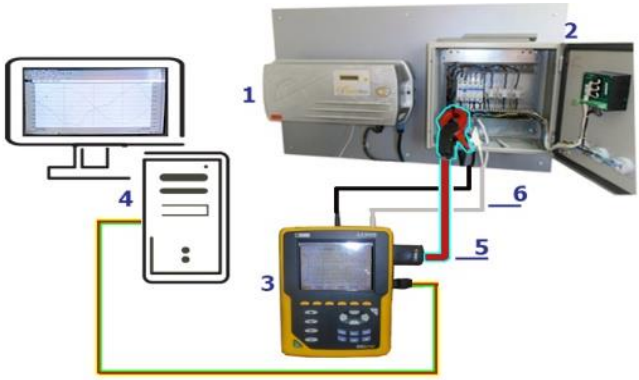


Figure 2. Principal scheme of testbed: 1 - inverter „Solar Max 2000C“; 2 – distribution board, 3 – network analyzer, 4 – PC, 5 – current measuring probes, 6 – voltage measuring probes.

A network analyzer is used to obtain the total harmonic distortion of the current THD_I and of voltage the THD_U and the efficiency for each harmonic component. The efficiency allows to evaluate the losses of conversion from DC to AC power. The network analyzer is connected to a PC (4) through a series connection, on which the dedicated program "Data Viewer" is installed for processing and storage of data. The obtained data includes U, I, P, waveform, THD, power factor and efficiency, phase difference, energy consumption, etc.

3. INVESTIGATION METHOD

The further mathematical processing is based on known dependencies [1, 2, 3]. The type and composition of voltage and current are presented as a Fourier series. The active power of a complex load is:

$$P = U_0.I_0 + \sum_{K=1}^{\infty} U_K.I_K.cos\varphi_K, \quad (1)$$

where U_k and I_k are the RMS values of the k[th] harmonic of voltage and current, and φ_k is the phase difference; $cos\varphi_k$ is the power factor of the k[th] harmonic.
The RMS values I and U are defined as:

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}, U = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2}. \quad (2)$$

The apparent power is obtained according to:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (3)$$

where P is the active power and Q – the reactive power.
The efficiency is defined with:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (4)$$

so the efficiency for the k[th] harmonic can be obtained according to:

$$\eta_K = \frac{P_K}{P_1} = \frac{U_1.I_K.cos\varphi_K}{U_1.I_1.cos\varphi_1}. \quad (5.a)$$

The power factor K_p is:

$$K_p = \frac{P}{S}. \quad (5.b)$$

If we substitute (1), (2) and (3) into (5), the power factor becomes:

$$K_p = \frac{U_0.I_0 + \sum_{K=1}^{\infty} U_K.I_K.cos\varphi_K}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2}.\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}}. \quad (6)$$

It is assumed that the voltage of the supply network has sinusoidal waveform and no DC components, while the current is assumed to be nonsinusoidal. Then *Kp* becomes:

$$K_p = \frac{U_1.I_1.cos\varphi_1}{U_1.\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}} = \frac{I_1.cos\varphi_1}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}} = \frac{I_1}{I}.cos\varphi_1 = \nu.cos\varphi_1. \quad (7)$$

Each type of device causing harmonics draws a particular form of harmonic current (amplitude and phase offset).
The individual harmonic distortion is defined as the percentage of harmonics for order h with respect to the fundamental frequency:

$$U_h(\%) = 100\,{}^{U_h}/_{U_1} \text{ or } I_h(\%) = 100\,{}^{I_h}/_{I_1}. \quad (8)$$

The efficiency is defined as the relation of the output power P_{out} to the input power P_{in}:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (9)$$

and the efficiency factor is defined with:

$$K_E = \frac{P_{out}}{S} = \eta.K_p = \nu.\eta.cos\varphi_1 = \eta.\frac{1}{\sqrt{1+K_H}}.cos\varphi_1. \quad (10)$$

4. EXPERIMENTAL RESULTS

In Fig.3 and Fig.4 are shown the resulting charts, from the software "Viewer Data", presenting the waveform and AFR of the output voltage V_1 and current I_1.

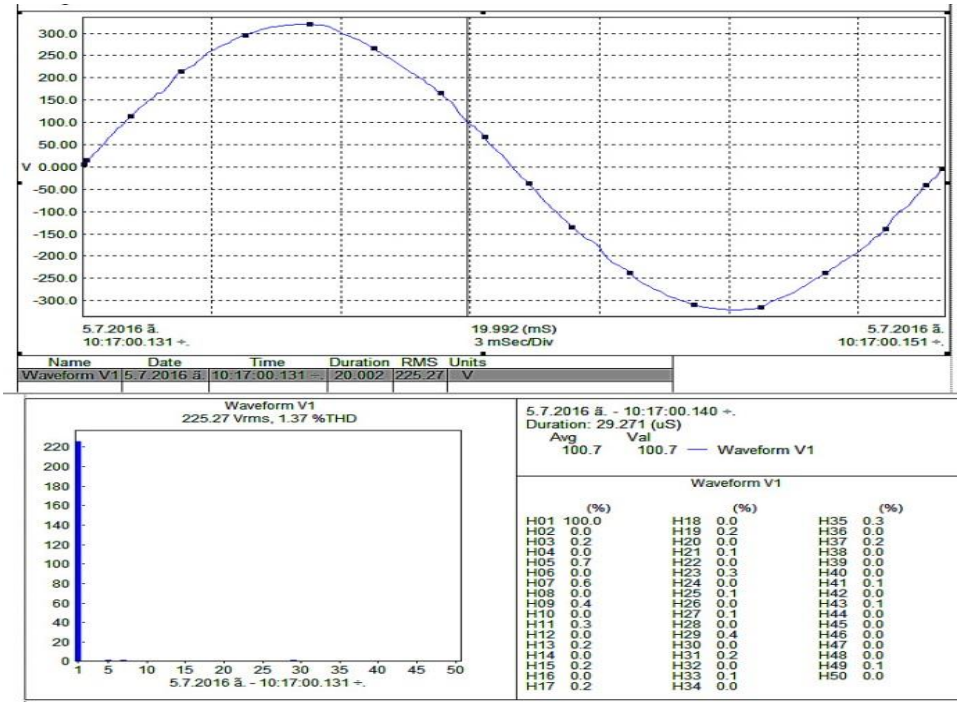


Figure 3. Waveform and spectrum of sizes of the effective values for each harmonic frequency of the output voltage

The higher harmonics in the voltage waveform are less than 1%, which affects the sinusoidal waveform insignificantly. This allows us to assume there is only the fundamental harmonic.

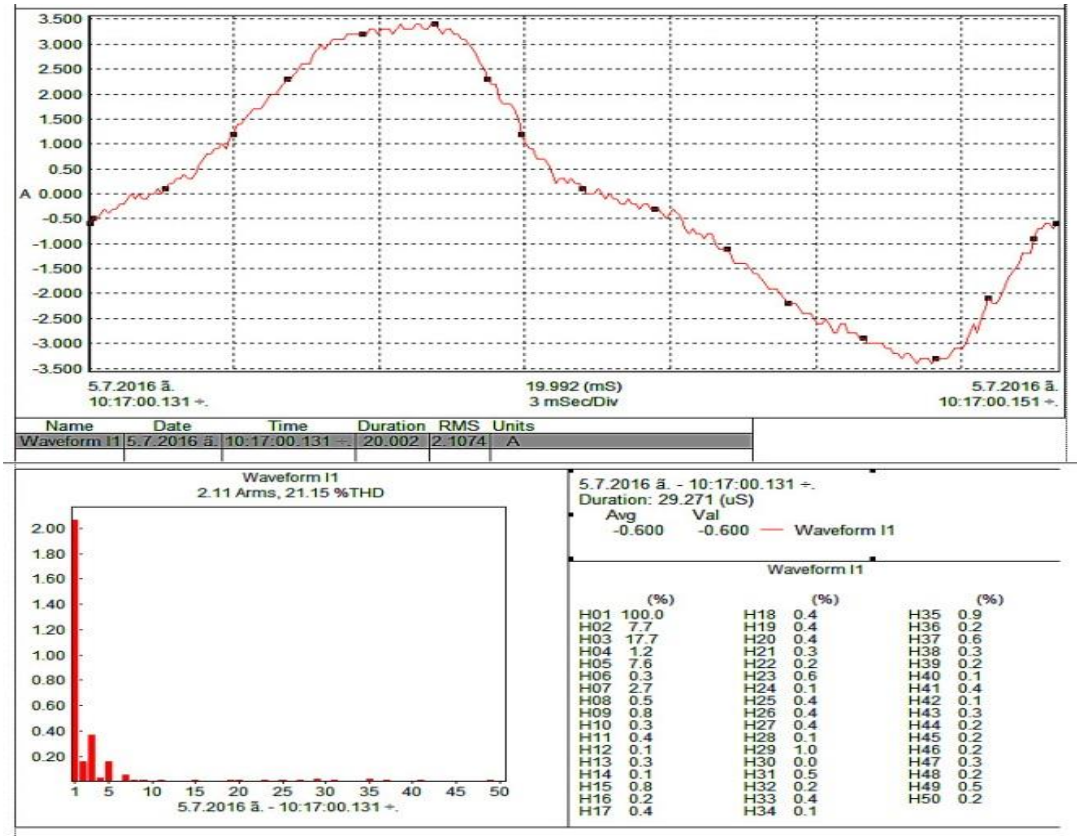


Figure 4. Waveform and spectrum of sizes of the effective values for each harmonic frequency of the output current I_1.

From Fig.4. can be seen that the current waveform (red) has distortions and has higher

harmonic components, especially 3rd and 5th ones.

The experimental data has been used to obtain the efficiency η_{out} separately for the most-influential harmonics of the current (η_3, η_5) by AFR (Fig.4), in relation to the fundamental frequency. After substituting in equation (6) for the 3rd and 5th harmonic we obtain η_3=0.177 and η_5=0,076 while for the fundamental component we have η_{out}=0,747.

The obtained results show that the efficiency is low which means that the energy is used inefficient. This is probably caused by the mode of operation of the inverter, which is not optimal.

In Fig.5 and Fig.6 are shown the time-charts for the power and energy of the investigated PV system.

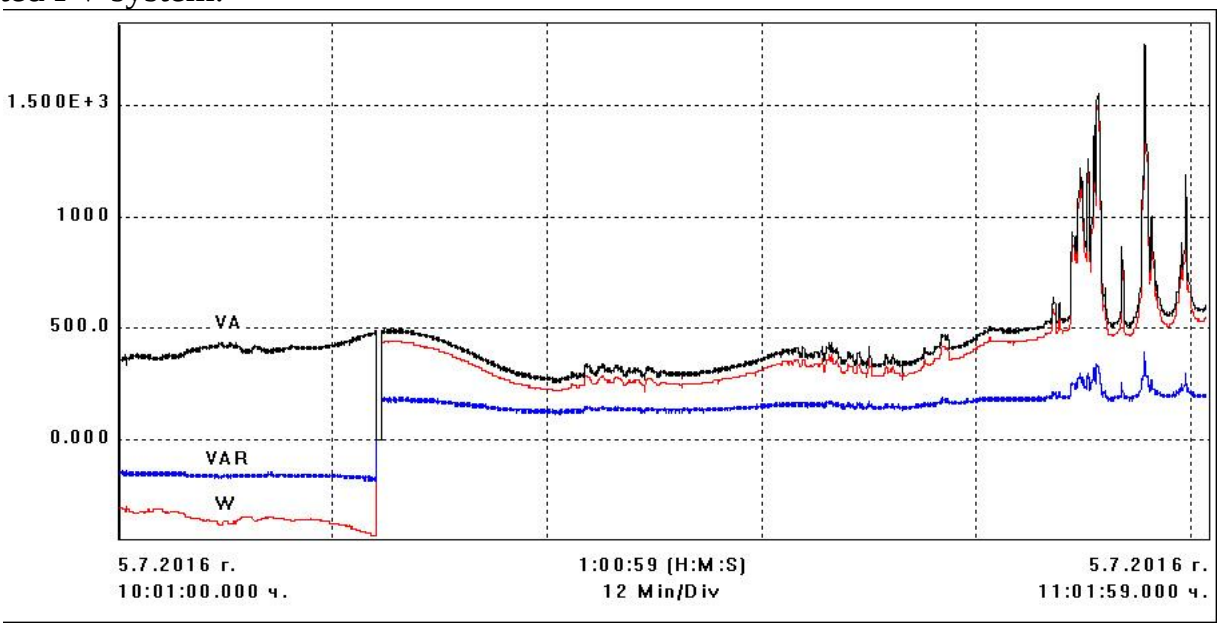


Figure 5. Time-charts for power: W – active, VAR – reactive and VA-apparent.

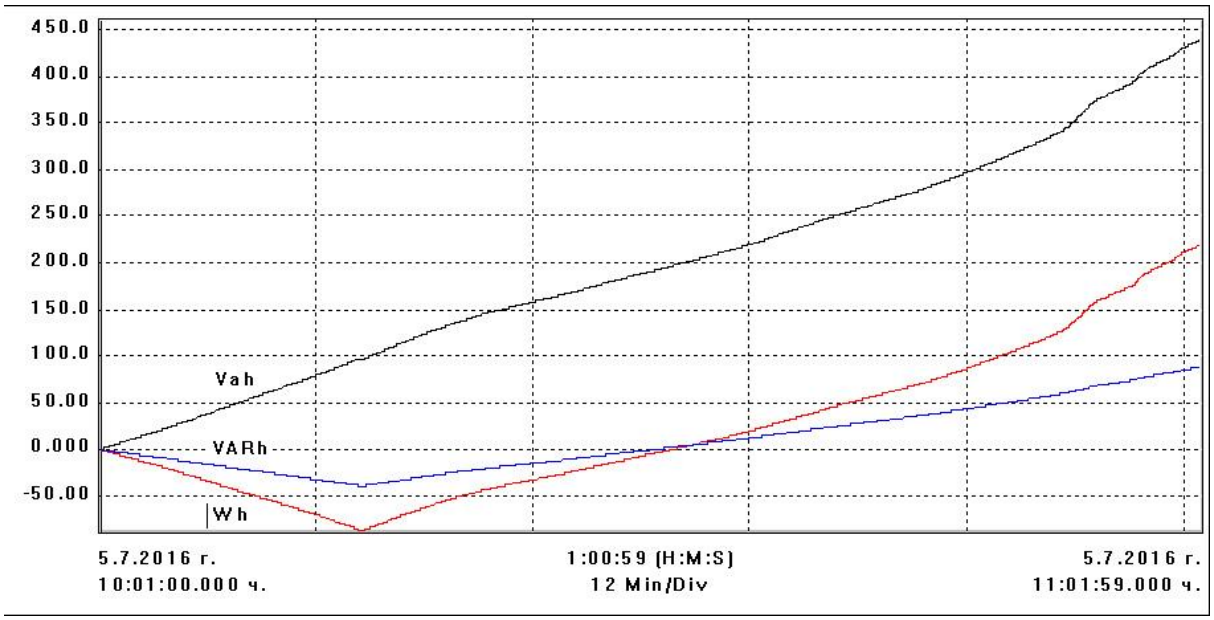


Figure 6. Time-charts for power: Wh – active, VARh – reactive and Vah – apparent.

5. ANALYSIS OF THE RESULTS AND CONCLUSION

The negative values from the diagram on Fig.5 are conditional and indicate the direction of the transition of the active power. Peak values on Fig.5 are due to switching and transient processes in the complex loads. This is an important factor and should be considered when determining the nominal power, in order to protect the inverter from overpowering. The results for the produced energy show the presence of the high peaks of the active and apparent power.

The analysis of the results in Fig.4 for the power and the increased harmonic composition indicates that the nonsinusoidal waveform of the current will reduce the power factor and as a result the efficiency of the system. Therefore the efficiency will be low for this mode of operation. The presence of harmonics will influence the normal operation of sensitive loads, especially when the generated PV energy is low. When not loaded, the PV generator has a low efficiency coefficients *Kp*, *Kn* and *Ke*. Such operating mode occurs when the PV module is shaded.

The higher harmonic components of the voltage is less than 1% and the harmonic composition of the current is as follows: I_1 = 73%, I_3 = 17,7%, I_5 = 7,6%. The efficiency for these components are $\boldsymbol{\eta_1}$=**74**,%, $\boldsymbol{\eta_3}$=**17**,**7**% и $\boldsymbol{\eta_5}$=**7**,**6**% respectively.

REFERENCES

[1] Анчев М., М. Минчев (2006), ***Системи за непрекъсваемо електрическо захранване***, издателство „ Авангард прима“, ISBN:-954-323-098-6, София.

[2] Анчев М. (2010), ***Енергийна ефективност на силовите електронни устройства***, издателство „ Авангард прима“, ISBN:378-954-323-731-9, София.

[3] Анчев, М. (2007),***Силови електронни устройства***, София, 2007.

[4] http://www.chauvin-arnoux.com/en/produit/CA8334B.

Authors: Assoc. Prof, PhD Eng., Department Electric Power, University of Ruse, E-mail address: *stoyanov@uni-ruse.bg*; Vasil Ivanov, Prof. Dr. Eng. Assen Zlatarov, University Burgas, E-mail address: *vasil_bi@abv.bg;* Teodor Iliev, Department Telecommunication, University of Ruse, E-mail address: *tiliev@uni-ruse.bg*; Grigor Mihaylov, Department Telecommunication, University of Ruse, E-mail address: *gmihaylov@ecs.uni-ruse.bg*; Elena Ivanova, Department Telecommunication, University of Ruse, E-mail address: *tiliev@uni-ruse.bg*

Received 15 December 2016 **Reviewer:** Assoc. prof., PhD Nikolay Matanov

ПРОБЛЕМИ НА ИЗМЕРВАНЕТО НА ПРЕДАВАНАТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ МЕЖДУ ЕСО-ЕАД И ЕЛЕКТРОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ ДРУЖЕСТВА, КАКТО И ПРЕЗ РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ МРЕЖИ

Димо Стоилов, Величко Атанасов, Никола Николов, Иван Загорчев

Резюме: *В статията са описани важни проблеми свързани с измерването на предаваната енергия през границите между преносното и разпределителните предприятия, както и през разпределителните електрически мрежи. Предложен е рационален подход за решаването им, който едновременно дава възможност за определяне на предаваната електроенергия при отпадане на произволно измерване, както и за ефективно откриване на кражбите на електроенергия.*
Ключови думи: *измерване на електроенергия, загуби на електроенергия, разпределителни уредби в подстанции, разпределителни електрически мрежи*

PROBLEMS WITH MEASUREMENTS OF THE ELECTRICAL ENERGY TRANSMITTED FROM ESO-EAD TO THE DISTRIBUTION COMPANIES, AS WELL AS IN THE DISTRIBUTION NETWORKS

Dimo Stoilov, Velichko Atanasov, Nikola Nikolov, Ivan Zagorchev

Abstract: *The article describes important problems related to the measurement of energy transmitted through the borders of the transmission company and the distribution companies in Bulgaria, as well as through distribution networks. An efficient approach for their solution is proposed, which simultaneously allows the determination of the transmitted electricity in case of loss of an arbitrary measurement and the easy detection of the electricity thefts.*
Keywords: *measurements of electrical energy, electrical energy losses, electrical installations in substations, electricity distribution networks*

I. СЪСТОЯНИЕ НА ИЗМЕРВАНЕТО НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯТА ПО ГРАНИЦИТЕ НА ПРЕНОСНАТА И РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ МРЕЖИ

По границите с преносната мрежа разпределителните дружества ползват електромерни данни от ЕСО ЕАД и данни от своите контролни измервателни групи, разположени на същите места. По останалите граници разпределителните дружества ползват електромерни данни от собствена електромерна система.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Нека разгледаме типичния случай, когато границата между преносната и разпределителна мрежи е оградата на подстанция 110/СрН. Електропроводите средно напрежение, собственост на разпределителните дружества, започват от съединителните клеми, които са разположени на първия стълб или на проходните изолатори при въздушните или на линейния разединител при кабелните електропроводи.

Най-близко до съединителните клеми и най-естествено място за измерване на енергията е килията на всеки извод средно напрежение. Вместо там, чл.13 т.2 от Правила за измерване на количеството електрическа енергия [1] регламентира, че: *'мястото на измерване е:...*

- на страна средно напрежение на понижаващ трансформатор 110 kV/средно напрежение;

- на трансформатори собствени нужди на уредбата;

- на страна средно напрежение на електропроводни линии, чрез които са присъединени клиенти към преносната мрежа, когато тези линии са собственост на клиента.'

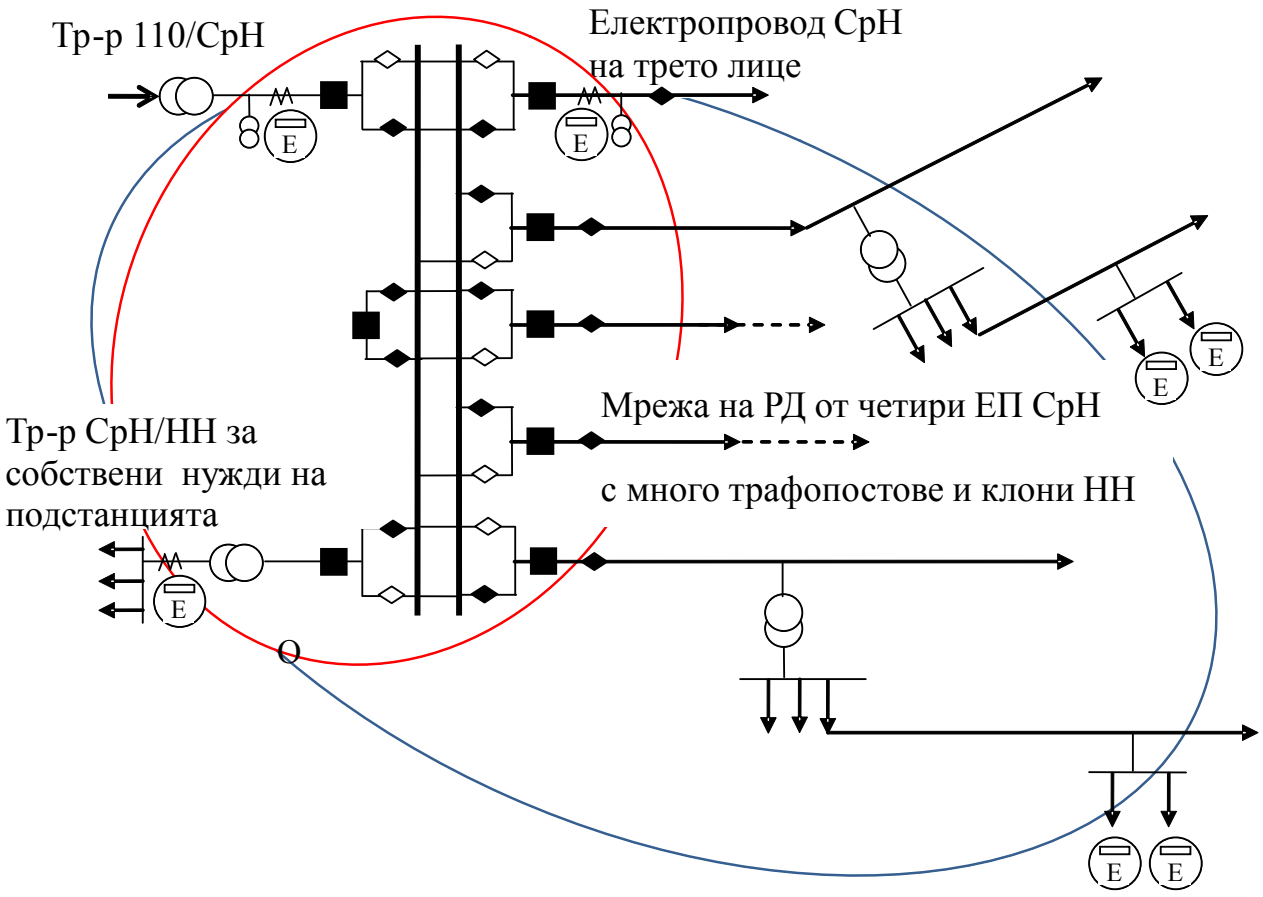
Последното изречение означава, че се измерва енергията по електропроводи на трети лица, а не на разпределителното дружество.

За да анализираме по-подробно проблема, за да подчертаем неговата значимост и необходимостта от мерки за подобряване на подхода за измерване, илюстрираме горните текстове на фиг.1 за една типична подстанция измежду постанциите на ЕСО ЕАД (с един трансформатор 110/СрН и с двойна шинна система средно напрежение). Илюстрираме прост случай, без генератори към мрежата средно напрежение, за да не се загуби съществото на заложения в Правилата за измерване грешен подход, ефектът от който е засилен с факта, че енергията на трансформатора собствени нужди се измерва на страна 0.4 kV, а не на страна СрН.

Както е означено на схемата енергията не се измерва на всеки изходящ от постанцията извод, а се измерва само на три места в подстанцията: 1. на страна средно напрежение на трансформатора 110/СрН, 2. в килията на „извод на трето лице" и 3. на страна 0.4 kV на трансформатора за собствени нужди.

В резултат енергията, която Разпределителното дружество (РД) получава от ЕСО ЕАД единствено чрез трансформатора 110/СрН, не се получава чрез пряко измерване по всеки извод, а се изчислява общо за четирите извода по следния непряк път:

$$E_{РД} = E_{тр\text{-}р\ 110/ср} - E_{извод\ трето\ лице} - E_{тр\text{-}р\ собствени\ нужди} \quad (1)$$



Фиг.1. Илюстрация на подстанция 110/СрН захранваща четири електропровода СрН на РД с много ТП Ср/НН и много клони и табла НН, както и един извод СрН на трето лице

Регламентираният в Правилата за измерване [1] подход, който илюстрирахме, има следните пороци:

- Всички загуби в уредби средно напрежение в подстанциите на ЕСО ЕАД не са за сметка на собственика на подстанцията, а са за сметка на разпределителното дружество.
- Загубите в трансформатора за собствени нужди не са за сметка на собственика му, а са изцяло за сметка на разпределителното дружество.
- Грешката на изчислената енергия може да достигне сумата от грешките на трите измерени величини или с други думи да бъде три пъти по-голяма от грешката при пряко измерване по всеки извод.
- Няма излишък на измервания, които да резервират отказа на който и да е измервателен комплект.
- Вероятността за невярно изчисление на енергията при отказ на измервателен комплект се увеличава тройно.
- Невъзможност за определяне чрез измерване на загубите на енергия в разпределителната уредба на подстанцията и във всеки извод средно напрежение.

Първите два порока са илюстрирани с червената елипса. Последният е коментиран в следващото ни изложение.

Освен това Правилата не равнопоставят ползвателите на подстанцията. Третото лице има пряко измерване на електроенергията и не е натоварено с никакви загуби в подстанцията, докато разпределителното дружество има непряко измерване и е натоварено със всичките загуби на подстанцията.

Изредените недъзи на този подход са присъщи при всички възможни схеми на разпределителните уредби на подстанциите. Те се проявяват още по-негативно при увеличаване броя на трансформаторите или на изводите на трети лица и при наличие на производители в разпределителната мрежа когато са възможни обратими посоки на електроенергията.

Извод: Ако Комисията за енергийно и водно регулиране не измени подхода за измерване на електроенергията по границата между електропредавателната и електроразпределителните мрежи ще продължи прехвърлянето на загуби от ЕСО към разпределителните дружества, облагодетелстването на трети лица и проблемите с обективната оценка на техническите, а оттам и на нетехническите загуби на електроенергия.

II. ПРОБЛЕМЪТ "ИЗЛИШНИ ЕЛЕКТРОМЕРИ"

Във всяко човешко или животинско тяло, във всяка органична или изкуствена система има резервиращи органи или части, които заместват повредените и обезпечават надеждното функциониране. В една електроенергийна система има няколко вида резерви на производствени агрегати, както и резервни електропроводи и трансформатори, които осигуряват производствената, преносната и разпределителната способности на системата [2]. В информационните системи резервите са придобили название "излишна информация". В измервателните системи - "излишни измервания" и пр.

За съжаление проблемът за обезпечаване на резервни или "излишни електромери" у нас системно е пренебрегван и не е регламентиран, а това е предпоставка за неточно определяне и/или неточно разпределение на различните видове плащания за електроенергията. За да бъде оценена неговата значимост привеждаме няколко довода в това кратко изложение.

Както стана ясно от червената илюстрацията на фиг.1 при отпадане на който и да е от трите електромерни комплекта няма да може да се определи вкараната в разпределителната мрежа електроенергия, а ако е отпаднало измерването на енергията на третото лице, няма да е определена нито неговата енергия, нито енергията за разпределителното дружество. В такива случаи Правилата за измерване на количествата електрическа енергия не предвиждат резервно "излишно" измерване, а предвиждат използване на контролни електромери или

технически измервания или измервания от насрещни точки или неправилно назования "баланс на подстанцията". Нито една от тези мерки не е задължителна и в крайна сметка те обикновено не се прилагат. В частност под "баланс на подстанцията" всъщност се има предвид I-ви закон на Кирхоф (равенство на вкараната в и изкараната от една шина/възел мощност/енергия) [2]. За да се приложи той са необходими измервания на всички въводи и изводи, та ако едно измерване отпадне, то да бъде заместено от разликата на всички оставащи. Но както стана ясно Правилата не задължават никого да осигури измерване на всички въводи и изводи. Следователно имаме параграф 22.

На същата фиг.1 със синята елипса сме илюстрирали факта, че електроенергията проведена по всички изводи средно напрежение и всички техни разклонения или участъци, както и по всички трансформатори в трафопостовете СрН/НН, както и по всички електропроводи (клони) ниско напрежение на разпределителното дружество не се измерва. Електроенергията се измерва едва при електромера след отклонението за крайния потребител. По пътя от подстанцията до крайния потребител електроенергията преминава по различни проводници с различни геометрични форми и сечения, през шинопроводи, проходи, въздушни и кабелни електропроводи, трансформатори и съединителни елементи с обща дължина, която достига десетки километри и преминава през различни природни условия, без да съществува елементарна информация за околичествяване както на изначалната, така и на загубената по пътя енергия. А отпадането на което и да е измерване при крайните потребители не може да се замени с нито едно от споменатите "пожелания" на сегашните Правила [1].

Извод: Ако Правилата за измерване на електроенергията не задължат дружествата да инсталират „излишни“ електромери на изводите от подстанциите, на входовете и изходите на трафопостовете (по клоните на мрежата НН) и общ електромер в таблата, захранващи няколко потребителя, няма да има възможност да се оценяват загубите на енергия чрез средства за търговско измерване на енергия и няма да бъдат анализирани, изяснявани и доказвани с удостоверени средства причинителите на тези загуби.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлаганото инсталиране на електромери на всички изводи от подстанциите, на входовете и изходите на трафопостовете (в началото на клоновете на мрежата НН) и на общ електромер в таблата, захранващи няколко потребителя ще даде възможност да се определи предадената през всеки елемент на разпределителната мрежа енергия, дори при отпадане на произволно единично измерване, както и да се удостоверяват загубите по отделни елементи чрез средства за търговско измерване на електроенергия. Впоследствие тези загуби могат да бъдат анализирани и да бъдат установени лесно причинителите на тези загуби, т.е. да бъдат открити евентуални кражби на електроенергия.

ЛИТЕРАРУРА

[1] Правила за измерване на количеството електрическа енергия, Държавна комисия за енергийно и водно регулиране, ДВ. бр.98 от 12 Ноември 2013г.
[2] Стоилов Д., Янев К., Режими на електроенергийни системи, София, Издателство на ТУ-София, 2011, 315 стр., ISBN 978-954-438-941-3

Автори: Димо Стоилов, доц. д-р, кат. „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*; Величко Атанасов, д-р инж., ЧЕЗ Рапределение България АД, E-mail address: *velichko.atanasov@cez.bg*; Никола Николов, ас. инж., кат. „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *n_nikolov@tu-sofia.bg*; Иван Загорчев, докторант, кат. „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *i.zagorchev@ker.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Димитър Богданов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАГНИТНА МАСА

Ангел Петлешков, Светлана Цветкова, Станислав Пешев

Резюме: *В доклада са дадени резултати от изследване на магнитна маса, а именно изменението на притеглящата сила в зависимост от височината на детайлите и коефициента на запълване на работната повърхност на масата. Направен е анализ и сравнение на получените резултати.*
Ключови думи: *магнитна маса, притегляща сила, коефициент на запълване*

STUDY OF MAGNETIC TABLE

Angel Petleshkov, Svetlana Tzvetkova, Stanislav Peshev

Abstract: *The results from study of magnetic table are given in the paper. The change of the attraction force depends on height of the details and working surface fill up factor of the table are considered. The obtained results are analyzed and compared.*
Keywords: *magnetic table, attraction force, fill up factor*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Магнитните приспособления с постоянни магнити намират широко приложение последните години, в това число и за окомплектоване на различни видове металорежещи машини. Внедряването на магнитните маси позволява да се решат редица сложни технологични задачи свързани с обработката на детайлите – обработка на детайли със сложна форма, получаване на висока точност при обработката и др. Стремежът към опростяване на начина им на управление и намаляване на физическото усилие на оператора е причина за разработване на магнитни маси с електроимпулсно управление и на магнитни маси с допълнителни управляващи магнити. В зависимост от приложението магнитните маси могат да бъдат правоъгълни или кръгли.

Изследваната магнитна маса (фиг.1) е правоъгълна с размери 630/230mm.

Фиг.1. Общ вид на магнитна маса

На фиг.2 е показана магнитната система на изследваната магнитна маса. Конструктивно масата е изпъл-нена с управляеми лети постоянни магнити 1 и 2, намагнитваща намотка 3, размагнитваща намотка 4, полюси 5 и 6 и детайл 7. Управлението на масата се реализира с електроимпулсно управляващо устройство, което се характеризира със следните съществени предимства:

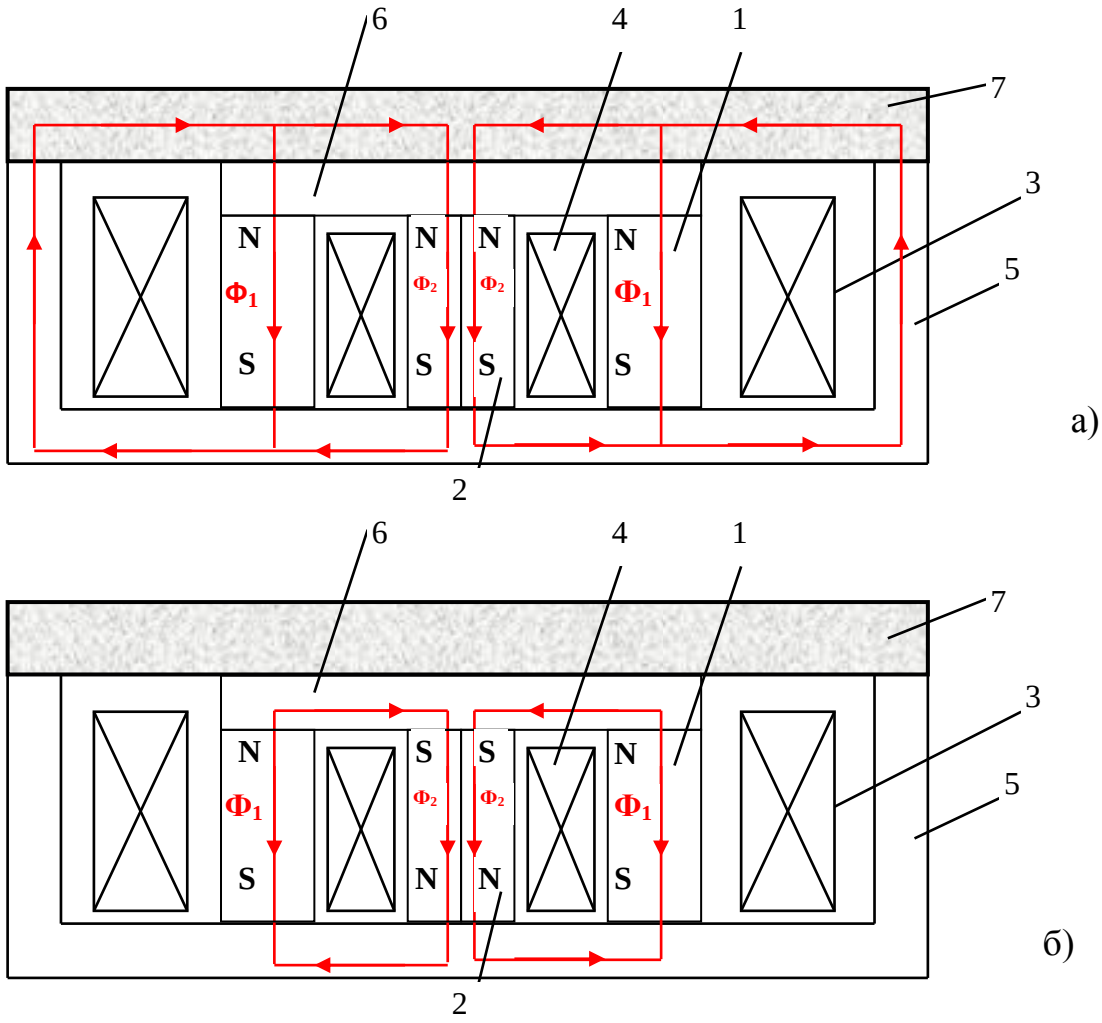
- електрическа енергия се консумира само при намагнитване и размаг-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

нитване;

- кратковременното протичане на електрически импулс позволява да се намалят габаритите на намотката, а от там и намаляване на габаритите и теглото на цялото устройство;
- реализира се икономия на електрическа енергия.



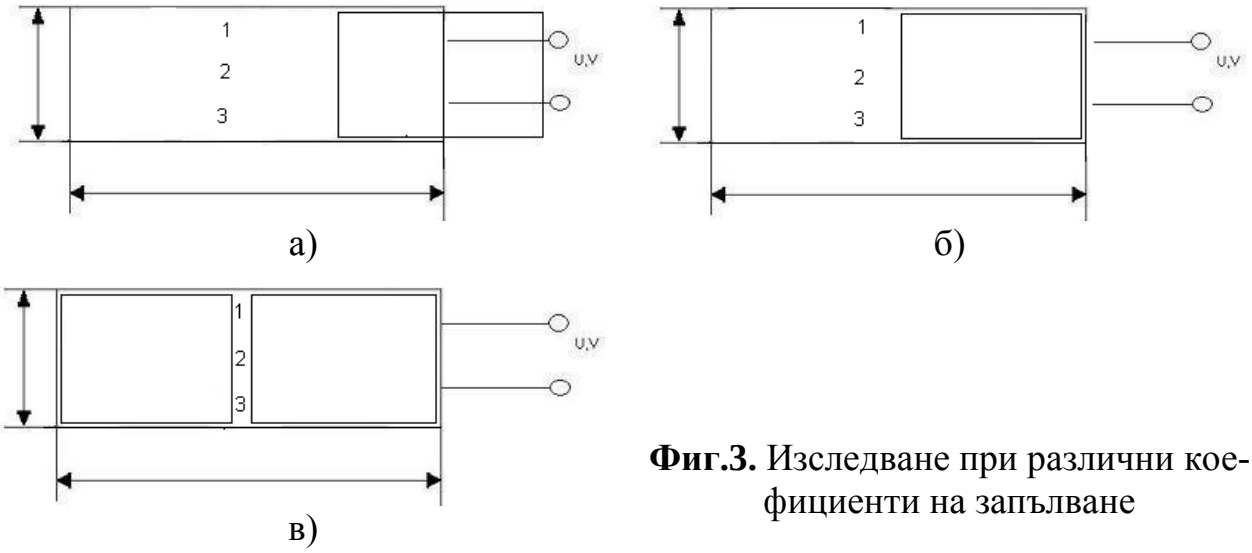
Фиг.2. Магнитна система на магнитна маса
а) захващане на детайл; б) освобождаване на детайл

За захващане на детайл към намагнитващата намотка 3 се подава еднократен токов импулс с определена полярност, амплитуда и продължителност. Възбуденото магнитно поле намагнитва управляемите постоянни магнити 1 и 2 съпосочно (фиг.2.а). Магнитният поток на резултатното магнитно поле се явява резултат от наслагването на два съпосочни магнитни потока Φ_1 и Φ_2. Потокът се затваря през детайла 7 и той се привлича към полюсите 5 и 6. След прекъсване на намагнитващия импулс, детайла се задържа от запасената в постоянните магнити магнитна енергия и детайла остава захванат. За освобождаване на захванатия детайл към размагнитващата намотка 4 се подава еднократен токов импулс с обратна полярност. При това намотката 4 създава магнитно поле, което пренамагнитва управляемия постоянен магнит 2 противопосочно на магнита 1 (фиг.2.б). При това положение магнитният поток се затваря вътре в магнитната

система и детайла 7 се освобождава.
В системата за управление е предвидена защита при отпадане на напрежението, чрез разреждане на кондензатор през намагнитващата намотка, при което детайла се захваща. Така описаното приспособление показва добра функционалност и надеждност.
В статията са дадени резултати от изследване на магнитна маса, а именно изменението на притеглящата сила в зависимост от височината на детайлите и коефициента на запълване на работната повърхност на масата. Направен е анализ и сравнение на получените резултати.

2. ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Изследването на изменението на притеглящата сила в зависимост от височината на детайлите и коефициента на запълване на работната повърхност се извършва в три точки (1, 2, 3), разположени както е показано на фиг. 3, за три различни коефициента на запълване k_3 на работната повърхност - при $k_3 = 25\%$ (фиг.3.а), $k_3 = 50\%$ (фиг.3.б) и $k_3 = 100\%$ (фиг.3.в).



Фиг.3. Изследване при различни коефициенти на запълване

Изследваните еталони са 4 на брой, като два от тях са с диаметър d=36mm, и с височина h=4mm и h=8mm, а останалите два еталона са с диаметър d=48mm и височина съответно h=8mm и h=15mm.
Еталонните образци се поставят върху работната повърхност, подава се импулс за захващане и след това се пристъпва към измерване на притеглящата сила. Усилието се прилага плавно и строго перпендикулярно на работната повърхност, като с динамометър се отчита големината му, до откъсване на образеца. Динамометърът трябва да бъде със стрелка фиксираща максималната достигната стойност. Образците се изработват от стомана 7 и контактните им площи са обработени с клас на грапавост 0,63.
За всеки еталон се извършват по три измервания и се определя средноаритметичната стойност на притеглящата сила. Определя се относителната сила по формулата:

$$F_{отн} = \frac{F_{мом}}{S} \qquad (1)$$

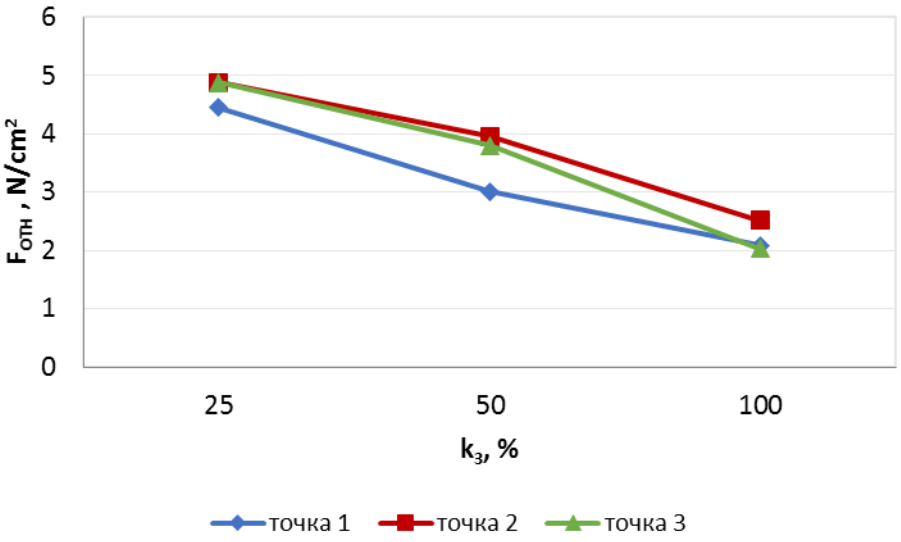
където: $F_{мом}$ е средната стойност на силата на притегляне;

S - площта на детайла.

В табл.1 са дадени резултатите от измерванията в отделните точки за първи и втори еталон с d=36mm и височини съответно h=8mm и h=4mm.

Таблица 1

$k_з$	точка на измерване	d=36mm, h=4mm, t=1s, S=10,17mm^2			d=36mm, h=8mm, t=1s, S=10,17mm^2		
		1	2	3	1	2	3
100%	F_1, N/cm^2	30	35	20	26	27	25
	F_2, N/cm^2	29	33	27	20	25	22
	F_3, N/cm^2	32	35	25	18	25	15
	$F_{мом}$, N/cm^2	30,33	34,33	24	21,33	25,67	20,67
	$F_{отн}$, N/cm^2	2,98	3,37	2,36	2,09	2,52	2,03
50%	F_1, N/cm^2	35	38	27	27	40	39
	F_2, N/cm^2	32	46	31	32	41	38
	F_3, N/cm^2	39	44	34	33	40	39
	$F_{мом}$, N/cm^2	35,33	42,67	30,67	30,67	40,33	38,67
	$F_{отн}$, N/cm^2	3,47	4,19	3,02	3,01	3,96	3,8
25%	F_1, N/cm^2	47	50	41	45	47	50
	F_2, N/cm^2	42	55	45	41	50	48
	F_3, N/cm^2	40	57	39	50	52	51
	$F_{мом}$, N/cm^2	43	54	41,67	45,33	49,67	49,67
	$F_{отн}$, N/cm^2	4,23	5,21	4,09	4,45	4,88	4,88



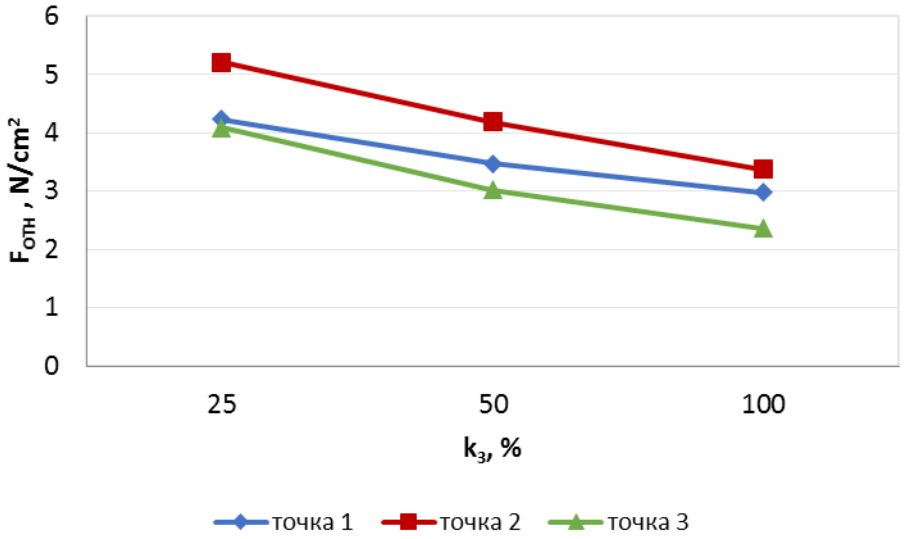
Фиг.4. Изменение на относителната сила в изследваните точки, при различни коефициенти на запълване за първи еталон с d=36mm и h=8mm

На фиг.4 е представено графично изменението на относителната сила в изследваните точки, при различните коефициенти на запълване за първи еталон с

d=36mm и h=8mm.

Измерената задържаща сила е най-голяма в точка 2 (в средата на магнитната маса), като с намаляване на коефициента на запълване, тя се увеличава. При $k_з = 25\%$ задържащата сила е с 18,9% по-голяма, в сравнение с силата при $k_з = 50\%$ и с 48,4% по-голяма от тази при $k_з = 100\%$. Задържащата сила по периферията на масата (точки 1 и 3) е по-малка в сравнение с точка 2, като еталона се отделя по-лесно. И тук с намаляване на коефициента на запълване силата в точки 1 и точка 3 нараства. Средно силата в точки 1 и 3 е по-малка с 18,3% при $k_з = 100\%$, с 14% при $k_з = 50\%$ и с 4,4% при $k_з = 25\%$, спрямо силата в точка 2.

На фиг.5 са дадени резултатите за изменението на относителната сила в изследваните точки, при различните коефициенти на запълване за втори еталон с d=36mm и h=4mm.



Фиг.5. Изменение на относителната сила в изследваните точки, при различни коефициенти на запълване за втори еталон с d=36mm и h=4mm

И тук задържащата сила е най-голяма в точка 2, като с намаляване на коефициента на запълване, тя се увеличава. При $k_з = 25\%$ задържащата сила е с 19,6% по-голяма, в сравнение с силата при $k_з = 50\%$ и с 35,3% по-голяма от тази при $k_з = 100\%$. Задържащата сила в точки 1 и 3 е по-малка от силата в точка 2 и тук. С намаляване на коефициента на запълване силата в точки 1 и точка 3 нараства. Средно силата в точки 1 и 3 е по-малка с 20,8% при $k_з = 100\%$, с 22,6% при $k_з = 50\%$ и с 20,2% при $k_з = 25\%$, спрямо силата в точка 2.

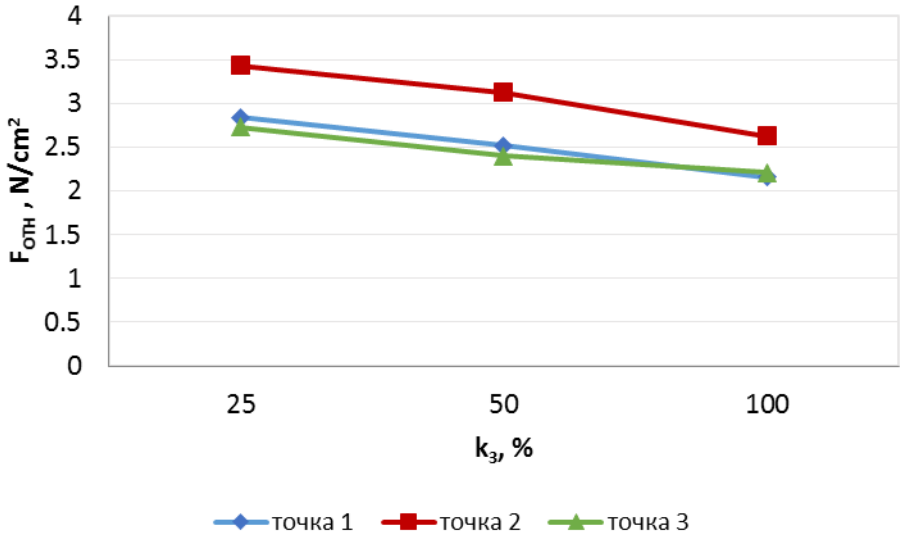
Следователно задържащата сила в точка 2, при еталона с по-малката височина h=4mm е по-голяма с 6,3% за $k_з = 25\%$, с 5,5% за $k_з = 50\%$ и с 25,2% за $k_з = 100\%$, от задържащата сила за еталона с височина h=8mm.

В табл.2 са дадени резултатите от измерванията в отделните точки за трети и четвърти еталон с d=48mm и височини съответно h=8mm и h=15mm.

Таблица 2

$k_з$	Измервателна точка	d=48mm, h=8mm, t=1s, S=18,08mm^2			d=48mm, h=15mm, t=1s, S=18,08mm^2		
		1	2	3	1	2	3
100%	F_1, N/cm^2	39	45	40	35	37	40
	F_2, N/cm^2	40	48	37	40	49	37
	F_3, N/cm^2	38	50	43	40	40	39
	$F_{мом}$, N/cm^2	39	47,67	40	38,33	42	38,67
	$F_{отн}$, N/cm^2	2,16	2,63	2,21	2,12	2,32	2,13
50%	F_1, N/cm^2	43	59	48	43	53	35
	F_2, N/cm^2	49	55	40	40	49	39
	F_3, N/cm^2	45	56	42	35	49	45
	$F_{мом}$, N/cm^2	45,67	56,67	43,33	39,33	50,33	39,67
	$F_{отн}$, N/cm^2	2,52	3,13	2,4	2,17	2,78	2,19
25%	F_1, N/cm^2	55	65	50	51	61	49
	F_2, N/cm^2	50	62	53	50	55	50
	F_3, N/cm^2	49	60	45	49	45	45
	$F_{мом}$, N/cm^2	51,33	62,33	49,33	50	53,67	48
	$F_{отн}$, N/cm^2	2,84	3,44	2,73	2,76	2,96	2,65

На фиг.6 е показано изменението на относителната сила в изследваните точки, при различните коефициенти на запълване за трети еталон с d=48mm и h=8mm.

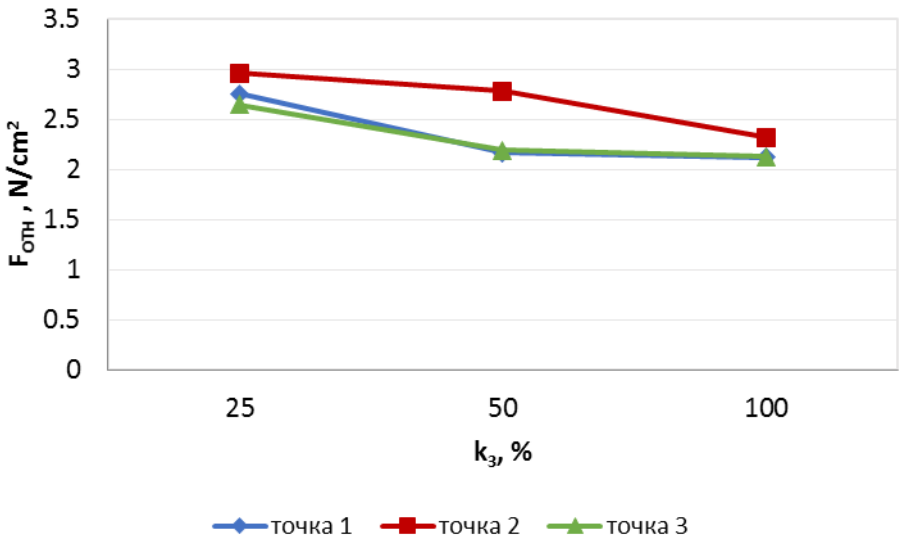


Фиг.6. Изменение на относителната сила в изследваните точки, при различни коефициенти на запълване за трети еталон с d=48mm и h=8mm

Задържащата сила е най-голяма в точка 2 (в средата на масата), като с намаляване на коефициента на запълване, тя се увеличава. При $k_3 = 25\%$ задържащата сила е с 9% по-голяма, в сравнение с силата при $k_3 = 50\%$ и с 25,5% по-голяма от тази при $k_3 = 100\%$. Задържащата сила по периферията на масата (точки 1 и 3) е по-малка в сравнение с точка 2 и еталона се отделя по-лесно. С намаляване

на коефициента на запълване силата в точка 1 и точка 3 нараства. Средно силата в точки 1 и 3 е по-малка с 16,9% при $k_3 = 100\%$, с 21,4% при $k_3 = 50\%$ и с 23,5% при $k_3 = 25\%$, спрямо силата в точка 2.

На фиг.7 са дадени резултатите за изменението на относителната сила в изследваните точки, при различните коефициенти на запълване за четвърти еталон с d=48mm и h=15mm.



Фиг.7. Изменение на относителната сила в изследваните точки, при различни коефициенти на запълване за четвърти еталон с d=48mm и h=15mm

И тук задържащата сила е най-голяма в точка 2, като с намаляване на коефициента на запълване, тя се увеличава. При $k_3 = 25\%$ задържащата сила е с 6,1% по-голяма, в сравнение с силата при $k_3 = 50\%$ и с 21,6% по-голяма от тази при $k_3 = 100\%$. Задържащата сила в точки 1 и 3 е по-малка от силата в точка 2 и тук. С намаляване на коефициента на запълване силата в точки 1 и точка 3 нараства. Средно силата в точки 1 и 3 е по-малка с 8,4% при $k_3 = 100\%$, с 21,6% при $k_3 = 50\%$ и с 8,6% при $k_3 = 25\%$, спрямо силата в точка 2.

Следователно задържащата сила в точка 2, при еталона с по-малката височина h=8mm е по-голяма с 13,9% за $k_3 = 25\%$, с 11,2% за $k_3 = 50\%$ и с 11,8% за $k_3 = 100\%$, от задържащата сила за еталона с височина h=15mm.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените измервания и анализ може да се обобщи:

- задържащата сила е най-голяма в точка 2;
- силата по периферията на масата в точки 1 и 3 е по-малка и еталоните се отделят по-лесно;
- с увеличаване на коефициента на запълване задържащата сила в изследваните точки намалява;
- с увеличаване на диаметъра на еталона, моментната сила в изследва-

ните точки нараства, а относителната сила намалява.
Върху точността на получените резултати известна грешка се внася от: неточното поставяне на всеки еталон на едно и също място на масата; дърпането на еталона от магнитната маса не винаги е перпендикулярно; времето за намагнитване и размагнитване не винаги е едно и също; състоянието на работната повърхност на масата – наличие на грапавини, зацапване или корозия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Петлешков А., ***Изследване на равномерността на задържащата сила на магнитни технологични приспособления,*** сп. Енергиен форум, бр. 15/16, юни 2015, стр. 80-83

[2] Цанев Ц., ***Магнитно-технологични приспособления***, НТСЕБ, София, 2012.

[3] Цанев Ц., С. Цветкова, ***Електрическа част на роботизирани системи***, АВС Техника, София, 2005.

[4] Константинов О., ***Магнитная технологическая оснаска,*** Машиностроение, Ленинград, 1974.

Автори: Ангел Петлешков, ас., кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *apetl@tu-sofia.bg*; Светлана Цветкова, доц. д-р кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *stzvet@tu-sofia.bg*; Станислав Пешев, инж.

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Васил Господинов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕТО НА КОМПРЕСОР

**Николай Стоманярски, Светлана Цветкова,
Ангел Петлешков, Ваня Петрова**

Резюме: *В доклада са дадени резултати от изследване на електрообзавеждането на компресор, който поддържа необходимото налягане в системата за сгъстен въздух, захранваща част от съоръженията в предприятие за производство на метални контейнери. Обърнато е внимание на показателите за качество на електрическата енергия. Направен е анализ и сравнение на получените резултати за показателите за качество на електрическата енергия със съответните нормативни документи.*
Ключови думи: *компресор, електрообзавеждане, качество на електрическата енергия, енергийна ефективност.*

STUDY OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT OF COMPRESSOR

Nikolai Stomaniarski, Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov, Vania Petrova

Abstract: *The results from study of the electrical equipment of compressor are given in the paper. The compressor ensures necessary pressure in the system for compressed air, which supply part of the equipment in company for metal containers production. The electrical energy quality indexes are considered too. The obtained results for electrical energy quality indexes are analyzed and compared with normative documents.*
Keywords: *compressor, electrical equipment, electrical energy quality, energy efficiency.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Все повече се обръща внимание на повишаване на ефективността на електрообзавеждането и намаляване на консумацията на електрическа енергия. За тази цел се използват честотни управления на електрозадвижванията. Намаляването на консумацията на електрическа енергия води до намаляване на технологичните разходи. На равно с това се обръща внимание на качеството на електрическата енергия, с която се захранва даден консуматор, и на влиянието му върху захранващата електрическа енергия за останалите консуматори.

В статията са дадени резултати от изследване на работата на електрообзавеждането на компресор, който поддържа необходимото налягане на системата за сгъстен въздух, захранваща преси и пароструйки, част от производствения процес на предприятие за производство на метални контейнери. Обърнато е внимание на влиянието му върху показателите за качество на електрическата енергия.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Направен е анализ и сравнение на получените резултати за показателите за качество на електрическата енергия със съответните нормативни документи [1, 2, 3, 4].

2. ХАРАКТЕРИСТИКА НА ОБЕКТА НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследваният обект е винтов компресор, захранващ система за сгъстен въздух за нуждите на производството. Винтовите компресори са сред най-широко използваните в практиката компресори. Това, от една страна, се дължи на широкия диапазон от мощности, които те покриват, а от друга - на факта, че се явяват много подходящо решение за приложения, изискващи ниски налягания и голям дебит при висока ефективност на процеса. Основните предимства на винтовите компресори са: надеждност, дълъг експлоатационен срок, компактност, лесна експлоатация, удобство за транспортиране и монтаж, висок кпд, както и възможност да се използват и със замърсени газове с променлива плътност. Основна тенденция при тях е непрекъснатото им усъвършенстване и повишаване на максималното им налягане.

Обикновено винтовите компресори се произвеждат във вид на компактни агрегати със затворена циркулация на лубриканта. Основните техни елементи са: винт, смукателен клапан, въздушен филтър, сепаратор, охлаждащ радиатор, маслен радиатор, термостат и електрически двигател.

Системата за сгъстен въздух на предприятието е магистрална, представляваща един главен тръбопровод и дълги отклонения. Налягането в системата е до 7 bar, което е най-често срещания случай. Повечето машини работят ефективно с налягане 5-6 bar, но поради компенсиране на аеродинамичните и обемни загуби (утечки) се използва повишено налягане.

Използваният компресор за поддържане на необходимото налягане в системата за сгъстен въздух е тип GA75. За задвижване на компресора се използва трифазен асинхронен двигател с накъсосъединен ротор с номинална мощност 75 kW. Двигателят е с IP 55 и клас на изолация F. Лагерите му не се нуждаят от ревизия и е проектиран за продължителна работа в агресивна среда.

В табл.1 са дадени номиналните данни на компресора и задвижващия двигател.

Таблица 1

Компресор тип GA75	p_{max} = 1MPa	Q = 11,05m^3/min	m = 1500kg
Двигател	P_H=75kW, U_H=400V	n_H=2978min^{-1}	IP55, S1, 2008

Компресорът е настроен да се пуска автоматично сутрин в 8 часа с началото на смяната и спира в 16 часа, както и да се пуска автоматично при спад в налягането под 5 bar и спира при достигане на налягане от 7 bar. През останалата част от деня компресора е в режим на изчакване. Управлението на двигателя, задвижващ компресора и регулирането на производителността му се осъществява с честотно управление. То е проектирано да осигури енергийна ефективност до 35% по-висока, в сравнение с модела без честотно управление. Благодарение на тази система компресорът може да се пуска и спира под товар, без да е необходимо да се намалява налягането и не се наблюдават утечки на сгъстен въздух.

3. ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Измерването е проведено с трифазен анализатор на качеството на електрическата енергия QUALISTAR C.A 8332, на страна ниско напрежение в трафопоста захранващ предприятието. Консуматорът е компресор, захранващ системата за сгъстен въздух, който се задвижва от трифазен асинхронен двигател с мощност $P_н$=75 kW.

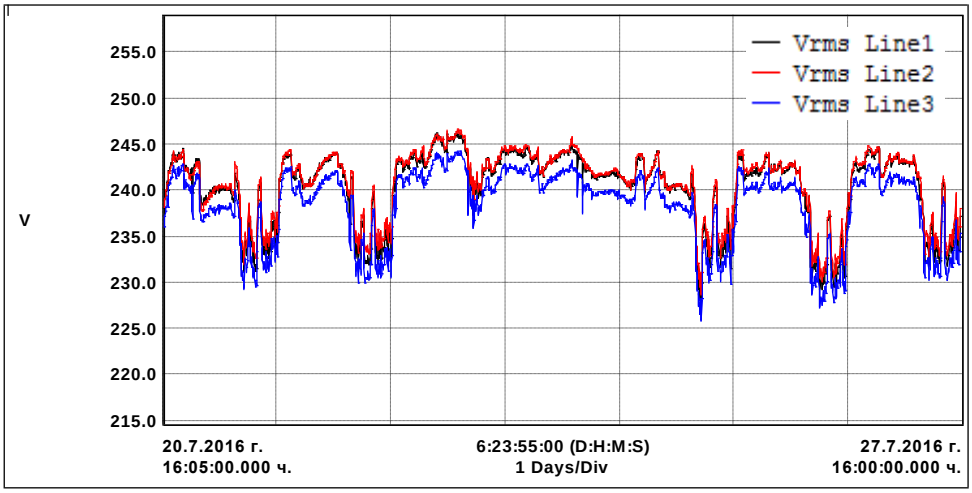
Мрежата е трифазна петпроводна с изолирана неутрала. Уредът е свързан към извод №4 на кабела, захранващ двигателя. Точката, в която е свързан прибора е на клемите влизащи във високомощностните предпазители - оттук е взет сигнал за напреженовите вериги [4, 5]. След предпазителите са поставени токови клещи за ток до 1000А.

Останалите настройки са:

- измерване на всички възможни величини, които може да следи уреда;
- интервал от време за осредняване на измерваните величини - 5 минути, като за всеки период се определят минималната, средната и максималната стойност;
- период на измерване - 7 дни, начало на записа 20 юли, 16:05 часа и край на записа 27 юли, 16:00 часа.

Получени са 2016 стойности за всеки от изследваните параметри. Получената информация е обработена със софтуер Data Viewer Professional и Qualistar Viewer V2, приложен към уреда [6].

Честотата на захранващото напрежение за периода на измерване е почти постоянна - средна стойност 49,99 Hz, максимална стойност 50,07 Hz и минимална стойност 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) за период от една седмица, дадена в [1, 3, 4].



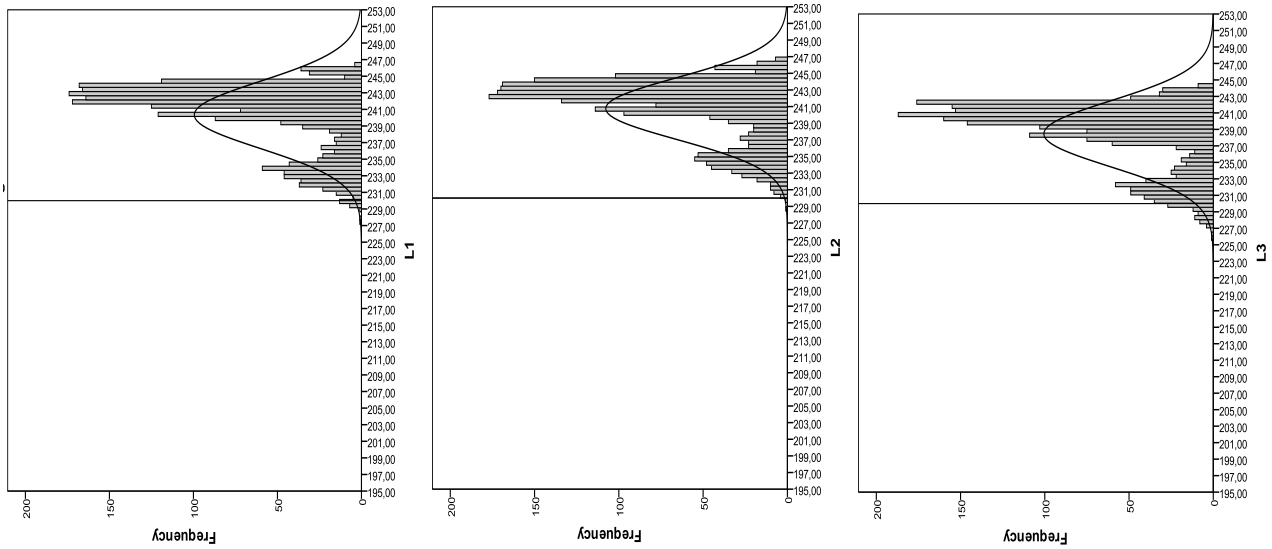
Фиг.1. Ефективни стойности на фазните напрежения

На фиг.1 и в табл.2 са показани минималната, средната и максималната измерена стойност на фазните напрежения. Максималните отклонения на фазните напрежения са: (-1,13%, 7%) за фаза L_1, (-0,57%, 7,26) за

фаза L_2 и (-1,83%, 6,22%) за фаза L_3.
На фиг.2 са показани хистограмите на трите фазни напрежения. По-голяма част от измерените стойности на напрежението са в диапазона 238V - 245V. Тези стойности са над номиналното напрежение от 230 V, но са в допустимия диапазон от 207V до 253V.

Фазни напрежения **Таблица 2**

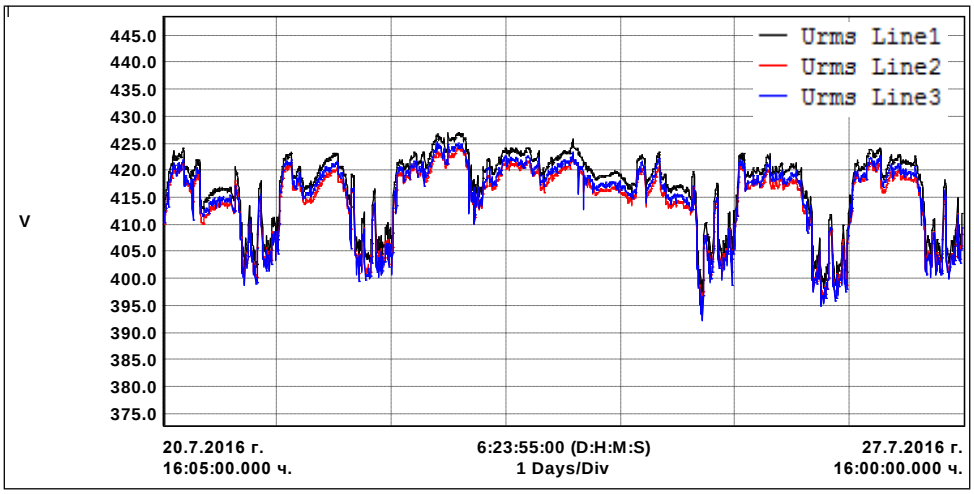
Величина	Фаза	Стойност		
		Мини-мална	Макси-мална	Средна
U, V	L_1	227,4	246,3	240,3
	L_2	228,7	246,7	240,8
	L_3	225,8	244,3	238,5



Mean=240,34; Std. dev.=4,042; N=2016 Mean=240,76; Std. dev.=3,731; N=2016 Mean=238,47; Std.dev.=3,999; N=2016

Фиг.2. Хистограми на фазните напрежения

На фиг.3 и в табл.3 са показани минималната, средната и максималната измерена стойност на линейните напрежения. Максималните отклонения на линейните напрежения са съответно: (-1,1%, 6,8%) за фаза L_{12}, (-1,65%, 6,13) за фаза L_{23} и (-1,9%, 6,33%) за фаза L_{13}.



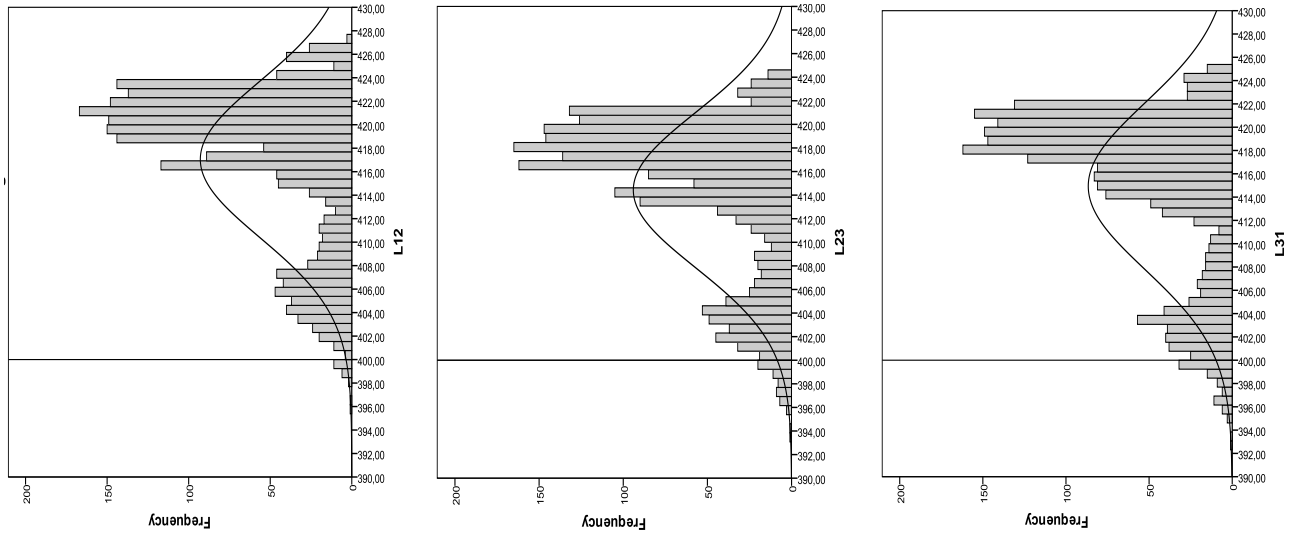
Фиг.3. Ефективни стойности на линейните напрежения

На фиг.4 са показани хистограмите на линейните напрежения. По-голяма част от измерените стойности на линейното напрежение са в диапазона 410V - 424V. Тези стойности са над номиналното напрежение от 400 V, но са в допустимия диапазон от 360V до 440V.

Следователно, стойностите на фазните и линейните напрежения за 100% от периода на измерване са в допустимия диапазон от ±10%$U_н$ (от 207 до 253 V и от 360 до 440 V), регламентирани в БДС EN 50160. Краткотрайни спадания, пренапрежения и прекъсвания на захранващото напрежение, за периода на измерване, не се наблюдават.

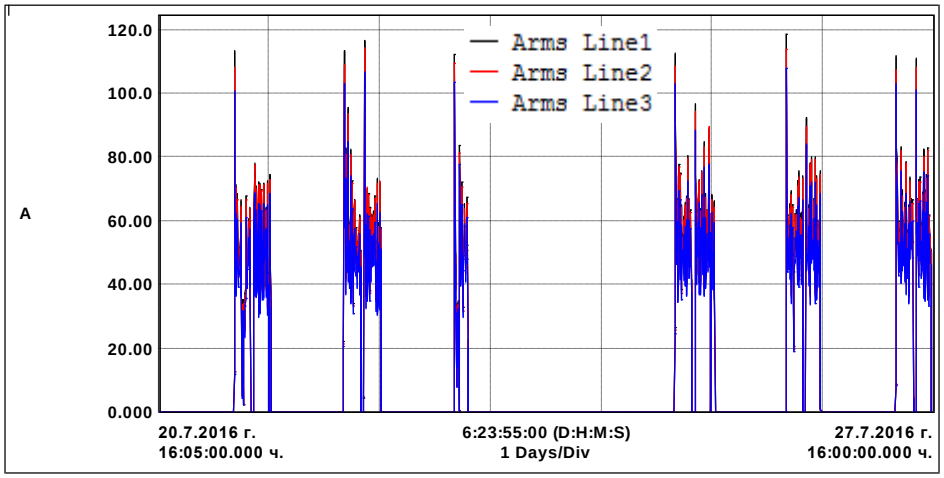
Линейни напрежения **Таблица 3**

Величина	Фаза	Стойност		
		Мини-мална	Макси-мална	Средна
U, V	L_{12}	395,6	427,2	417,1
	L_{23}	393,4	424,5	414,4
	L_{13}	392,4	425,3	414,9



Mean=417,07; Std. dev.=6,661; N=2016 Mean=414,43; Std. dev.=6,58; N=2016 Mean=414,94; Std.dev.=7,145; N=2016

Фиг.4. Хистограми на линейните напрежения



Фиг.5. Ефективни стойности на фазните токове

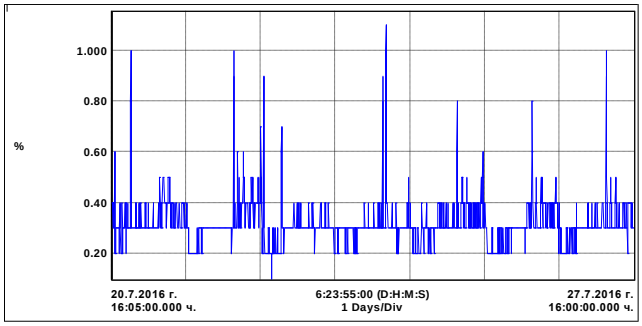
На фиг.5 е показано изменението на тока в трите фази, а в табл.4 са дадени минималната, средната и максималната стойност. За да се осигури необходимото налягане в системата, компресорът не работи непрекъснато. Редуват

се периоди на работа и периоди с максимално натоварване. Както се вижда максималните натоварвания на отделните фази са: за L_1 - 118,7A; за L_2 - 114,4A; за L_3 - 108A. Средното натоварване за L_1 е 55,23A, за L_2 е 54,22A и за L_3 е 49,76A.

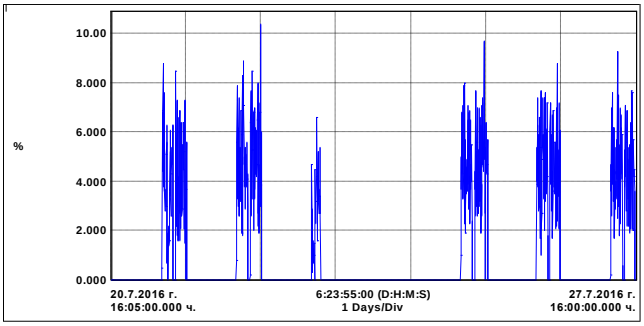
Стойности на токовете **Таблица 4**

Величина	Фаза	Стойност		
		Минимална	Максимална	Средна
I, V	L1	0	118,7	55,23
	L2	0	114,4	54,22
	L3	0	108,0	49,76

На фиг.6 е показана несиметрията на напрежението. Минималната, средната и максималната стойност на несиметрията на напрежението са съответно 0,1%, 0,317% и 1,1%. Следователно, в 100% от времето на провеждане на измерването, несиметрията на напрежението е под допустимата норма от 2%.



Фиг.6. Несиметрия на напрежението



Фиг.7. Несиметрия на токовете

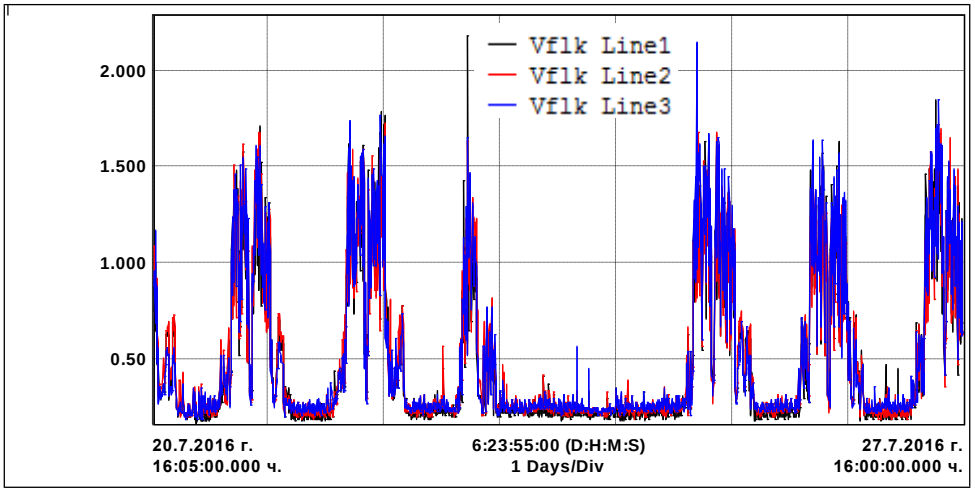
На фиг.7 е показана несиметрията на токовете. Минималната, средната и максималната стойност на несиметрията на токовете е съответно 0%, 1,06% и 10,4%. Максималната стойност на този показател е в момент, в който тока във фазите рязко спада от 110 А до 30А и се задържа на тази стойност за кратко, което всъщност ни води до заключението, че несиметрията е причинена от честотното управление на компресора.

За оценка на краткотрайните изменения се използва стойността на фликера. В табл.5 са дадени минималната, максималната и средната стойност на фликера за всяка фаза. На фиг.8 е показано изменението на моментните стойности на фликера за периода на измерване. Вижда се, че измерените стойности на фликера за фаза L_1 в 321 случая (15,9%), за фаза L_2 в 340 случая (16,9%) и за фаза L_3 в 358 случая (17,8%) са по-големи от допустимата стойност 1. Причината може да се търси в работата на честотния преобразувател. Следователно в по-малко от 95% от случаите стойността на фликера и за трите фази е в допустимата норма - не надвишава 1.

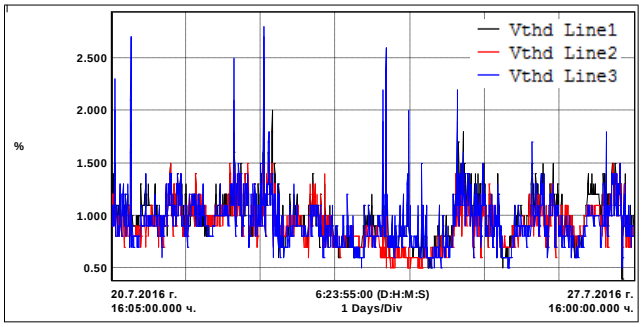
Фликер **Таблица 5**

Величина	Фаза	Стойност		
		Минимална	Максимална	Средна
P_{lt}	L_1	0,170	**2,180**	0,493
	L_2	0,190	**1,730**	0,506
	L_3	0,190	**2,150**	0,516

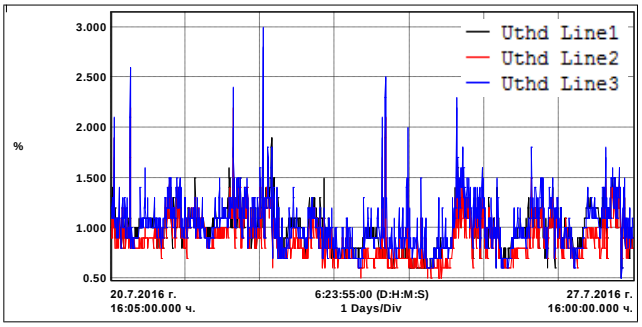
На фиг.9 и фиг.10 е показано общото хармонично изкривяване, съответно на фазните и на линейните напрежения, а в табл.6 минималните, средните и максималните им стойности.



Фиг.8. Фликер



Фиг.9. Общо хармонично изкривяване на фазните напрежения



Фиг.10. Общо хармонично изкривяване на линейните напрежения

Максималните стойности на общото хармонично изкривяване, както на фазните напрежения (за L_1 е 2,5%, за L_2 е 1,5% и за L_3 е 2,8%), така и на линейните напрежения (за L_{12} е 1,9%, за L_{23} е 2,2% и за L_{13} е 3,0%) в 100% от случаите не превишават определената в [1, 3, 4] допустима стойност за общото хармонично изкривяване на захранващото напрежение от 8%.

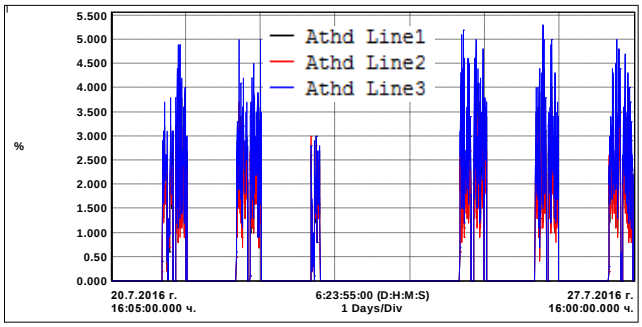
На фиг.11 е показано общото хармонично изкривяване на токовете в трите фази, а в табл.7 измерените минимални, максимални и средни стойности. Максималните стойностите са съответно: 4,9% за фаза, 4,0% за фаза L_2 и 5,3% за фаза L_3. В 100% измерените стойности на общото хармонично изкривяване на токовете в трите фази са значително по-ниски от допустимата стойност от 25% регламентирана в БДС IEC 61000-3-4 [2, 4].

Общо хармонично изкривяване на напреженията **Таблица 6**

Величина	Фаза	Стойност		
		Мини-мална	Макси-мална	Средна
фазно напрежение, **THD_V, %**	L_1	0,4	2,5	0,988
	L_2	0,5	1,5	0,916
	L_3	0,5	2,8	0,938
линейно напрежение, **THD_U, %**	L_{12}	0,5	1,9	0,978
	L_{23}	0,5	2,2	0,898
	L_{13}	0,5	3,0	1,029

В табл.8 и табл.9 са дадени максималните измерени стойности на хармониците на линейното напрежение. Наблюдават нечетни хармоници от 3 до 25 хармоник на напрежението. Всички те са много по-ниски от допустимите норми дадени в [1, 3, 4], с изключение на 15 и 21 хармоник, които са по-високи от допустимата

норма. От четните хармоници на напрежението се наблюдават 8, 14, 16, 18, 20 22 и 24 хармоник, като стойностите на 14, 16, 18 и 20 хармоник са по-големи от допустимата стойност.



Фиг. 11. Общо хармонично изкривяване на фазните токове

Общо хармонично изкривяване на токовете **Таблица 7**

Величина	Фаза	Стойност		
		Минимална	Максимална	Средна
THD_I, %	L1	0	4,9	0,522
	L2	0	4,0	0,463
	L3	0	5,3	0,615

Нечетни хармоници на напрежението **Таблица 8**

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_{12}	L_{23}	L_{13}
3	5,0	0,5	0,9	1,3
5	6,0	1,0	1,1	1,1
7	5,0	1,0	1,0	1,2
9	1,5	0,1	0,4	0,3
11	3,5	0,7	0,7	0,7
13	3,0	1,1	0,9	1,0
15	0,5	0,6	0,6	0,5
17	2,0	0,7	0,9	0,5
19	1,5	1,1	0,8	1,2
21	0,5	1,1	1,0	1,8
23	1,5	0,5	1,4	1,3
25	1,5	0,3	0,4	0,5

Четни хармоници на напрежението **Таблица 9**

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_{12}	L_{23}	L_{13}
8	0,5	0,1	0	0,1
14	0,2	0,5	0,5	0,4
16	0,2	0,5	0,4	0,3
18	0,2	0,4	0,5	0,4
20	0,2	0,4	0,2	0,4
22	0,2	0,1	0,1	0,2
24	0,2	0	0,1	0,1

Нечетни хармоници на тока **Таблица 10**

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 61000-3-4, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_1	L_2	L_3
3	21,6	0,9	0,9	1,1
5	20,7	3,9	3,0	4,5
7	7,2	2,6	2,3	2,5
9	3,8	0,3	0,4	0,6
11	3,1	0,7	0,7	0,8
13	2,0	0,8	0,8	1,0
15	0,7	0,2	0,2	0,2
17	1,2	0,3	0,3	0,4
19	1,1	0,5	0,4	0,3
21	0,6	0,3	0,1	0,3
23	0,9	0,2	0,2	0,2
25	0,8	0,3	0,2	0,3

Четни хармоници **Таблица 11** на тока

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 61000-3-4, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_1	L_2	L_3
2	4,0	0,5	0,6	0,6
4	2,0	0,2	0,3	0,3
6	1,3	0,2	0,2	0,2
8	1,0	0,2	0,2	0,1
10	0,6	0,1	0,1	0,1

Получените експериментални резултати за хармониците на тока са обработени

и систематизирани в табл.10 и табл.11, като е направено и сравнение със съществуващите стандарти [2, 4]. Налични са всички нечетни хармоници на тока до 25 хармоник, като всички измерени максимални стойности са по-малки от регламентираните допустими стойности в БДС IEC 61000-3-4. От четните хармоници на тока се наблюдават 2, 4, 6, 8 и 10 хармоник, като всички измерени стойности са под допустимата норма дадена в [2].

Достигнатите максимални стойности на фактора на мощността за времето на работа са: 0,866 за L_1, 0,825 за L_2, 0,865 за L_3. Средните стойности са: 0,459 за L_1, 0,406 за L_2, 0,438 за L_3.

В табл.12 са дадени минималната, средната и максималната стойност на измерените активна, реактивна и пълна мощност.

Максималният коефициент на натоварване на двигателя задвижващ компресора, за периода на измерване, е 89,84%.

Консумираната активна енергия за периода на измерване от седем дни е 1,066 MWh, реактивната енергия е 0,945 MVArh, а пълната електрическа енергия е 1,479 MVAh.

Активна, реактивна и пълна мощност **Таблица 12**

Величина	Фаза	Стойност		
		Минимална	Средна	Максимална
P, kW	L_1	0	2,294	23,87
	L_2	0	2,056	22,21
	L_3	0	1,990	21,58
	сумарна	0	6,340	67,38
Q, kW	L_1	0	1,864	14,32
	L_2	0	2,051	15,59
	L_3	0	1,715	13,35
	сумарна	0	5,630	43,26
S, kW	L_1	0	3,055	27,50
	L_2	0	3,016	26,99
	L_3	0	2,734	24,86
	сумарна	0	8,805	79,15

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените измервания и анализ може да се направи извода, че електрическата енергия с така измерените показатели за качество отговаря на нормите дадени в БДС EN 50160 и няма неблагоприятно влияние на нормалната работа на консуматора захранван с нея.

Консуматорът оказва негативно влияние върху качеството на електрическата енергия, в следствие на наличието на стойности на фликера над установената норма. Тези нива на фликера са следствие от два натрупващи се фактора: влиянието на другите консуматори свързани към този извод ниско напрежение на трансформатора върху флуктацията на напрежението и използването на честотен преобразувател за управление на компресора.

В заключение може да се каже, че както производителя, доставчика така и консуматора взаимодействайки си носят отговорност за качеството на електрическата енергия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 50160 ***Характеристика на напрежението на електрическата енергия доставяна от обществените разпределителни електрически системи***, 2006.

[2] БДС IEC 61000-3-4 ***Електромагнитна съвместимост. Част 3-4 Граници – ограничаване на емисиите на хармоничните токове в слаботокови системи, захранване на оборудване, с номинален ток над 16А***, 1998.

[3] ДКЕВР, ***Показатели за качество на електроснабдяване на ДКЕВР,*** юли, 2004.

[4] Цанев Ц., С. Цветкова, ***Качество на електрическата енергия***, Авангард Прима, София, 2011.

[5] Цанев Ц., С. Цветкова, В. Цветкова, ***Определяне на контролните точки за монтаж на апаратура за измерване на качеството на електрическата енергия***, Енергиен форум 2008, Варна, 11-14 юни 2008, стр. 321-329**.**

[6] Цветкова С., А. Петлешков, ***Изследване на качеството на електрическата енергия в предприятие за производство на стъклени бутилки***, III Научна конференция ЕФ 2011, Созопол, 30 септември - 3 октомври 2011, том 1, стр. 214-221.

Автори: Николай Стоманярски, маг. инж., кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *nstomaniarski@tu-sofia.bg*; Светлана Цветкова, доц. д-р, кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *stzvet@tu-sofia.bg*; Ангел Петлешков, ас., кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *apetl@tu-sofia.bg*; Ваня Петрова, маг. инж., кат. ПГЖПТ, E-mail address:*: vaniatzvet@abv.bg.*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** проф. д-р Стоян Стоянов

ОПРЕДЕЛЯНЕ СТРУКТУРАТА НА ИЗТОЧНИЦИТЕ НА РЕАКТИВНА МОЩНОСТ В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИ СИСТЕМИ СЪС СОБСТВЕНИ ТЕЦ

Николай Матанов, Снежана Димитрова, Харалан Пенев

Резюме: *Синхронните генератори и двигатели (СГ, СД) и кондензаторните батерии (КБ) са главните източници на реактивна мощност в съвременните предприятия. При различни обективни условия (цена на активната енергия, себестойност на реактивната мощност, предписан фактор на мощността и др.) са възможни различни най-целесъобразни варианти на използване на наличните източници на реактивна мощност. В представеният доклад е направено обследване на предприятие със собствена ТЕЦ, за това коя структура на източниците на реактивна мощност е най-икономически оправдана. Това е съобразено с настоящите изисквания по отношение на фактора на мощност, цените на електрическата енергия и себестойността на реактивната мощност от различните източници. Направени са варианти и при други условия на изброените фактори. Направени са изводи и препоръки за използване на кондензаторните батерии като основен източник на реактивна мощност в подобни предприятия.*

Ключови думи: *източници на реактивна мощност, себестойност на реактивната мощност.*

DETERMINING THE STRUCTURE OF THE REACTIVE POWER SOURCES IN THE ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS WITH THERMAL POWER STATION

Nikolay Matanov, Snezhana Dimitrova, Haralan Penev

Abstract*: Synchronous motors and generators and capacitor batteries are major sources of reactive power in modern enterprises. In various objective conditions (price of active energy, value of reactive power, prescribed power factor, etc.), various options are most appropriate to use of available sources of reactive power. In the report done audits of a company with its own thermal power station, about which structure the sources of reactive power is the most economically reasonable to use. This is in line with current requirements in terms of power factor, electricity prices and the value of reactive power from different sources. There have been variants on other conditions enumerated factors. Conclusions are made and recommendations for the use of capacitor banks as their main source of reactive power in such kind enterprises.*

Keywords*: sources of reactive power, value of reactive power*

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Режимът на реактивните товари в електроснабдителните системи (ЕСС) 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 [1]. От тази гледна точка компенсирането на реактивните товари е основна задача при проектирането и експлоатацията на електроснабдителните системи.

Реализирането на желания фактор на мощност се постигна с компенсиращи устройства като кондензаторни батерии (комплектни кондензаторни уредби – ККУ) и/или синхронни двигатели/генератори и др. При сложни йерархични електроснабдителни системи повишаване ефективността на използваните компенсиращи устройства може да се постигне чрез оптимизиране на структурата, разпределението и управлението на общата компенсираща мощност на дадения стопански субект.

Специфични разходи за производството на реактивна мощност **Таблица 1**

№	Компенсиращо устройство	Специфични разходи за производство, kW/kVAr
1.	Синхронни генератори и синхронни двигатели с мощност от 500 до 5000 kVA, които се използват като компенсатори	0,05 – 0,10
2.	Синхронни генератори, използвани като компенсатори, без да се отделят от първичния двигател	0,25 – 0,30
3.	Кондензаторни батерии (стар тип с хартиен диелектрик) за напрежение до 500 V	0,004 – 0,0045
4	Кондензаторни батерии (стар тип с хартиен диелектрик) и за напрежение 3 - 10 kV	0,003
5.	Кондензаторни батерии нови конструкции (сега намиращи се на пазара) за ниско напрежение (0,4 kV)	0,0002 – 0,00025

Производството на реактивна енергия е свързано с разходи на активна електрическа енергия при генераторите и активна енергия в диелектрика на кондензаторните батерии. Произведената реактивна енергия от генераторите следва да се пренася на големи разстояния до потребителите на реактивна енергия, а при кондензаторните батерии произведената реактивна енергия се пренася на малки разстояния, защото кондензаторните батерии се инсталират в близост до потребителите. Пренасянето на реактивна енергия е свързано със загуби на електрическа енергия в преносните електрически мрежи. Като показател за себестойността на произвежданата реактивна мощност може да се приеме специфичния разход на активна мощност, за производство на 1 kVAr реактивна мощност - kW/kVAr [2,3].

В табл.1 са дадени литературни и каталожни данни за специфичния разход на активна мощност за производство на реактивна от различни източници използвани в предприятията [3,4,5].

2. ПРЕДПРИЯТИЕ ПРОИЗВОДСВА И ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ

В тази статия е направено изследване на компенсирането на реактивните товари на конкретно предприятие. Основните производства на предприятието са захарните изделия и спирт, но има и други подпомагащи производства. Всички, отделно обособени производства, са: захар, рафинерия, захарни изделия, спирт, полиграфия, ремонтно механичен завод.

За осигуряване на отделните производства с промишлена пара и електричество има изградена собствена топлоелектрическа централа (ТЕЦ). Общата инсталирана парова мощност на централата е 110 t/h, общо инсталираната електрическа мощност е 12 MW. Централата работи с въглища и е снабдена с един котел с производителност 75 t/h и един с производителност 35 t/h. Парогенераторите са с "П"-образна конструкция, вертикално тръбни, от еднобарабанен тип. Те са за изгаряне на въглища с високи летливи вещества и директна схема за изгаряне. За производство на електричество са инсталирани две противоналегателни турбини. ТЕЦ-а има електростатичен филтър за очистване на праха от отпадъчните газове. Производство на електричество от ТЕЦ е само при нужда от топлина за технологиите. Заводът може да работи както изцяло захранван с електроенергия от собствения ТЕЦ, така и изцяло захранван с електроенергия от външен доставчик. Излишната електрическа енергия от ТЕЦ се продава.

Основните особености на електроснабдяването на завода са:

- I категория по сигурност на електроснабдяването;
- ТЕЦ – два броя генератори; номинална мощност на всеки генератор Рн = 6000 kW, Uн = 6,3kV; в работа е една турбина и генератор към нея;
- Връзка с енергийната система - два повишаващи трансформатора по 6,3MVA 6,3/20kV;
- Две главна разпределителни подстанции (6kV и 20kV);
- Единични секционирани шинни системи;
- Вътрешната кабелна разпределителна система СрН - 6kV.

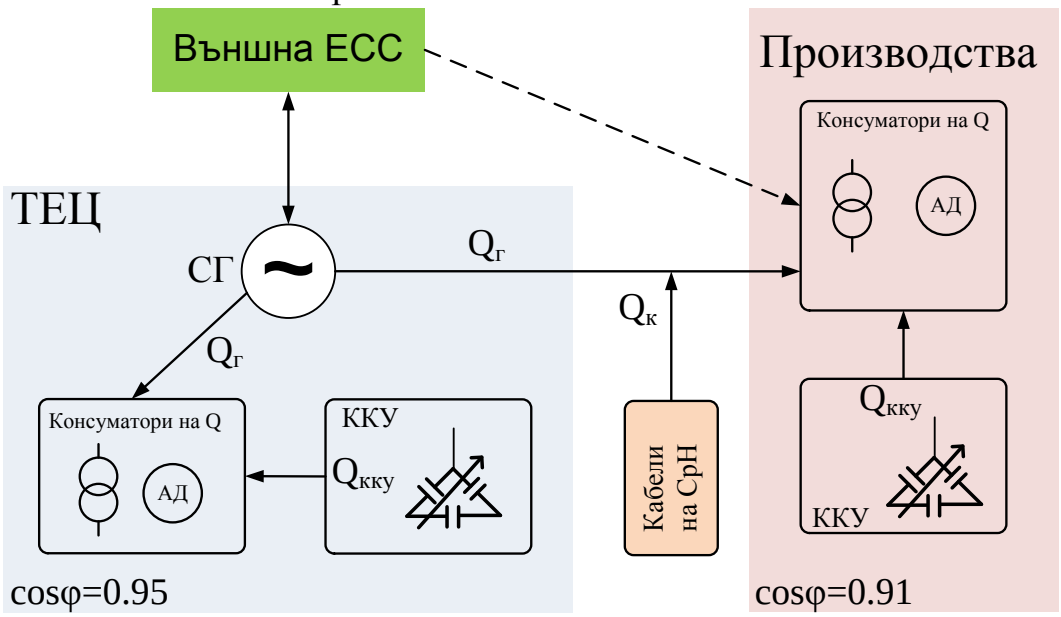
Генераторите на ТЕЦ са два, всеки по 6MW/6,3kV, има две шини собствени нужди (СН1 и СН2) на 6kV. Връзката с външната мрежа е чрез два повишаващи трансформатора по 6,3MVA 6/20kV. Има две разпределителните подстанции за различните производства. Всички трансформатори СрН/НН са маслени (тип ТМ 6/0,4kV) предимно с мощности 630 и 1000kVA. Към електроснабдителната система има информационна-измервателна система .

3. ОЦЕНКА НА КОМПЕНСИРАНЕТО НА РЕАКТИВНИТЕ ТОВАРИ

На базата на електроснабдителната система на завода и на наличните източници на реактивна мощност в ЕСС на завода се предлага принципната схема на фиг.1 за баланс на реактивните товари. От схемата се вижда, че има два основни източника на реактивна мощност – СГ в ТЕЦ и комплектни кондензаторни уредби (ККУ) монтирани в ТЕЦ и в подстанциите на производствата.

Основният режим на работа на тази схема трябва да осигурява следното:

- Първо - поддържане на cosφ = 0,91 за производството;
- Второ - поддържане на cosφ = 0,95 за ТЕЦ (толкова е нормативно изисквания за производителите на електроенергия);
- Трето – при баланса ще се вземе предвид и генерираната реактивна енергия от кабелните линии СрН.



Фиг.1. Принципна схема за баланс на реактивните мощности.

Чрез наличната информационна система са получени данни за всеки час за потребление на активна, реактивна и пълна енергия за периода от ноември 2014 г. до октомври 2015 г. Данните са обработени и са получените средно-месечни, максимални-месечни и средно-годишни активни P, реактивни Q и пълни S електрически товари по производства. В табл.2 и табл.3. са дадени обобщени данни за средните и максималните товари по производства

Средно-годишни електрически товари по производства **Таблица 2**

№	Производство	Резултати			
		kVA	kW	kVAr	cos φ
1.	ТЕЦ – СН 1	259	200	156	0,77
2.	ТЕЦ – СН2	423	322	265	0,76
3.	Захарен завод	346	298	166	0,86
4.	Рафинерия	396	244	276	0,62
5.	Завод за захарни изделия	340	305	146	0,89
6.	Спиртна фабрика	712	620	339	0,87
7.	Полиграфия	87	63	59	0,72
8.	РМЗ	41	36	15	0,88
	Общо:	**2604**	**2088**	**1422**	**0,80**

В табл.2 са дадени обобщени данни за средните товарите на завода. От тях се вижда се, че факторът на мощност е по-нисък от 0,9; което означава, че има нужда от допълнително компенсиране на реактивните товари.

Максимални-месечни електрически товари по производства **Таблица 3**

№	Производство	Месец	Максимални месечни товари			
			kVA	kW	kVAr	cos φ
1.	ТЕЦ – СН1	VIII	640	429	472	0,67
2.	ТЕЦ – СН2	I	498	354	344	0,71
3.	Захарни заводи А334	VIII	1210	1056	589	0,87
4.	Рафинерия	II	1177	597	995	0,50
5.	Завод за захарни изделия	VII	391	365	137	0,93
6.	Спиртна фабрика 2	II	751	611	431	0,81
7.	Полиграфия	II	108	84	66	0,78
8.	РМЗ	XII	71	66	20	0,93
Общо			**4846**	**3562**	**3054**	**0,735**

В табл.3 са обобщени данните за максималните месечни товари по производства, като в третата колона е посочен месецът, в който се е получил максималния товар.

Сравнението между средногодишните месечни товари с максималните месечни товари показва много различия за активна и реактивна мощности и съответния фактор на мощността. Това се дължи и на липсата на достатъчна инсталирана кондензаторна мощност в поделенията на завода. При по-големи активни натоварвания значително се променя и нараства потреблението на реактивна енергия. Нейното компенсиране с кондензаторни батерии трябва да отчита и максималните товари, защото в противен случай компенсирането на реактивните товари ще се прехвърля на работещия генератор.

4. ЗАДАЧА И РЕШЕНИЕ

От табл.2 и табл.3 се вижда, че наличните компенсиращи реактивни мощности в завода са недостатъчни за поддържане необходимите стойности на фактора на мощност (ТЕЦ - 0,95 и производство - 0,91). Въпросите за решаване са:

- Могат ли СГ да произвеждат още реактивна мощност?
- Каква нова мощност ККУ е нужда?
- Какво да е съотношението между произвежданата от ККУ и от СГ реактивна мощност?

За да се отговори на тези въпроси е направен анализ на наличните данни. Прието е, че произведената активна електрическа енергия от ТЕЦ се продава на електроенергийната система на цена 154 лв./MWh (0,154 лв./kWh). Произведената от генераторите реактивна енергия Qг, по данните от табл.1, се приема със специфичен разход 0,25 kW/kVAr. На базата на тези данни могат да се направят следните изчисления:

- Произведената от СГ реактивна мощност $Q_г$, по данните от табл.1 е *0,25 x 0,154 = 0,0385 лв./kVAr;*

- Произведената мощност от стария тип ККУ е
  0,00045 x 0,154 = 0,0000693 лв./kVAr;
- Произведената мощност от новия тип ККУ е
  0,00025 x 0,154 = 0,0000385 лв./kVAr;
- Разликата между стойността на произведената реактивна мощност от ТЕЦ и тази от нови ККУ е
  0,0385 – 0,0000308 = 0,0384692 лв./kVAr;
- Разликата между стойностите на произведената реактивна мощност от ТЕЦ и тази от стари ККУ е
  0,0385 - 0,0000693 = 0,0384307 лв./kVAr.

От получените резултати по-горе могат да се установят следните съотношения:

- Цената на произведената в генераторите реактивна мощност в ТЕЦ, спрямо тази, произведена от стари КБ е по-скъпа
  0,0385 / 0,0000693 = 555 пъти;
- Цената на произведената в генераторите реактивна мощност в ТЕЦ, спрямо тази, произведена от нови типове КБ е по-скъпа
  0,0385 / 0,0000308 = 1250 пъти;
- Същото сравнение на произведената реактивна мощност от стари кондензаторни батерии, спрямо нови типове КБ показва, че при старите КБ цената на реактивната мощност е по-голяма:
  0,0000693 / 0,0000308 = 2,25 пъти.

От получените резултати могат да се направят следните изводи:

- Показаните резултати за стойностите на произведената реактивна мощност от генератора и кондензаторни батерии доказват безспорно ползата от производство на реактивна мощност от ККУ.
  За икономична и ефективна работа на завода, генераторът трябва да произвежда реактивна енергия в по-малки количества, които да не му пречат на номиналния предписан работен режим на работа, свързан и с продажбата на активна електрическа енергия на енергийната система.
  Приемането на режим за реактивните товари за компенсация, чрез ККУ при достигане в производствата на $cos\varphi=0,91$ ще доведе до намаляване натоварването на кабелната система на 6kV и ще намалеят и активните загуби за пренос в електроснабдителната система.
  Този извод може да се отнесе и за други подобни предприятия със собствени ТЕЦ.
- Поради доказаната полза от замяната на стария тип маслени кондензатори с много по-ефективни и нови типове, с много по-малък специфичен разход на активна мощност за производство на реактивна мощност от генераторите, се предлага всички стари кондензаторни батерии да се заменят с нови, съвременни, с автоматични регулатори по зададен cosφ, предпазващ и евентуални появи на местни пренапрежения при пререгулиране и производство на излишна капацитивна енергия. Общата мощност на старите

КБ е *3120kVAr*.

Този извод е конкретно за това предприятие, защото има налични стари ККУ.

Мощности на необходимите нови ККУ - $Q_{кку}$ **Таблица 4**

№	Производство	Максимални месечни товари				Средни годишни месечни товари				$Q_{кку}$
		kVA	kW	kVAr	cos φ	kVA	kW	kVAr	cos φ	kVAr
1	ТЕЦ - СН1	640,0	429,0	472,0	0,67	259,0	200,0	156,0	0,77	276,5
2	ТЕЦ - СН2	498,0	354,0	344,0	0,71	423,0	322,0	265,0	0,76	182,7
3	Захарен завод ДЗЗ4	1210,0	1056,	589,0	0,87	346,0	298,0	166,0	0,86	107,9
4	Рафинерия	1177,0	597,0	995,0	0,51	396,0	244,0	276,0	0,62	723,0
5	Захарни изделия	391,0	365,0	137,0	0,93	340,0	305,0	146,0	0,90	0,0
6	Спиртна фабрика 2	751,0	611,0	731,0	0,81	712,0	620,0	339,0	0,87	452,6
7	Полиграфия	108,0	84,0	66,0	0,78	87,0	63,0	59,0	0,72	30
8	РМЗ	71,0	66,0	20,0	0,93	41,0	36,0	15,0	0,88	0,0
			Сумарна кондензаторна мощност:							**1780**

В табл.4 са дадени изчисленията за необходимата кондензаторна мощност по производства. Тя е изчислена по формула (1) [6].

$$Q_{кку} = P_м(tg\varphi_е - tg\varphi_ж), \quad (1)$$

където $P_м$ са максималните месечни товари за всяко от производствата;

$tg\varphi_е$ - тангенс от ъгъла φ при съществуващото положение (естествения φ);

$tg\varphi_ж$ - тангенс ъгъла φ след монтиране на допълнителните КБ (желания φ).

Необходимата обща, нова кондензаторна мощност от ***1780kVAr***, заедно със закупуването и смяната на старите кондензаторни батерии с мощност от *3120kVAr* (които вече са загубили част от мощността си), възлиза на ***4900kVAr***.

С включването в работа на всички ККУ по време на максималните електрически товари ще се достигане *cosφ=0,91*. С мощността на кондензаторните батерии ще се намали произвежданата от генератора реактивна мощност, същият ще може да произвежда повече активна енергия и да изнася в електроснабдителната система излишната активна енергия при cosφ=0,95.

5. ФИНАНСОВ АНАЛИЗ

В табл.5 са представени резултатите от изчисленията за една година на пълната и реактивната енергия при фактор на мощността равен на 0,91.

Данни за производството на електричество от генератора на ТЕЦ за **Таблица 5**
след подмяната на кондензаторниете батерии

Бъдещо състояние	**cosφ**	**Пълна**	**Активна**	**Реактивна**
		kVAh	KWh	KVARh
	0,91	14 833 498,67	**13 498 483,79**	6 150 090,91

Изчисленията са основани на преизчисление на пълната енергия от приетата за базова активна енергия отчетена през 2015г., но при новия фактор на мощност от 0,91. Бъдещата реактивна енергия е изчислена по уравнението:

$$Реактивна\ енергия = \sqrt{Пълна\ енергия^2 - Активна\ енергия^2} \qquad (2)$$

Направен е анализ на чувствителността при различни сценарии на специфично потребление на активна енергия за серия стойности на показателя kW/kVAr от генератора при подмяна на ККУ (табл.6), основано на реално измерената реактивна енергия през 2015г. и данните от табл.5.

Стойност на потребната активна енергия за генериране на реактивна **Таблица 6**
след подмяна на ККУ

kW/KVAr	**kWh**	**лв. с ДДС**
0,25	1 537 522,73	236 778,50
0,20	1 230 018,18	189 422,80
0,15	922 513,64	142 067,10
0,10	615 009,09	94 711,40

Разходите за производство на реактивна енергия от генератора ще намалеят при условие, че заводите работят при включени нови 1780kVAr и закупени нови на мястото на старите кондензаторни батерии. Общата инвестиция за нови кондензаторни батерии с мощност 3120 + 1780 = 4900 kVAr, по ориентировъчни данни на фирми от пазара на тази продукция, е 98000 лв. с ДДС (18 - 20 лв. за kVAr).
Икономическата печалба при описаните сценарии е показана в табл.7. Изчисленията са направени при цена на електрическата енергия - 154 лева/MWh (0,154 лв/kWh).

Финансови ползи и срок на откупуване (SPB) **Таблица 7**

kW/KVAr	**Печалба, лв с ДДС**	**SPB, год**
0,25	113 385,83	0,86
0,2	90 708,66	1,08
0,15	68 031,50	1,44
0,1	45 354,33	2,16

При определяне срока на откупуване, в инвестицията се включват кондензаторни батерии, електрически табла с апаратура и автоматичен регулатор за регулиране на cosφ. Оценката е направена консервативно, без отчитане намаляване на собствените загуби в новите ККУ.
Подобни изчисления могат да се направят и при други цени на продаваната активна електрическа енергия и цени на новото оборудване, които са обективни условия за всяка конкретна ситуация.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На база на представените резултати могат да се направят следните заключения:

- При наличие на СГ в предприятията, които произвеждат и продават активна електрическа енергия и ККУ е най-целесъобразно за компенсиране на реактивните товари да се използват само КБ, а СГ да работят с фактор на мощност близък до 1;

- Допълнителен резерв за по-ефективно използване на електрическата енергия е намаляване загубите от преноса на реактивна мощност във вътрешната разпределителна мрежа. Това намаляване може да се постигне чрез централизирано управление на кондензаторните мощности, като разпределението се извършва чрез оптимизация по критерий минимални загуби на активна електроенергия [7,8];

- Във връзка енергийната ефективност и цената на електроенергията е необходимо да се направят изследвания за определяне стойността на произвежданата реактивна мощност от различните генератори в ТЕЦ, АЕЦ, ВЕЦ, ВЕИ и други.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Zhao D., Y. Ni, *Reactive Power and Voltage Control in Deregulated*, Environment, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, Chin. pp. 1-5

[2] Gómez S. B., Y. A. Baza, M. A. Zepeda, *Reactive Power Generation Curve*, The International Journal of Engineering and Science (IJES). Volume 1, Issue 2, 2012, pp. 48-53

[3] Barquín J., D. Soler, O. Largo, G. Relaño, I. de la Fuente, *On the Cost of the Reactive Power Generation and Voltage Support Service*, Bulk Power System Dynamics and Control IV-Restructuring, August 24-28, Santorini, Greece, 2000

[4] Kumar A., R. Kumar. *Reactive Power Cost Analysis with Generators and Condensers in Deregulated Power System*, 4th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications, Volume 82 of IPCBEE. 2015. pp. 56-62

[5] Deksnys R., R. Staniulis. *Pricing of Reactive Power Service*, Oil Shale, Vol. 24, No. 2 Special. 2007. pp. 363-376

[6] Василев, Н.И., С.Т. Сидеров, *Електроснабдяване на промишлени предприятия*. С., Техника, 1991.

[7] Moreno H., G. Gutierrez, S. Plumel, P. Bastard, G. B. Sheble. *A New Approach to Assess the Value of Reactive Power Production*, 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005, Session 11, Paper 2, pp. 1-7

[8] Raap M., P. Raesaar, E. Tiigimägi, *Reactive Power Pricing in Distribution Networks*. Oil Shale, Vol. 28, No. 1S, 2011, pp. 223-239

Автори: Николай Стефанов Матанов, доцент д-р инж., кат. "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт" (ЕСЕОЕТ), Електротехнически Факултет на ТУ-София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*; Снежана Асенова Димитрова, ас. инж. докторант, кат. ЕСЕОЕТ, Електротехнически Факултет на ТУ-София, E-mail address: *s.dimitrova@tu-sofia.bg*; Харалан Пламенов Пенев, инж. докторант, кат. ЕСЕОЕТ, Електротехнически Факултет на ТУ-София, E-mail address: *haralan.penev@bg.abb.com*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. д-р Стоян Стоянов

ИЗСЛЕДВАНЕ ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ТОВАРОВИТЕ ГРАФИЦИ НА МЕТАЛООБРАБОТВАЩО ПРЕДПРИЯТИЕ

Николай Матанов

Резюме: *За проектирането на електроснабдителните системи на предприятията и за планиране количествата н електрическа енергия за работата им е нужно да се познават техните товари графици. За изследване показателите на товаровите графици се използват теорията на случайните функции и математическата статистика. От тази гледна точка, количеството данни, с които се разполага и интервалите на запис са важни за получаване на достоверна информация.*
Основни характеристики на товаровите графици на различни производства се дават в специализирани справочници. Поради промяната на технологиите и модернизацията на предприятията информацията трябва да се актуализира, чрез нови изследвания. В този доклад се представят резултатите от изследване на товаровите графици и определяне на техните показатели за предприятие произвеждащо медни и месингови изделия (*ламарина, шини и др.*).
Ключови думи: *товарови графици, изчислителни товари, коефициенти на товаровите графици*

STUDY OF LOAD PROFILES OF METALWORKING FACTORY

Nikolay Matanov

Abstract*: For the design of power supply systems of enterprises and planning quantities of electricity for the work they need to know their cargo schedules. Research indicators of load profiles using the theory of random functions and mathematical statistics. From this perspective, the amount of data that is available and recording intervals are important for obtaining reliable information.*
Key features of load profiles for various industries are given in specialist guides. Due to the change in technology and modernization of enterprise information needs to be updated by new research. In this report the results of a study of load profiles and determine their performance for enterprise producing copper and brass products (*sheets, strips, etc.*).
Keywords*: load curves (profiles), demand and peak loads, load profiles factors*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електрическите товари в една електроснабдителна система, са пример за случайни процеси (функции). Графичното представяне на една реализацията на

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

случайната функция във времето показва изменението на електрическите товари и се нарича произволен товаров график (load curve). За да се отчита комплексното влияние на случайните фактори при изследванията се работи със статистически (типови) товарови графици. Те се получават чрез осредняване на голям брой реализации на случайната функция [1].
Товаровите графици могат да се класифицират по различни признаци – интервала от време за който се построяват, броя на консуматорите, вида на консуматорите и др. Основните категории товарови графици според вида на консуматорите в една електроразпределителна система са графици на жилищни (битови) товари, търговски (обществени) товари, промишлени (индустриални) товари [2].
Информацията която носят товаровите графици се използва при проектирането на електроснабдителните системи на различните обекти; за изготвяне на прогнозни графици за заявки към търговците на електрическа енергия; за анализ работата на консуматорите с цел подобряване режимите на работа (ефективно използване на електрическата енергия), откриване на повреди и др. За да се използва за практически цели информацията от товаровите графици се определят два вида величини – изчислителни електрически товари и коефициенти (бездименсионни показатели). При литературното проучване се установи, че данните за тези показатели, за предприятия от цветната металургия, са много оскъдни. Този доклад е опит за запълване на тази празнина.

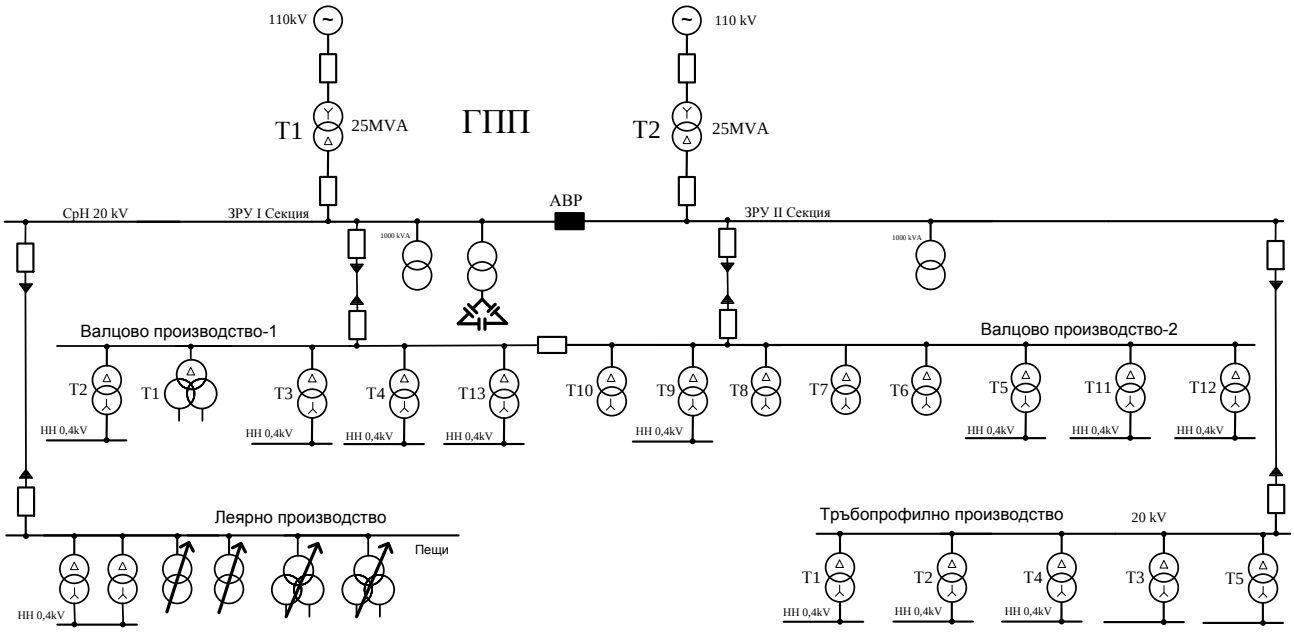
2. ПРОФИЛ НА ПРЕДПРИЯТИЕТО

Предприятието произвежда валцовани и пресовани продукти от мед и медни сплави с приложение в различни индустрии и в строителството - листове, ленти, плочи, дискове, шини, пръти, профили и др., включително с различни покрития. В обекта има обособени следните производства: леярно, валцово, тръбопрофилно. В изброените производства се работи на три смени.
Предприятието е модернизирано изцяло и работи със съвременни технологични линии. Основните консуматори във валцовото и тръбопрпфилното производства са постояннотокови двигатели захранвани чрез управляеми токоизправители. В леярното се използват индукционни пещи.

3. ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНА СИСТЕМА

На фиг.1 е дадена еднолинейна схема на електроснабдителна система на предприятието. Основните й особености са :

- I категория по сигурност на електроснабдяването;
- 3 смени на работа;
- Една главна понижаваща подстанция (ГПП);
- Два трансформатора по 25MVA;
- Външно ниво на захранване 110kV;
- Единична секционирана шинна система;
- Разделен режим на работа;
- Вътрешната разпределителна система на 20kV.



Фиг.1. Електроснабдителна система на предприятието.

Цялата електроснабдителна система е със съвременно оборудване. Има изградена информационна система, което позволи провеждането на даденото изследване.

Поради обективни причини (извън предприятието) в периода на изследване (4 месеца) предприятието работи само с трансформатор Т1 и включен секционен прекъсвач, т.е. цялото производство се захранваше от трансформатор Т1.

4. ТОВАРОВИ ГРАФИЦИ

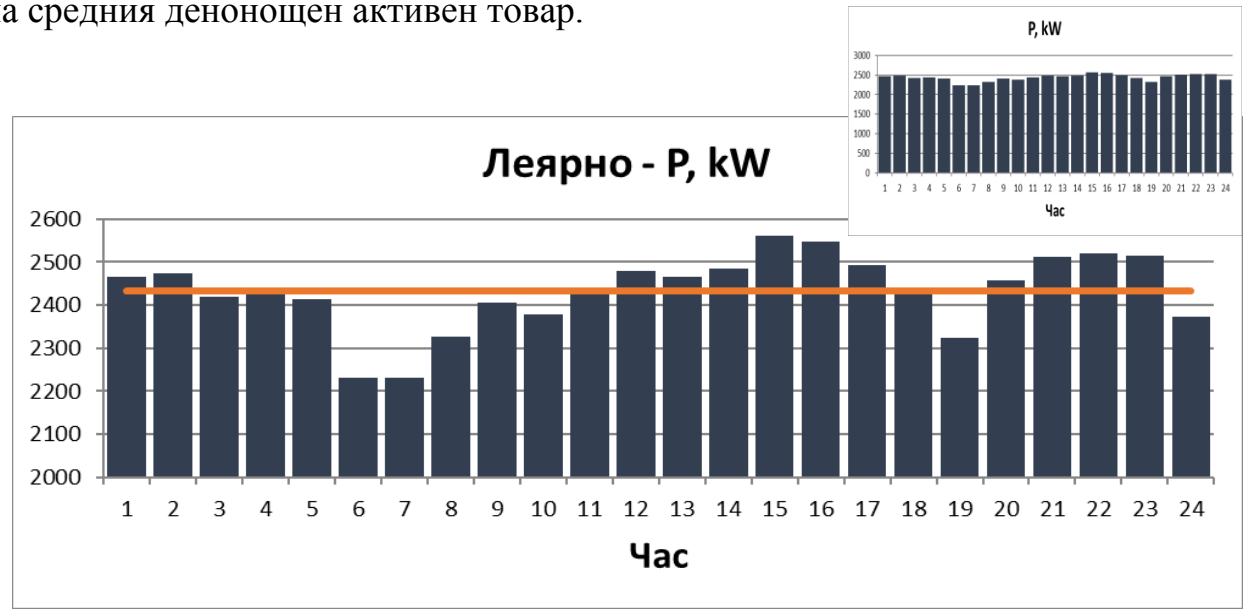
При провеждането на изследване на товаровите графици важно решение е как и на какъв интервал да се записват данните за различните електрически товари. Приетите интервали на запис са 15, 30 и 60 минути. Малките стойности се препоръчват за малко на брой индивидуални консуматори или малки групи консуматори. [2,3,4,5]. В този случай се записват данни за цели производства (виж фиг.1), което означава много на брой единични промишлени консуматори. Освен това за получаването на типовите графици са осредняват 120 реализации на произволни товарови графици. Поради тези аргументи е приет интервал на интегриране 60 минути. Данните за електрическите товари се определят на базата на електрическата енергия (активна, реактивна, пълна) за всеки един час. Товаровите графици за заснети конкретно при следните условия:

- За 4 последователни месеца (януари-април);
- Записаните данни са през 60 минути;
- Записана е информация за P, Q, S ;
- Заснети са товаровите графици на:

  - ✓ Цялото предприятие (Т1);
  - ✓ Леярно производство;

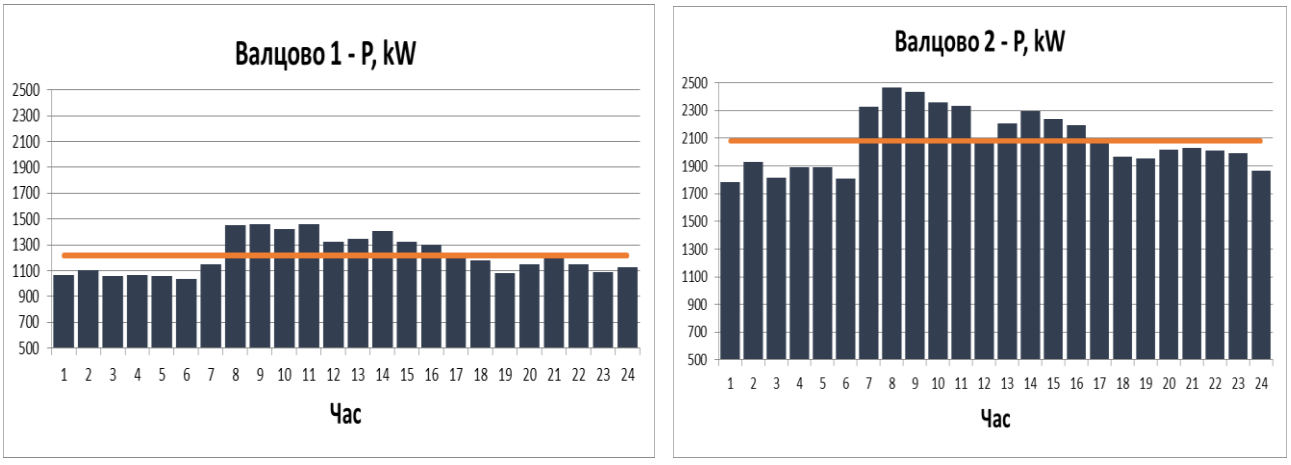
- ✓ Валцово производство-1;
- ✓ Валцово производство-2;
- ✓ Тръбопрофилно производство.

На следващите графики (фиг.2 до фиг.5) са дадени типови (статистически) денонощни товарови графици за активните мощности по производства, получени сред осредняване на всички данни за всеки един час от денонощието за изследваните четири месеца. На всяка от фигурите с права линия е дадена стойността на средния денонощен активен товар.



Фиг.2. Типов денонощен график на Леярно производство.

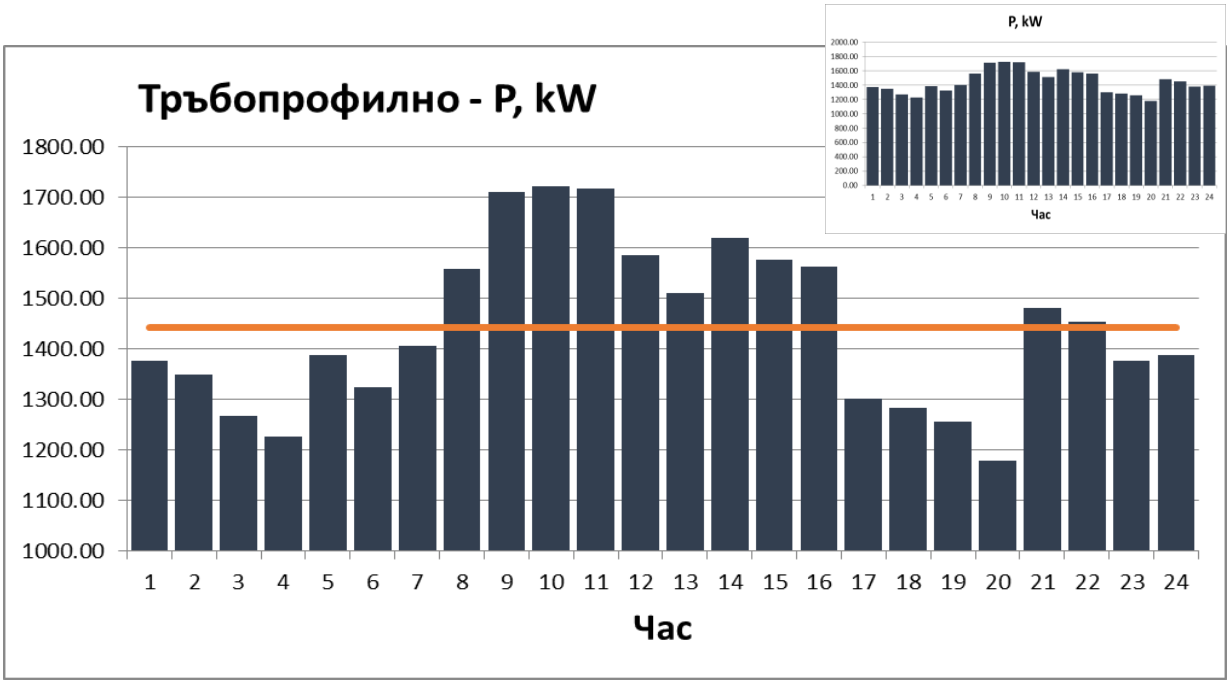
На фигурите има по две графики. На едната ординатната ос не започва от нула, с цел по-добре да се открои промяната на товара и минималните и максималните му стойности.



Фиг.3. Типови денонощни графици на Валцови производства.

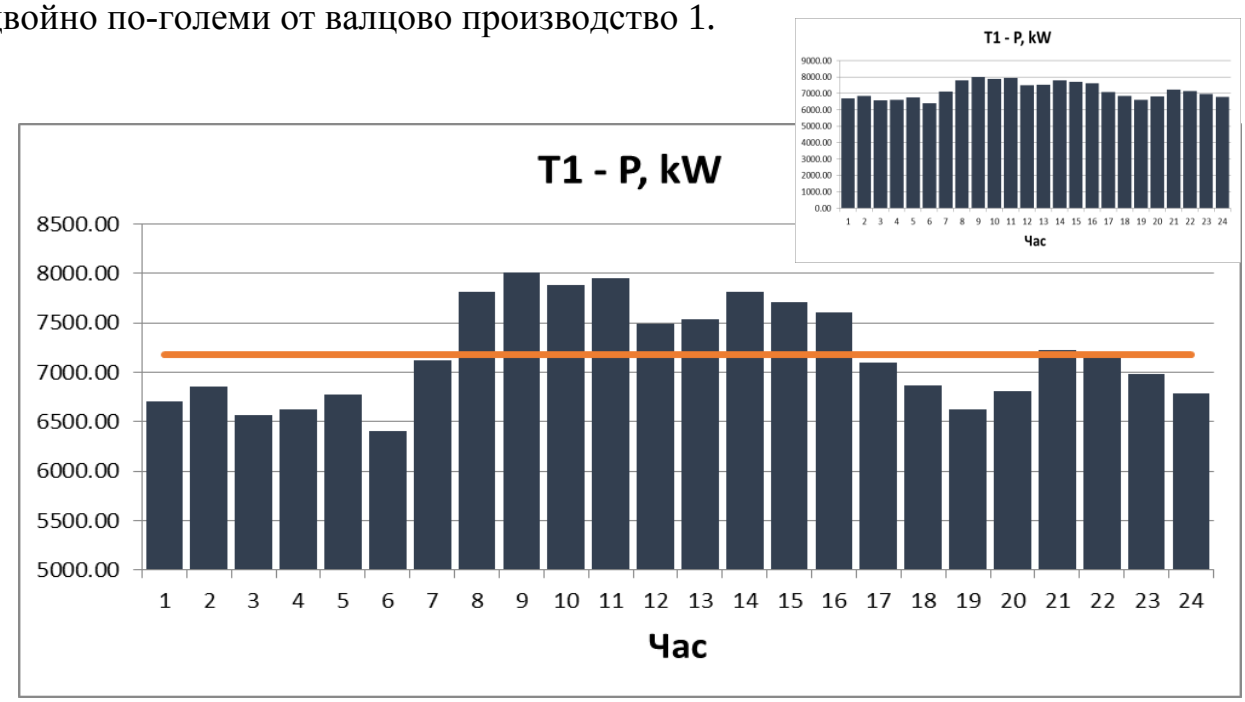
На другата графика (в умален вид) ординатната ос започва от нула, т.е. на нея се вижда от по-далечна перспектива профила на всеки от товаровите графици.
На фиг.2 се вижда, че базовия товар и пиковия са в интервала между 2220 и 2550 kW, т.е. товарът се изменя в относително тесни граници, от което може да

се очаква близък до 1 коефициент на максимума и висок коефициент на запълване.



Фиг.4. Типов денонощен график на Тръбопрофилно производство.

От фиг.3 се вижда, че във валцово производство 2 товарите са приблизително двойно по-големи от валцово производство 1.

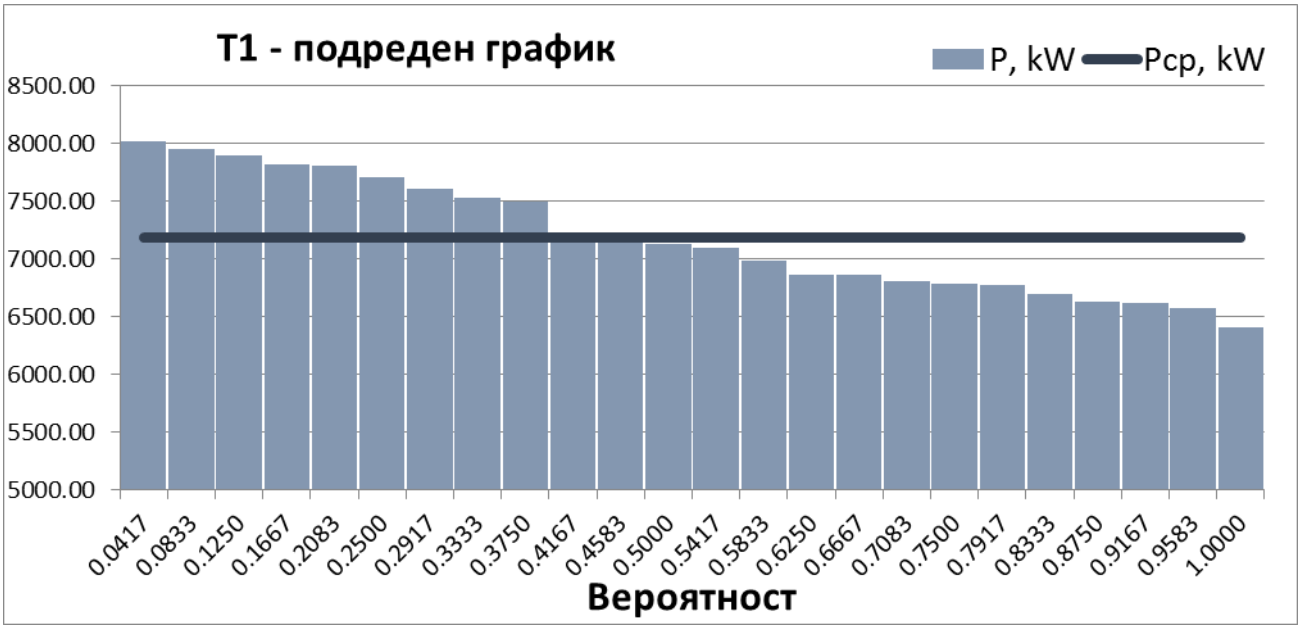


Фиг.5. Типов денонощен график на цялото предприятия

За всички производства най-натоварената смяна (с най-голям среден товар) е дневната смяна.

От така представените товарови графици може лесно да се определи големината и продължителността на базовите и върховите товара за всяко от производствата и за предприятието като цяло, както и времето от денонощието, когато се тези товари се проявяват.

Профилът на всички товарови графици съвпада с профила даван в литературата [2,6,7] за типично индустриални електрически товари.



Фиг.6. Подреден товаров график на предприятието.

На фиг.6 е даден подреден график за активната мощност на цялото предприятие за да се види по-добре динамиката на товара в различните интервали от време. Вижда се, че вероятността товарът да е по-голям от средният е 37,5%.

5. ПОКАЗАТЕЛИ НА ТОВАРОВИТЕ ГРАФИЦИ

След обработка на първичната информация за 4 месеца са получени типовите графици за най-натоварените смени и за тях са определени следните изчислителни товари и бездименсионни показатели по производства по класическите дефиниции и формули [1,2,6,8]:

- Средни товари - $P_{ср}$, $Q_{ср}$;
- Средноквадратични товари – $P_{ср.кв.}$, $Q_{ср.кв.}$;
- Максималнопродължителни товари - $P_{м}$, $Q_{м}$;
- Средните фактори на мощност - PF;
- Коефициенти на използване - $K_{и}$;
- Коефициенти на търсене - $K_{т}$;
- Коефициенти на максимума - $K_{м}$;
- Средноквадратично отклонение на товара - σ.

$$P_{м} = P_{ср} + \beta.\sigma, \qquad (1)$$

Максималнопродължителния товар е определен по стистическия метод (1), при вероятностна кратност на средноквадратичното отклонение β равно на 2,5 (при вероятност 95%) [1].

В табл.1 са обобщени показателите на товаровите графици по производства и за цялото предприятие (колона 6). В табл.1 може да се види, че най-голямата мощност е в леярното производство. Факторът на мощност е по-нисък във валцовото производство, което ще означава и нужда от компенсиране.

Показатели на товаровите графици по производства **Таблица 1**

№	Величина / Производство	**Леярно**	**Валцово-1**	**Валцово-2**	**Тръбопро - филно**	**Общо (Т1)**
1	2	3	4	5	6	6
1	***Рср*** (Demand load)**,** kW	2469.5	1379.8	2269.9	1625.7	7751.1
2	***Рср.кв*.., kW**	2470.2	1381.1	2272.1	1627.5	7753.3
3	***Рм*** (Peak load), kW	2630.4	1544.9	2537.1	1828.7	8241.7
4	**PF** (Power factor)	0.93	0.74	0.73	0.88	0.88
5	***Ки***	0.18	0.09	0.16	0.15	0.15
6	***Кт*** (Demand Factor)	0.19	0.11	0.18	0.16	0.15
7	***Км***	1.07	1.12	1.12	1.12	1.06
8	***Кз*** (Load Factor)	0.935	0.893	0.893	0.893	0.943
9	***σ***, kW	64.7	66.1	106.9	81.2	196.2

За коефициентите на използване и на търсене може да се каже, че са занижени, защото при тяхното изчисляване са използвани инсталираните активни номинални мощности на трансформаторите към всяко производство, поради липса на друга информация.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Като заключение за представените резултати може да се обобщи следното:

1. Изчислените показатели на товаровите графици могат да се използват при проектиране електроснабдителни системи на подобни обекти;

2. Показателите са за производство с актуални технологии и електрообзавеждане;

3. Товаровите графици могат да се използват при съставяне на прогнозни такива за заявки на количества електроенергия към търговците;

4. На базата на наличната информация е възможно да се правят допълнителни изследвания на товаровите графици на даденото предприятие.

ЛИТЕРАТУРА

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

[2] Willis H. Lee, *Power Distribution Planning Reference Book*, Marcel Dekker, 2004

[3] Flath C., D. Nikolay, T. Conte, C. van Dinther, L. Filipova-Neuman, *Cluster Analysis of Smart Metering Data*, Business & Information Systems Engineering, 1/2012. pp. 31-39

[4] Nęcka K., M. Trojanowska, *Criteria for Classification of Electricity Consumption Profiles on the Example of Rural Customers*, Agricultural University of Cracow, Logistyka 6/2014. pp. 244-249

[5] Willis H. L., T.D. Vismor, R.W. Powell, *Some Aspects of Sampling Load Curve Data on Distribution Systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, November 1985, pp.3221-3228.

[6] Short T., *Electric power distribution handbook*. CRC Press LLC. 2014

[7] Grattieri W., A. Demouselle, T. Dunne, H.R. Hagmann, J.M.H. Kevers, S. Lindskoug, H. Ottosson, J.F. Reynaud, *Electric Load Management in Industry*, Leonardo-Energy, January 1996

[8] Price P., *Methods for Analyzing Electric Load Shape and its Variability*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Publication number: CEC-XXX-2010-XXX, May 2010

Автор: Николай Стефанов Матанов, доцент д-р инж., кат. "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт" (ECEOET), Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. д-р Стоян Стоянов

ЗАСНЕМАНЕ НА ЕСТЕСТВЕНАТА ОСВЕТЕНОСТ В СГРАДИ

Вълчан Георгиев

Резюме: *Представена е система за изследване на естествената осветеност в сгради. Въпреки наличието на голям обем статистическа информация за метеорологични данни и слънчевото греене, остава открит въпросът за изменението на естествената осветеност в сградите, особено при промяна на сезоните и облачността. Представената електронна система е предназначена за събиране на реална информация за изменението на естествената осветеност в хоризонтална и вертикална плоскост, с цел установяване на зависимости при нейното оценяване и оптимално управление на изкуственото осветление.*
Ключови думи: *естествена осветеност*

REGISTRATION OF NATURAL ILLUMINANCE IN BUILDINGS

Vultchan Gueorgiev

Abstract: *A system for registration and study of natural illuminance is presented. Despite of presence of significant statistical information for sun radiation the problem for variation of natural illumination inside buildings stays open. Electronic acquisition system for natural illumination in horizontal and vertical plane is presented here. It is necessary for determining its variation and optimal control of internal lighting.*
Keywords: *natural illuminance*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Естествената светлина е предпочитано средство за осветяване на сградните помещения по много причини – психологически и икономически. Визуално разпределението на естествената светлина в дадено вътрешно пространство влияе не само върху видимостта, но и върху възприятието на дадено пространство. Разбира се не е възможно да се разчита само на естественото осветление, затова стои въпросът за оптимално управление на осветителните инсталации, така че да осигурят високо ниво на удобство при използване на прости и достъпни технически средства. За целта е необходимо да се познава разпределението на естествената осветеност, нейното изменение и възможните параметри за оценка на приноса на естествената светлина в общата осветеност на помещенията.

2. МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА И ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА НИВОТО НА ЕСТЕСТВЕНА ОСВЕТЕНОСТ

В европейския стандарт EN 12464-1 [1] са оказани минимални нива на хоризон-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

талната осветеност за различни типове помещения. Съществуват изследвания [2], [3] ,[4], според които в офисните помещения се предпочитат по-високи нива на осветеност от предписваните в стандарта. В същото време според [2], [5], в помещения с естествено осветление е приемлива по-голяма неравномерност на осветеността спрямо същите помещения, осветени само с изкуствено осветление. В момента изследванията показват, че съществува разнобой между предписваните в стандарта нива и предпочитанията на потребителите. Това поражда и дискусия за величините, с които да се оценяват качествените и количествени показатели на осветлението. Съществува предложение да се използва вертикална, а не хоризонтална осветеност като основен параметър за оценка на естествената осветеност [6], [7] ,[8], [9].
За оценка на приноса на естествената светлина в общата осветеност на помещението се използват няколко показателя:

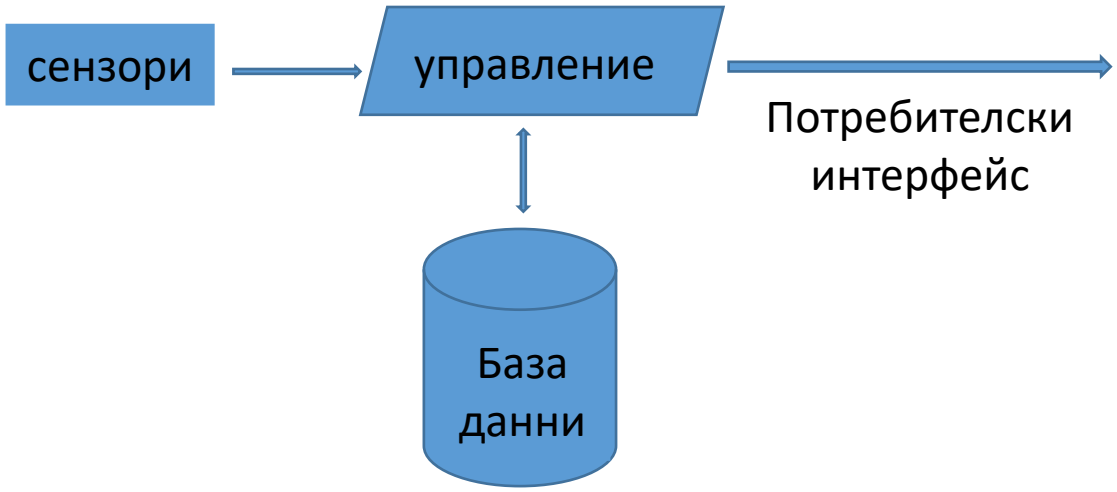
- Коефициент на естествената осветеност (КЕО);
- Автономност на естествената светлина (DA);
- Полезна естествена осветеност (UDI).

От горепосочените, КЕО е най-широко използван. 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 [10].
Като алтернатива на коефициента на естествена осветеност е възприето да се използват и базирани на климата измерватели за естествена осветеност - автономност на естествената светлина (DA) [11] и полезната естествена осветеност (UDI) [12]. Използването и на двата показателя не е общоприето и създава някои неудобства.
По тези причини е необходимо да се търси допълнителен критерий, който да позволи точно оценяване на приноса на дневната светлина в общата осветеност. Той трябва да осигурява достатъчна точност, за да позволи управление на изкуственото осветление. В [13] се предлага да се използва отношението на вертикалната към хоризонталната естествени осветености, тъй като това отношение варира значително по-слабо от КЕО при промяна на метеорологичните условия. Във всички случаи обаче са необходими допълнителни изследвания.

Използването на софтуер за симулации не решават проблема, тъй като той е базиран на някои от наличните бази данни за слънчевото греене и на заложени в софтуера изчислителни процедури, ползващи горепосочените класически показатели.

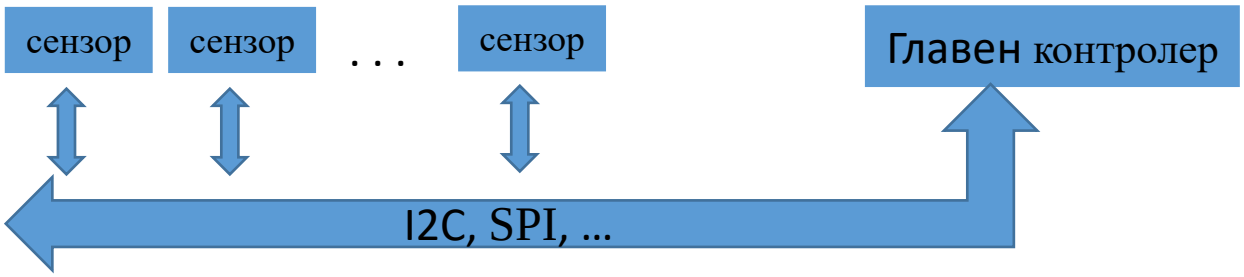
3. СИСТЕМА ЗА ЗАСНЕМАНЕ НА ЕСТЕСТВЕНАТА ОСВЕТЕНОСТ

Представената тук система е предназначена за събиране на статистическа информация за изменението на хоризонталната и вертикалната осветености в сградни помещения. Получената информация трябва да служи за синтезиране и верификация на допълнителни зависимости, оценяващи нивото на естествената осветеност и нейното изменение.
Целта е да се измерват в реално време осветеността в различни равнини и направления и в различни точки на помещението. Заснемането на стойностите на естествената осветеност трябва да бъде автоматично, да се осигури съхранение на данните в енергонезависима памет и достатъчно удобен интерфейс за тяхното прочитане - фиг.1.



Фиг.1. Структура на измервателната система

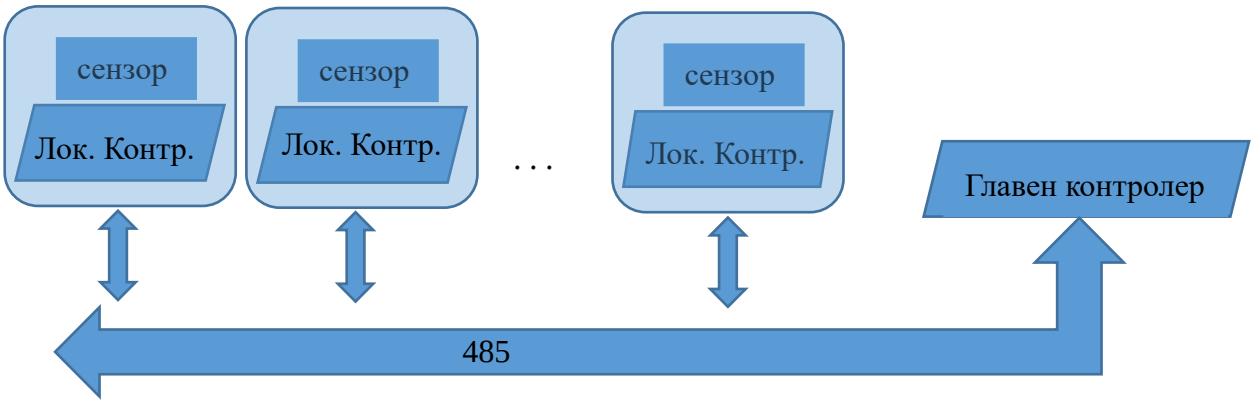
Основно внимание е необходимо да се обърне на управлението на сензорите. Спецификата на задачата изисква да се събират данни от множество сензори, резултатите от които да се съхраняват в обща база данни. При това положение са възможни два типа организация при връзка със сензорите



Фиг.2. Директна връзка със сензорите.

При първия вариант се осъществява директна връзка със сензорите по комуникационен протокол, определен от архитектурата на самия сензор. Изискването за минимална цена на такава система определя използването на сензори с общо

предназначение, които се произвеждат основно за управление на камери и яркост на дисплеи. Те осигуряват достатъчна точност и добра спектрална корекция. В същото време се предлагат с комуникационни интерфейси, предназначени за близка комуникация (в рамките на една платка или едно устройство). Опита за комуникация по относително дълги проводници води до много проблеми.



Фиг.3. Сензори, свързани към локални контролери.

При втория вариант сензорите се свързват към локални контролери, които осъществяват комуникация с тях в рамките на една платка. Събирането на данните от главния контролер става чрез комуникация с локалните контролери и позволява избор на подходящ протокол, който да гарантира необходимата надеждност.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализираната система позволява сканиране на нивата на осветеност в различни точки от сградните помещения и различни направления във вертикалната и хоризонтална плоскости. Всеки главен контролер позволява свързването на 8 сензора, като при това гарантира запис на стойностите на осветеността, измерени през 5 минутни интервали в продължение на три години.
Данните ще позволят точно оценяване на нивата на естествена осветеност, дори при промяна на метеорологичните условия и оптимално управление на изкуственото осветление.

ЛИТЕРАТУРА

[1] European Standard EN 12464-***1 Light and lighting – Lighting of work places – Part 1:*** Indoor work places, 2011

[2] Veitch, J.A., Newsham, G.R., ***Determinants of lighting quality 2: Research and recommendations,*** National Research Council of Canada, 1996

[3] 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

[4] 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
[5] 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
[6] 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
[7] 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
[8] Cuttle, C., ***Towards the third stage of the lighting profession,*** Lighting Research and Technology, Vol. 49, No. 1, 2010, p. 73-93
[9] Heschong, L, Roberts, J.E., ***Linking daylight and views to the reduction of sick building syndrome***, Proceedings of Healthy Buildings 2009, paper 797
[10] Петринска И, Д. Иванов, ***Методи за оценка на количествените и качествените показатели на дневната естествена светлина,*** Годишник на ТУ-София, том 66, книга 1, 2016, стр.201-210
[11] 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
[12] Nabil, A., Mardaljevic, J., ***Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors***, Energy and Buldings, Vol. 38, No. 7, 2006, p. 905-913

Автор: Вълчан Георгиев, доц., д-р инж., кат. ЕСЕОЕТ, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vulchy@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. д-р Захари Иванов

ОПТИМИЗИРАНЕ НА РЕЖИМА НА РАБОТА НА ВЪТРЕШНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ, С ОТЧИТАНЕ НА ЕСТЕСТВЕНАТА ОСВЕТЕНОСТ

Вълчан Георгиев

Резюме: *Представена е алгоритъм за управление на работата на изкуственото осветление с отчитане в реално време на изкуствената осветеност. Оптималност на управлението се търси с минимизиране на консумацията на електроенергия при известно разпределение на естествената осветеност. При това, управлението на осветителите е двупозиционно -0 и 100%.*
Ключови думи: *естествена осветеност, оптимално управление*

OPTIMIZATION OF INTERNAL LIGHTING INSTALATION REGIME ACCORDING TO NATURAL ILLUMINANCE

Vultchan Gueorgiev

Abstract: *An algorithm for control of the working regime of artificial lighting is presented. It takes into account the level of natural illuminance in real time. The optimal control guaranties minimization of energy consumption for given distribution of natural illuminance.*
Keywords: *natural illuminance, optimal lighting control*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Сградното енергопотребление представлява около 40% от консумираната в Европейския съюз електроенергия [2]. От тази енергия, 15 % се потребяват за осветление [1], [2]. Това означава сериозен потенциал за намаляване на консумацията на електроенергия. Изключително силна в момента е кампанията за подмяна на класическите източници на светлина със светодиодни такива, като една от целите на тази замяна е именно по-високата енергийна ефективност [3], [4].

Замяната на класическите източници и осветители изисква твърде високи капиталови разходи и не винаги е оправдана. Особено сериозен е проблема с живота на светодиодните осветители. Дори изключителни привърженици на този тип осветление признават проблемите с осигуряване на рекламирания живот на източниците [6].

Независимо от типа на светлинните източници, ефективното управление на осветителната уредба остава важен елемент при повишаване на ефективността.

Основна пречка пред масовото използване на силно автоматизирани системи за осветление, при които е налице индивидуално управление и димиране на всеки

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

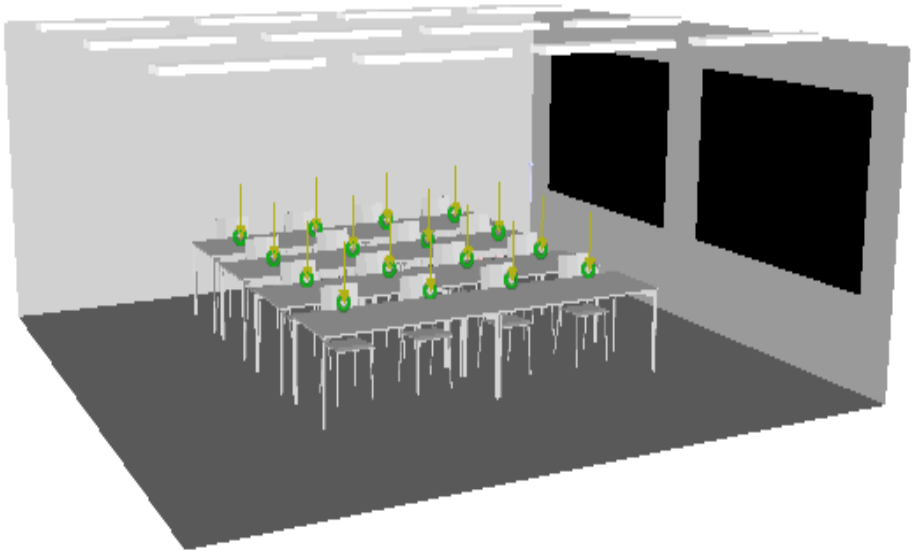
осветител е отново изключително високата цена на такава уредба. В същото време изключително интелигентно управление може да се постигне с прости и евтини технически средства.

Представеният тук алгоритъм предполага управление на изкуственото осветление според нивата на естествената осветеност, отчитани в реално време. Осветителите не се димират, но могат да бъдат индивидуално включени или изключени от системата за управление по всяко време.

2. ТЕСТОВО ПОМЕЩЕНИЕ

За симулиране на работата на алгоритъма е използвано правоъгълно тестово помещение с площ 30 m2. Помещението е осветено с 12 осветителя (използвани са осветители с луминесцентни лампи T5, но вида на източниците няма отношение към описвания алгоритъм).

Върху работните повърхности са дефинирани 12 работни точки, в които се изчислява общата осветеност (фиг.1).



Фиг.1. Скица на тестовото помещение

Нивата на естествената осветеност, т.е. делът падащ се на слънчевата светлина, навлизаща през прозорците, е оценена чрез симулация в Диалукс. Програмният продукт позволява да се симулират различни варианти – с различно ниво на естествената осветеност.

3. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

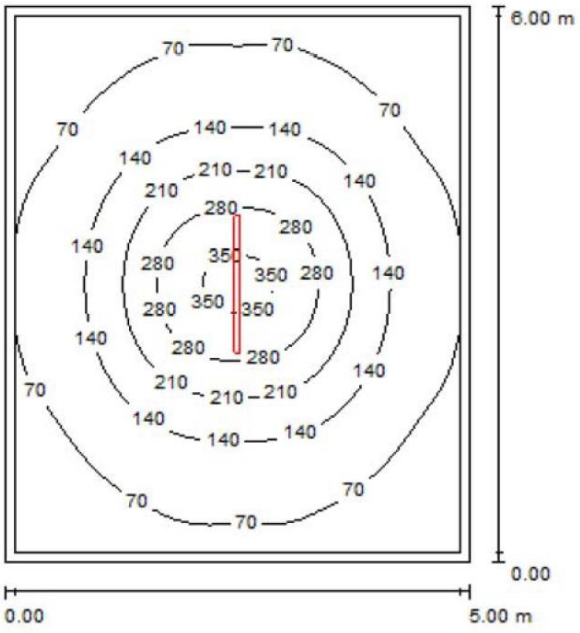
Целта е да се получи оптимално управление на осветлението в зависимост от нивата на естествена осветеност. При това не се използва управление на осветителите по редове, а всеки от тях може да бъде включен на пълна мощност или изключен индивидуално. Търси се алгоритъм за управление, който да гарантира получаването най-малко на нормената осветеност на всяко работно място, т.е. във всяка контролна точка. Общата осветеност се определя като сума от естествената осветеност и тази, получена от работата на осветителната уредба.

При тази постановка, задачата за минимизиране на консумацията на енергия се свежда до минимизиране на броя на включените осветители.

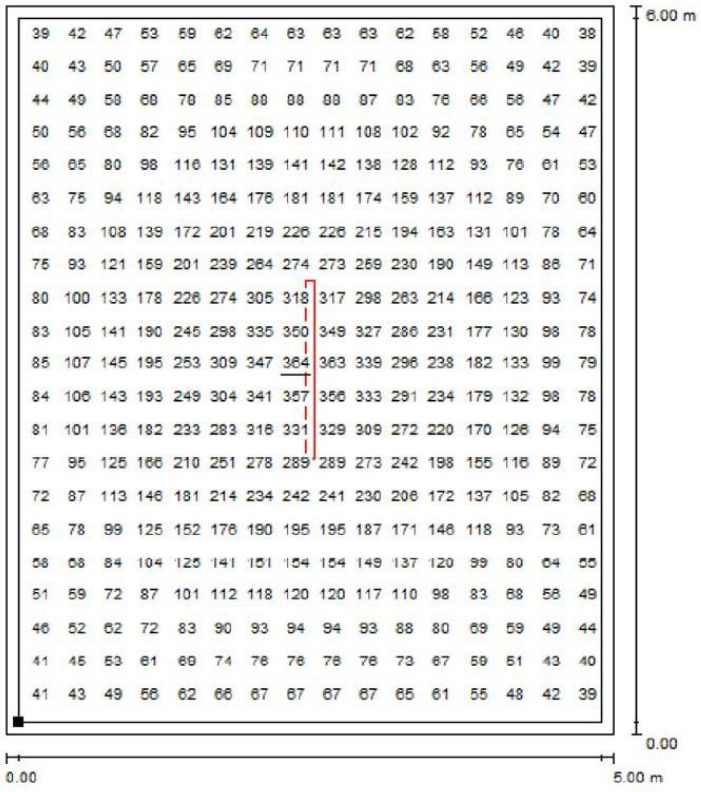
Очевидно директният силов подход към този проблем е неподходящ за реализиране в реално време – необходимо е да се изчисли разпределението на осветеността при различен брой и различно разпределение на включените осветители и от всички възможни варианти да се подбере оптималния. Тази задача трябва да се решава непрекъснато – при всяка промяна на нивото на естествената осветеност.

4. АЛГОРИТЪМ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Предварително в софтуер за светлотехнически изчисления се определя осветеността в контролните точки, изчислена при работа само на един осветител. Получава се матрица, която тук ще бъде наричана лукс-матрица, в която са изчислени осветеностите в контролните точки дължащи се на работата само на един осветител. За всеки от дванадесетте осветителя в тестовото помещение се получава лукс-матрица.



Изолуксни линии при работа само на един осветител от помещението



Лукс матрица за конкретния осветител

Контролните точки могат да се подберат, така че да съвпадат с предписваната от стандарта изчислителна мрежа, използвана при определяне на нормените показатели на вътрешна осветителна уредба – средна осветеност и равномерност.

Това е удобство, тъй като задачата за определяне на нормените параметри на осветителната уредба вече се свежда до събиране на матрици. Това е и основ-

ната идея на разисквания алгоритъм. Определянето на средната осветеност за дадена светлинна сцена, т.е. за даден набор от включени осветители става лесно и бързо чрез суперпозиция на техните лукс-матрици.

Аналогична лукс-матрица се съставя и за естествената осветеност. По информация за слънчевото греене, лукс-матрицата за слънчевото греене се умножава по коефициент, отчитащ промененото (или актуалното) ниво на естествената осветеност. Последната също участва в суперпоцизията, определяща текущото ниво на осветеност за дадения момент и конкретна светлинна сцена.

Тъй като управлението на осветителите е двупозиционно, т.е. те са или включени или изключени, на всеки осветител може да се съпостави един информационен бит. Когато съответният бит е „1“- осветителят е включен, а състояние „0“ отговаря на изключен осветител.

Обединяването на информационните битове за всеки от дванадесетте осветителя от тестовото помещение определя едно 12 битово число, което кодира еднозначно всяка една възможна светлинна сцена. Всички възможни светлинни сцени са $2^{12} = 1024$.

Задачата за оптимално управление се решава, чрез последователно обхождане на числата от 0 до 1024, като се има предвид, че двоичния запис на всяко 12-битово число кодира определена светлинна сцена. За всеки текущ вариант се определя осветеността чрез събиране на лукс-матриците на работещите осветители и матрицата на естествената осветеност.

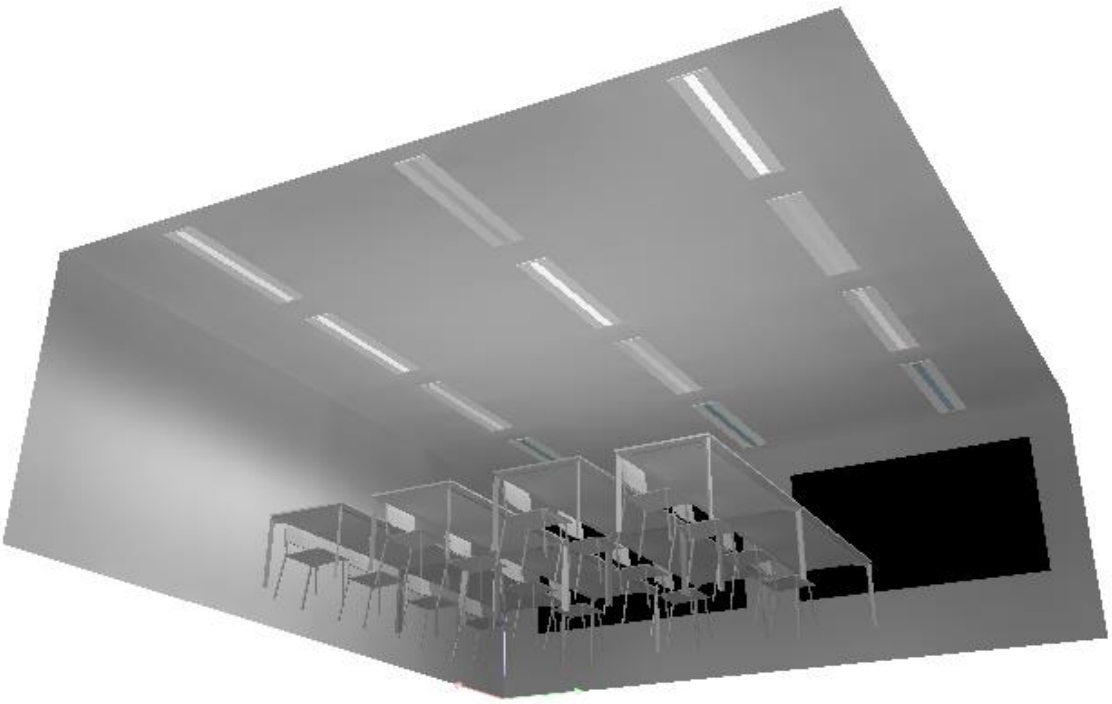
Когато числовия код на светлинните сцени се обхожда във възходящ ред от 0 нагоре, първият вариант, удовлетворяващ предварително зададените критерии – средна осветеност и допустима неравномерност е и оптимален. Точно при първият вариант ще работят минимален брой осветители и при това ще са удовлетворяват ограниченията, каквито се явяват нормените осветеност и неравномерност.

Тъй като тук става въпрос за управление на осветителна уредба, въпросът за заслепяването се приема за решен по време на нейното проектиране.

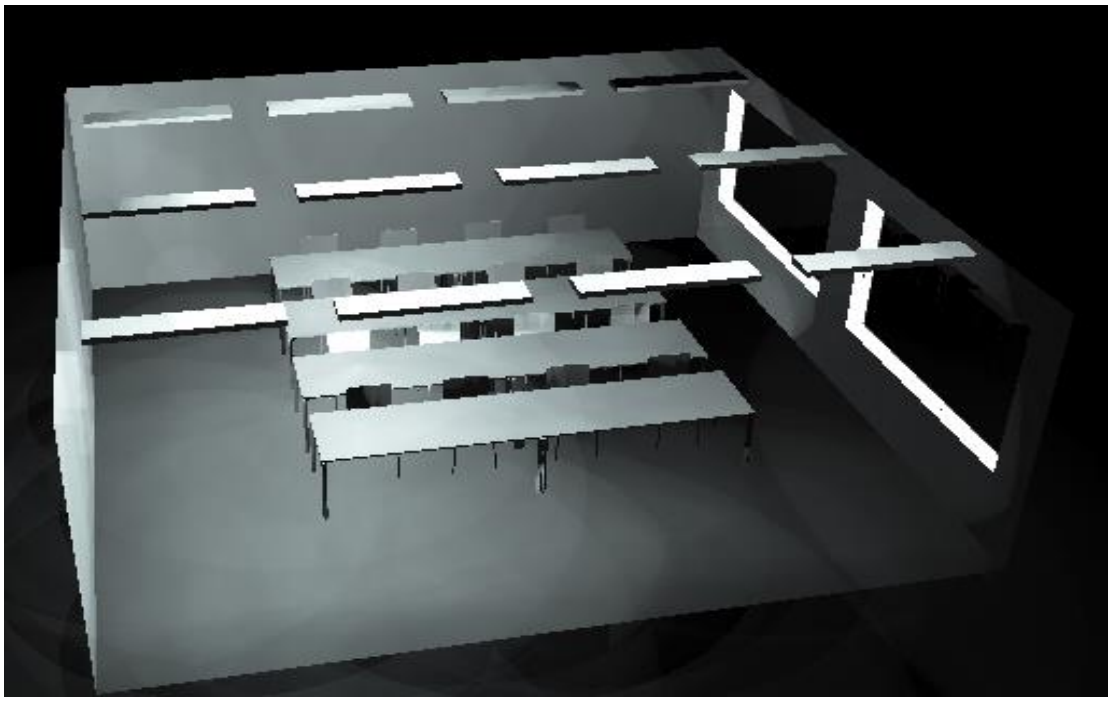
Алгоритъма е тестван в Матлаб, а резултатната осветеност, получена от оптималния вариант, както и нивата на естествена осветеност са симулирания в Диалукс.

За конкретно ниво на естествената осветеност алгоритъма избира оптимална светлинна сцена. След това в Диалукс са направени проверочни изчисления за това дали тази конкретна сцена удовлетворява нормените светлотехнически показатели.

Извадка от резултатите е показана на фиг.2 и фиг.3. Както се вижда, оптималната светлинна сцена се различава от простото управление по редове.



Фиг.2. Оптимална светлинна сцена, получена при конкретно ниво на естествената осветеност. Работят само осветители 1,2,6 и 9.



Фиг.3. Принос на осветителната инсталация към общата осветеност от оптималната светлинна сцена, показана на фиг.2.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дискутираният алгоритъм позволява използването на нископроизводителни и евтини микропроцесорни системи да управляват вътрешните осветителни уредби с минимални разходи на енергия, при отчитане на нивата на естествената осветеност в реално време.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Gifford WR et all, ***Residential lighting end-use consumption study – estimation framework and initial estimate***, December 2012, DNV KEMA Energy and Sustainability Pacific Northwest National Laboratory

[2] Bertoldi, P., Atanasiu, B., 2006. ***Residential Lighting Consumption and Saving Potential in the Enlarged EU***. Proceedings of EDAL'06 Conference, London, UK

[3]Stravoravdis S, ***Lighting offices with leds: a study on retrofitting solutions***, A PhD thesis Welsh School of Architecture 2013.

[4] Fleischer, S., Krueger, H., Schierz, C., ***A Study on LED Retrofit Solutions for Low-Voltage Halogen Cycle Lamps***, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 48, Issue: 5, Sept.-Oct. 2012

[5] Beresini J, ***LED Linear Retrofit Solutions and Advanced Lighting Control Systems for Small Commercial Retail Applications***, California Lighting Technology Center, June 9, 2015

[6] ***Test Report – Clear, Non-Directional LED Lamps***, A test report prepared for the European Commission and the Consultation Forum on the performance of clear LED lamps in the European Market in the third quarter of 2014 (http://www.coolproducts.eu/)

[7] Petrinska I, H. Toepfer, ***Optimizing lighting energy savings in public buildings through genetic algorithm,*** Proceedings of the Technical University - Sofia, Vol. 60, book 2, 2010, pp. 110-120

Автор: Вълчан Георгиев, доц., д-р инж., кат. ЕСЕОЕТ, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vulchy@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. д-р Захари Иванов

ТЕХНИКО-ИКОНОМИЧЕСКА ОБОСНОВКА ЗА ИЗБОР НА ЕНЕРГО-ЕФЕКТИВНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ТЪРГОВСКИ ОБЕКТИ

Ива Петринска, Дилян Иванов, Милко Йовчев

Резюме: *Въпреки, че идеята за захранване на осветителни уредби от фотоволтаични панели (PV) съществува отдавна, тя не е добила популярност за захранване на вътрешни осветителни уредби, поради високата първоначална инвестиция на фотоволтаиците и относително малката им ефективност. Друг проблем при използването на фотоволтаични панели за захранване на вътрешни осветителни уредби е преобразуването на постоянния ток, генериран от PV модулите в променлив, необходим за захранване на конвенционални светлинни източници. Бързото развитие на светодиодните технологии прави идеята за вътрешни осветителни уредби с PV захранване обещаваща, особено за осветление на безпрозоречни сгради. Алтернатива за ефективно осветление са световодните системи или оберлихт, но за тях е необходимо да се направи комплексна оценка на ефективността, поради значителната инфрачервена компонента на естествената светлина, която води до натоварване на климатичните инсталации. Публикацията разглежда възможностите за осигуряване на енергийно ефективно осветление на безпрозоречни търговски сгради и дава икономическа оценка на съществуващите варианти за изпълнението му*
Ключови думи: *PV захранване, LED осветителни уредби; световодно осветление, енергийна ефективност.*

ECONOMIC APPRAISAL FOR ENERGY EFFICIENT CHOICE OF LIGHTING FOR TRADE CENTERS

Iva Petrinska, Dilyan Ivanov, Milko Yovchev

Abstract: *Although the idea for PV powered lighting systems has existed for quite a long time, is has not become popular especially for indoor applications. This is due to the high initial investment of such systems and the low efficiency of the PVs. Another problem is the efficient transformation of the direct current generated by the PV modules into alternating current, necessary for powering the indoor lighting installations. In the last few years the idea for PV powered LED lighting becomes promising, especially for windowless premises, because of the fast development of the LEDs as light sources. Alternatives to this lighting decision is the use of light guides using the natural light as light source or implementation of skylights. A complex estimation and economical appraisal of all the above mentioned alternative decisions for lighting of windowless premises are the subjects of the current paper.*
Keywords: *PV powered LED lighting, light guides, lighting of windowless premises*

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Икономията на електрическа енергия за изкуствено осветление в сгради без прозоречни площи е належащ и важен проблем. За решаването му се използват модерни технологии.

Фотоволтаичните (PV) клетки преобразуват слънчевата радиация в постояннотокова електрическа енергия, която може да бъде използвана за захранване на различни уреди. Осветлението е потенциален консуматор на така генерираната електрическа енергия. Някои примери за осветителни уредби, захранвани от фотоволтаици са декоративните паркови осветители, преносими пътни знаци и осветители в отдалечени райони, работещи автономно. Такива осветителни уредби, обаче не се използват широко, поради високата първоначална инвестиция, ниската ефективност на системата и ненадеждността им. Една от причините за ниската ефективност на системите е, че произведената от фотоволтаичните клетки постояннотокова енергия трябва да бъде преобразувана в променливотокова с помощта на инвертор, за да може да бъде захранен светлинният източник. Това се налага, тъй като повечето светлинни източници, работещи на постоянен ток имат много ниска ефективност. С развитието на светодиодните технологии, обаче тези факти се променят. Понастоящем съществуват светодиодни осветители за вътрешно осветление с ефективност над 160 lm/W [1], което прави използването им с фотоволтаично захранване потенциално решение за безпрозоречни търговски сгради.

Целта на настоящата публикация е да се анализират компонентите на система за вътрешно осветление с PV захранване, да се направи оценка на ефективността на подобна система за осветление на търговски халета без прозорци и да се оцени икономически подобно решение в сравнение с алтернативните варианти с директно използване на естествената светлина с помощта на светловодни системи или оберлихт.

Типичните компоненти на PV система, използвана за захранване на осветителни уредби са: PV панели, батерия, електрическа мрежа, инвертори, постояннотоков регулатор на тока, светлинен източник и осветител. В зависимост от използвания светлинен източник и конкретното приложение, системната конфигурация може да се състои само от някои от тези елементи.

Съществуват три основни типа системна конфигурация за осветителни уредби с PV. Те са: автономна система, свързана към електрическата мрежа система и хибридна система. Автономни системи се използват най-вече за пътни маркировки и знаци, за осветление на паркинги и отдалечени райони. Те обикновено се нуждаят от батерии, които обуславят големи загуби и високи експлоатационни разходи. Свързаните към електрическата мрежа системи не изискват батерии, а използват директно енергия от мрежата, когато произвежданата от фотоволтаиците такава е недостатъчна. В зависимост от вида на товара е необходим преобразувател или променливотоков център, за да се съгласуват потоците на мощност - произведената от PV панелите такава и тази, която се консумира от

мрежата. Понякога е възможно и захранване на мрежата от фотоволтаиците, което се прави в случай, че PV панелите генерират повече от необходимата енергия. Хибридните системи представляват комбинация от елементи за производство и съхранение на енергия с цел да се удовлетворят енергийните нужди на разглежданите приложения – такава система е например свързана в мрежата система с резервиране от батерия. Тези системи са сложни и скъпи, но са по-надеждни.

Според литературни данни ефективността на PV клетките от GaInP/GaAs/Ge/Si имат ефективност до 28,8% [2]. Типичната ефективност на преобразуване на PV модулите, налични на пазара е 16 %. Ефективността на батериите е около 80% [3], драйверите за светодиоди са с ефективност до 90%, регулатор на ток за светодиоди има ефективност от 85%, а dc-ac инвертора има ефективност от 80%. Ефективността на светодиоден осветител е от порядъка на 90%, около 80% е на осветител с луминесцентни лампи и 70% за такъв с компактни луминесцентни лампи. Ефективността на променливотоковия център на товара е около 90%.

Алтернативен вариант на система за осветление на тази със светодиоди, захранвани от фотоволтаици е светловодната такава. Светловодните системи служат за осветяване с естествена дневна светлина на безпрозоречни сгради. Техният принцип на действие се базира на възможността за транспортиране на светлината отвън до отдалечени вътрешни пространства посредством многократни отражения от отражателната вътрешна повърхност на светловодите. Предимството на тези осветителни системи се основава на възможността за динамично дневно осветление на вътрешността на сгради без прозорци и същевременно намаляване на консумацията на електрическа енергия за осветление. Типична светловодна система се състои от прозрачни куполи на покрива на сградата, тръбни отвори с висока отражателна способност и разсейвател, монтиран на тавана на помещението, който се използва за постигане на равномерно разпределение на естествената светлина в него. Изследването на разпределението и нивото на осветеност и ефективността на тръбни световодни системи е обект на множество изследвания и модели [4]. Препоръчителните размери на тръбните световоди са: диаметър – между 0,3 и 0,7м и дължина до 5 м. Предимство на този вид системи за осветление са, че те транспортират естествена светлина в помещения без прозорци и могат да осигурят относително равномерно разпределение на осветеността. Недостатък на този тип осветителни уредби е невъзможността за естествена вентилация и значителният топлинен товар, който се получава посредством тях през летните месеци и голямата първоначална инвестиция, необходима за изграждането им. Въпреки това системите за осветление с използване на кухи световоди са предпочитани в сравнение с оберлихта. Предимствата на последния са осигуряването на висок светлинен интензитет и възможност за естествена вентилация, както и добрата равномерност при коректното им оразмеряване и ориентиране. Недостатъка им е, че могат да допринесат за получаване на ефекта заслепяване през слънчевите летни месеци, а също и това, че са причина за огромен топлинен товар и не могат да осигурят транспортиране на светлината до отдалечени части от сградата.

Ефективното използване на тръбни световодни системи в сгради зависи от много фактори като оптични свойства на монтирания на покрива купол на светловода и разсейвателя в помещението, високият коефициент на отражение на вътрешната повърхност на световода и неговите размери. Този тип системи за осветление са най-ефективни през летните месеци, що се отнася до светлина, и най-малко ефективни по същото време, когато се говори за излишна топлинна енергия, която внасят във вътрешността на сградите. Тези системи е необходимо да бъдат съоръжени с допълнителни светлинни източници, които да допълват осветеността до нормената, когато не е налична достатъчна естествена светлина. Друг проблем на световодните системи е голямата първоначална инвестиция, необходима за тях и съответно дългият срок на откупуване. Основното им предимство спрямо система за осветление с LED, захранвани от PV е подобряването на визуалния комфорт в сградите и възможността за динамично дневно осветление на интериора им. Слънчевата светлина е естествен източник на енергия, който до този момент не може да намери алтернативно изкуствено осветление.

2. ИКОНОМИЧЕСКА ОБОСНОВКА ЗА ИЗБОР НА ЕНЕРГИЙНО ЕФЕКТИВНА ОСВЕТИТЕЛНА УРЕДБА

Ефективността на свързана в електрическата мрежа хибридна фотоволтаична система за захранване на светодиодни осветители, която генерира постояннотокова енергия с променливотокова (от мрежата) и постояннотокова входяща мощност може да се оцени експериментално. Когато генерираната от фотоволтаиците електрическа енергия е недостатъчна за захранване на осветителната уредба, се консумира енергия от електрическата мрежа.

През деня, количеството на слънчевата радиация, която достига до PV панелите се променя значително, с което се променя и постояннотоковата мощност генерирана от тях. Когато тази мощност е недостатъчна за задоволяване на нуждите на осветителната уредба, е необходимо да се черпи допълнителна мощност от електрическата система, за да се поддържа необходимото ниво на осветеност.

3. ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА НА ОСВЕТИТЕЛНАТА УРЕДБА

За икономическа оценка на трите разглеждани варианта на осветителна уредба на търговски обект е използван методът LCC (Life cycle cost) [5]. При този метод се отчитат всички категории разходи, включително първоначалните и променливите разходи - за изготвяне на проект, закупуване на оборудване, окабеляване, инсталиране на системи за управление и труд за инсталиране на уредбата (първоначални разходи), както и замяна на изгорели осветители, почистване, енергия, подмяна на баласти, лещи, оптични системи (променливи разходи).

Обикновено само инсталационните разходи биват оценявани. Енергийните разходи се оказват най-големите такива по време на живота на осветителните уредби.

Първоначални разходи – това са инвестиционните вложения, които могат да бъдат превърнати в годишни разходи посредством формулата:

$$C_I = I \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (1)$$

където C_I са разходи за възвръщане на първоначалната инвестиция, Евро

I е първоначалната инвестиция, Евро;

i е лихвен процент (i=p/100, p е лихвен процент в проценти);

n брой години (живот на осветителната уредба).

Променливи разходи – това са разходите за поддръжка и експлоатация на осветителната уредба. Експлоатационните разходи включват разходи за енергия и подмяна на оборудване. Разходите за поддръжка включват разходи за почистване и ремонт на осветителната уредба.

Енергийни разходи C_e - този тип разходи се изчислява посредством умножение на общата мощност на осветителната уредба с годишната й използваемост в часове и цената на електрическата енергия.

$$C_e = n_{lu} c_e t P 10^{-5} \quad (2)$$

където C_e са разходите за енергия, евро;

n_{lu} брой осветители;

c_e цена на електрическата енергия за един kWh;

t годишна използваемост на осветителната уредба в часове;

P мощност на осветителя, лампата и баласта, W;

Разходи за лампи $C_{Lл}$

Годишните разходи за лампи се изчисляват посредством умножаване на цената на лампата по коефициента, получен посредством отношение на часовете работа на лампите за година и живота им. t/t_{LL}:

$$C_L = n_L c_L (t / t_{LL})(1+k) \quad (3)$$

където C_L са годишните разходи за лампи, евро;

n_L са броя лампи;

c_L е цената на една лампа, евро;

t – часове на работа;

t_{LL} – живот на лампата;

к – коефициент на изгорелите лампи до планова групова подмяна, %;

Разходи за групова подмяна на лампите $C_{G.}$

Ако лампите подлежат на групова подмяна, периода за подмяната им се базира на изчисление на времето, за което осветеността ще намалее с 30% поради повреди и намаляване на светлинния поток на лампите.

$$C_G = n_L c_G / T \quad (4)$$

където C_G е цената на годишна групова подмяна;

n_L са броя лампи;

c_G е цената на подмяна на една лампа, евро;

T – период на групова подмяна, години;

Разходи за поддръжка.

Тези разходи са за почистване и ремонт на осветителите , почистване и боядисване на повърхностите в помещенията. Те са силно зависими от обстоятелствата:

$$C_C = n_L(c_C + c_m)/t_C \quad (5)$$

където C_C са годишни разходи за поддръжка, евро;

n_L са броя лампи;

c_C е цената на подмяна на една лампа, евро;

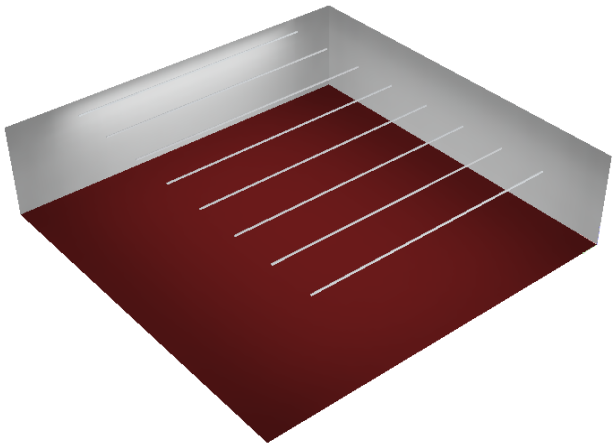
c_m са материални разходи за почистване на една лампа, евро;

t_C – период на почистване в години;

c_C е цената на подмяна на една лампа, евро.

4. КОНФИГУРАЦИЯ НА РАЗГЛЕЖДАНИЯ ТЪРГОВСКИ ОБЕКТ И ОЦЕНКА НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ОСВЕТИТЕЛНАТА МУ УРЕДБА

В конкретния случай се разглеждат светодиодни осветители. Животът им е определен като 50 000 часа, като годишната им използваемост е 5110 часа – всеки ден от годината по 14 часа т.е. грубо 10 години. Лихвеният процент е 10%. Изискваното ниво на осветеност е 1000lx. Размерите на помещението са 20x20м2 = 400 м2, MF = 0.67, t=5110ч, избраните осветители са 32 броя, PHILIPS LL120X 1xLED150S/865 [8] със светлинен поток 16000lm, светлинен добив 120lm/W и цена 313,54 EUR.



Фиг.1 Изглед отгоре на разглежданото помещение с осветителна уредба изпълнена с LED осветители.

Според простите изчисления, без разходи за поддръжка и подмяна на осветителите при 32 осветителя, общият светлинен поток на системата е 480klm, инсталираната мощност 3,968kW, специфичен товар 9,92 W/m² = 1.18 W/m²/100 lx.

Приети са разходи за инсталация на системата 100 € на осветител, енергийната консумация 21400 kWh/год. Според тази енергийна консумация се избира и фотоволтаична система за захранване на осветлението. Предвидени са PV модули на фирма SHARP модел ND-RC255, чиято максимална отдавана мощност при стандартни тестови условия (STC: интензитет на глобалната (обща) слънчевата радиация 1000W/m^2, коефициент на въздушната маса AM 1,5 температура на PV

клетките 25°C) е 255Wp [6]. В действителност модулите работят при по-ниска мощност в условия, различни от стандартните. Приема се наличие на заоблачавания и по-висока температура върху PV клетките и мощността се намалява на 187W (вече без „пик“). Това се взема под внимание при определяне броя на PV модулите. Единичната цена на модул е 205,55 EUR с ДДС. Гаранция от фирмата – 2 години, а от производителя – 10 години. Избраните фотоволтаични модули са изработени от поликристален силиций с обща ефективност на модула 15,5%.

Размерите на един PV модул са L0,99m x H1,66m с тегло 20 kg. Избрани са 24 броя PV модули, модел ND-RC255, които да работят в паралел по две групи с 12 броя на група. Условието за работа в паралел е фотоволтаичните модули да са от един и същ тип и с еднакви технически характеристики, което тук е спазено. Обща стойност за 24-те модули е 4933,2 EUR.
Избраните LED осветители на PHILIPS обаче имат входно напрежение 22-240V при честота 50Hz, което налага закупуване на синусоидални инвертори (или един с голяма мощност), които да преобразуват входната постояннотокова мощност в променливотокова на изходна със синусоидално напрежение 230V/50Hz, което осигурява работата на LED осветителите без използване на електрическата мрежа.

Завишеният брой на PV модулите отчита, че мощността отдавана от тях ще е по-ниска от 255Wp, но достатъчна за работата на осветителните тела при по-неблагоприятни радиационни и температурни условия. Освен това се отчита и обстоятелството, че инверторите нямат 100% ефективност, което води до допълнително повишаване на броя на модулите, т.е. на разполагаемата мощност. При избора на параметри на синусоидални инвертори е необходимо да се отчита максималната мощност, която модулите могат да отдават (при STC). При две групи с 12 броя PV модули се получава 3000Wp на група. Втората група има същият брой и същата мощност – 3000Wp. Като се вземат в предвид размерите на всеки модул и монтирането им на покрива на сградата с отчитане на необходимо отстояние един от друг за да не се засенчват, необходимата площ за монтирането им е 168m2, което е възможно в предвид общата площ 400m^2.

Избрани са 2 броя синусоидални инвертори на фирма Victron Phoenix, модел C24V/3000VA, пълна синусоида. Техническите им характеристики са [7]:

-максимална активна мощност: 3000W – при околна температура от 25°C (ще се намират на закрито);

-номинална активна мощност при 40°C – 1200W;

-изходна честота: 50Hz с отклонение 0,1%;

-ефективна стойност на изходното синусоидално напрежение: 230V с изменение ±2%;

-КПД на инвертора: 94%;

-максимално входно напрежение на инвертора: 19V ÷ 33V (съгласно характеристиките на избраните PVмодули, работещи в паралел – при точката с максимална мощност UMPP=30,4V, иначе е по-ниско, при напрежение на празен ход – Uoc=37,6V, са предвидени блокинг-диоди).

Сценарий „неблагоприятни радиационни условия“: Въпреки, че синусоидалните инвертори се оразмеряват за максималната мощност на модулите [Wp], в действителност отдаваната е по-ниска.

Ако се приеме слънчева радиация до 800W/m2 и по-висока от стандартната температура на клетките – например 40°C, то изходната мощност на всяка от двете групи да бъде по-ниска: 12 броя * 187W = 2244W. За изходната мощност на синусоидалния инвертор с отчитане на неговото КПД 94% се получава: 2244W * 0,94 = 2109,36W. Общо за двете групи паралелно свързани PV модули (2*12 броя – общо 24 броя) се получава 2 * 2109,36W = 4218,7W, която е по-висока от необходимата 3968W за LED осветителите в търговското помещение.

Цената на единичен инвертор е 1351,37 EUR без ДДС или общо за двата синусоидални инвертора: 2 броя*1351,37=2702,74 EUR.

Общата инвестиция от закупуването на 24-те PV модула и 2-та инвертора възлиза на 7635,94 EUR.

Предвидени са още 2000 EUR за закупуване на проводници, закрепваща арматура и допълнителни защити - арестори против атмосферни пренапрежения и др.

Разходите за изграждане на системата са приети 10000 EUR. Разходите за електрическа енергия за захранване на осветлението се приемат за 0, тъй като тя ще се произвежда от автономната PV система. Разходи за подмяна на лампите и поддръжка също не се предвиждат при 10 годишен живот на системата. При тези условия са изчислени разходите за възвръщане на инвестицията CI, които възлизат на 238 519 €.

$$C_I = I \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{5}$$

За алтернативен вариант е избран този със световоди. Осветителната уредба може да бъде изпълнена с 64 световода, като цената на един световод и необходимите му аксесоари е 600 €, а инсталационните разходи за всеки световод са минимум 700 €. Продължителността на живота на тези съоръжения е 25 години средно. Тогава разходите за възвръщане на инвестицията CI за подобна система възлизат на 832 000 €.

Осигуряването на осветеност от 1000lx с подобна система целогодишно е невъзможно, затова е необходимо да се предвиди допълнително изкуствено осветление, което оскъпява системата.

Друг вариант е изпълнение на осветлението с оберлихт на покривното пространство, но в този случай инфрачервената компонента през топлите месеци от годината е значителна, което води до натоварване на климатичната инсталация. С цел избягване на заслепяването е необходимо да се предвидят сложни засенчващи устройства и съответни системи за управление. Поради тези трудности такъв вариант не е разгледан.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въпреки предимствата на дневното осветление като естествен светлинен източник, използването на световодни системи за осветление на безпрозоречни търговски сгради е все още икономически неоправдано. Изграждането на светодиодни уредби, захранвани от фотоволтаици, обаче е добро решение, поради използването на слънчевата радиация и високо ефективни и икономични светлинни източници. За по-реалистично сравнение на вариантите за осветление на безпрозоречни търговски обекти е необходимо провеждане на експериментални изследвания по отношение на работата и необходимата поддръжка на двата типа осветителни уредби, заложени в настоящия доклад.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикуваните резултати са свързани с работа по проект ДУНК-01/3/2009.

ЛИТЕРАТУРА

[1] http://www.cree.com/

[2] “Reporting Solar Cell Efficiencies in Solar Energy Materials and Solar Cells,” Solar Energy Materials & Solar Cells, Elsevier Science, 2008

[3] R.-J. Wai, W.-H. Wang and C.-Y. Lin, “High-Performance Stand-Alone Photovoltaic Generation System,” Proceedings of IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 1, January 2008.

[4] J. Light-pipes for Daylight Penetration Indoors, X Zhang, Proceedings of Renewable Energy for Housing Conference, The UK Solar Energy Society, 20 October 2000, Perth

[5] U.S. Department of Energy, DOE G 413.3-21, Cost Estimating Guide, US Department of Energy, Washington D.C., DOE G 413.3-21, May 9, 2011.

[6] http://www.sharp.co.uk/

[7] https://www.victronenergy.com/inverters

[8] http://www.lighting.philips.com/

Автор: Ива Чавдарова Петринска, гл. ас. д-р, кат. "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *ipetrinska@tu-sofia.bg ;* Дилян Иванов, ас. маг. инж., кат. "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *dianivanov@tu-sofia.bg ;* Милко Йовчев, маг. инж., докторант, катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане", Факултет „Електротехника и електроника“, Технически Университет–Габрово, E-mail address: *milkoyovchev1986@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: д-р Димитър Павлов

СПЕЦИФИКА ПРИ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАСЛЕПЯВАЩОТО ДЕЙСТВИЕ НА СВЕТОДИОДНИ ОФИС ОСВЕТИТЕЛИ

Ива Петринска, Дилян Иванов

Резюме: *Светодиодните осветители за вътрешно осветление са актуално предизвикателство, поставено пред специалистите по светотехника в световен мащаб. Оценката на заслепяването, причинявано от осветители със светодиоди е належащ проблем, продиктуван от спецификата им като светлинни източници. То се причинява от висока яркост или големи яркостни разлики в зрителното поле на наблюдателите. Съществуват установени системи и методики за оценка на заслепяването като Unified Glare Rating* (*UGR*) (*EN12464-1 2002*), *Visual Comfort Probability* (*VCP*) (*IESNA 2000*), *British Glare Rating system* (*CIBSE 1997*), *които обаче трябва да бъдат анализирани и модифицирани, за да бъдат валидни за светодиодно осветление. Проблемите, които възникват при определяне на заслепяването при използване на светодиодни осветители са свързани с определянето на точния размер на източника на заслепяване и яркостта на фона непосредствено до него. За да се определи влиянието на светещата структура на източника на заслепяване върху субективната оценка на този показател и с цел изследването му при осветители с комплексна форма е необходим нов подход за оценка на този качествен показател, обект на настоящия доклад.*

Ключови думи: *заслепяване, LED- осветители, светоразпределение*

GLARE ESTIMATION METHODS OF LED OFFICE LUMINAIRES

Iva Petrinska, Dilyan Ivanov

Abstract: *The LED luminaires for indoor lighting are contemporary challenge for researchers and producers. Estimation of glare produced by LED luminaires is not straightforward, because of their specificity as light sources. The LEDs have high brightness and the LED luminaires may produce great differences of the luminance in the visual field of the occupants. Different methods for glare estimation exist like Unified Glare Rating* (*UGR*) (*EN12464-1 2002*), *Visual Comfort Probability* (*VCP*) (*IESNA 2000*), *British Glare Rating system* (*CIBSE 1997*), *but in order to apply them for LED luminaires they have to be modified. The exact size of the light source and the luminance of its surroundings have to be refined when LED luminaires are estimated. In order to decide the influence of the light emitting surface of the luminaire on the subjective estimation of glare, a new approach has to be considered, which is subject of the current paper is.*

Keywords: *Glare, LED light sources, light distribution*

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Заслепяването се дефинира като състояние на зрението, при което се получава дискомфорт или понижаване на възможността да се различават детайли или обекти, което се получава при неподходящо разпределение или ниво на яркост или големи контрасти [1 CIE Vacabulary]. Друго определение за заслепяване е "усещане, което се генерира от яркост в зрителното поле на наблюдателите, значително по-голяма от адаптационната яркост, която причинява раздразнение, дискомфорт или загуба на видимост и възможност за различаване на обекти. В общото понятие „заслепяване" се включват два отделни механизма, които го причиняват – физиологично заслепяване - което възпрепятства остротата на зрението, без непременно да води до усещане за дискомфорт и психологично заслепяване което води до визуален дискомфорт, без задължително да намалява видимостта на обектите.

Направени са множество опити за определяне на причините за поява на дискомфорт, но все още не е определена точно психологичната причина в човешкия организъм, която го провокира. Въпреки това на базата на многобройни проучвания е установено, че за появата му оказват влияние яркостта на светлинния източник, яркостта на обкръжението, размера на светлинния източник, както и относителното му разположение в зрителното поле на наблюдателя. С увеличаване на яркостта на светлинния източник, чувството за дискомфорт се увеличава, докато при увеличаване на яркостта на обкръжението – намалява. С увеличаване размерите на източника на заслепяване, чувството за дискомфорт се увеличава дотогава, докато самият източник значително повлияе яркостта на околното обкръжение, което намалява дискомфорта. С увеличаване на ъгъла между фиксираните зрителни оси и източника на заслепяване, последното намалява. Въпреки, че тези показатели са приети като основни при оценка на дискомфорта, съществуват няколко различни система за оценката му. Освен това различните модели за оценка на дискомфортното заслепяване са различни когато става въпрос за множество източници и единствен такъв, както и когато самият източник се възприема като допринасящ или не за яркостта на околната среда.

Освен разнообразието от методи за определяне на заслепяването във вътрешни осветителни уредби съществува и голямо разнообразие на светлинни източници, използвани за изпълнението им. С бурното развитие на светодиодите и обещаващите им параметри, водещи до значителна икономия на електрическа енергия за осветление възниква и въпроса дали съществуващите фотометрични и колориметрични методи за определяне на количествената и качествена страна на светлината са в сила и за този, различен от гледна точка механизъм на генериране на лъчения във видимата част светлинен източник. Особено значение има и въпросът дали системите за оценка на заслепяването за вътрешни осветителни уредби са най-точни при оценка на светодиодно осветление, при положение че те са базирани на осветителни уредби, изпълнени с луминесцентни лампи или нажежаеми такива в стандартни интериорни пространства. Проблемите, които възникват при определяне на заслепяването при използване на све-

тодиодни осветители са свързани с определянето на точния размер на източника на заслепяване и яркостта на фона непосредствено до него. Тъй като светодиодните светлинни източници обикновено са с размер по-малък от 0.0003 sr, осветителите за вътрешно осветление с LED не могат да бъдат оценени по отношение на заслепяването, което предизвикват, с показателя UGR или поне не с точната му дефиниция. Необходимо е да се обърне внимание и да се доуточни коя площ ще се възприеме като светеща и как точно да се определи позиционния фактор, който фигурира в израза за UGR, както и в тези за VCP, GLS и BGI.

2. МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА НА ЗАСЛЕПЯВАНЕТО ВЪВ ВЪТРЕШНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ

Съществуват четири основни метода за оценка на дискомфортното заслепяване във вътрешни осветителни уредби , които са се наложили в практиката – VCP (Visual Comfort Probability), UGR (Unified Glare System), BGI (The British Glare Index) и GLS (Glare Limiting System).

VCP – основното уравнение, което се използва при оценка на заслепяването по метода е:

$$M = \frac{0.5 L_S Q}{P F_v^{0.44}} \quad (1)$$

където L_s е яркостта на източника на заслепяване (cd/m^2)

$$Q = 20.4\ \Omega_S + 1.52\ \Omega_S^{0.2} - 0.075$$

Ω_S – пространствен ъгъл под който се наблюдава източника от наблюдателя (sr)

F_v – средна яркост на зрителното поле включително тази на източника (cd/m^2)

P – позиционен фактор на източника на заслепяване в зависимост от посоката на зрителната ос, който се определя за всеки осветител, попадащ в зрителното поле до 53 ˚над хоризонталата на зрителната ос. Лекиш и Гът на базата на експериментални изследвания са установили следната емпирична зависимост за изчислително определяне на P:

$$P = \exp\left[\begin{array}{l}\left(35.2 - 0.31899\alpha - 1.22e^{-2\alpha/9}\right)10^{-3}\beta + \\ (21 + 0.26667\alpha - 0.002963\alpha^2)10^{-5}\beta^2\end{array}\right] \quad (2)$$

където: α е ъгълът между вертикалата от равнината, в която се намира източника и зрителната ос (°), а β е ъгълът между зрителната ос и линията, свързваща окото на наблюдателя и източника.

В случай, че в зрителното поле са разположени множество източници на заслепяване първо се изчислява Discomfort Glare Rating (DGR), след което се прави трансформация във VCP както е показано по-долу:

$$DGR = \left(\sum_{i=1}^{n} M_i\right)^a \quad (3)$$

където M е заслепяването от единствен източник (1); $a = n^{-0.0914}$;

n – брой заслепяващи източници в полето на наблюдение.

След определяне на DGR, VCP се определя таблично или изчислява по зависимостта:

$$VCP = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{6374 - 1.3227 \ln DGR} e^{-t^2/2} dt \quad (4)$$

Колкото по-висока е стойността на VCP, толкова повече хора възприемат заслепяването от осветителната уредба като приемливо. За офис помещения IESNA препоръчва стойности на VCP по-големи от 80.

3. BGI - ТОЗИ МЕТОД СЕ БАЗИРА НА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХОПКИНСЪН [3]

За определяне степента на усещането за дискомфорт се използват четири семантични скали – непоносим, предизвикващ дискомфорт, приемлив, почти незабележим. Основното уравнение за определяне на BGI в случай на единствен източник на дискомфорт е:

$$g = \frac{0.9 L_s^{1.6} \omega_s^{0.8}}{L_b p^{1.6}} \quad (5)$$

където L_S е яркостта на източника на заслепяване (cd/m^2)

ω_S е пространствен ъгъл под който се наблюдава източника (sr)

L_b е средна яркост на обкръжението без източника на светлина (cd/m^2)

P е позиционен индекс на източника на заслепяване по отношение на зрителната ос, който се определя таблично в зависимост от геометрията на взаимното разположение на наблюдателя и източника на заслепяване (Лекиш и Гът) и валиден за източници, разположение до 62°градуса над линията на погледа на наблюдателя (CIBSE 1985).

Когато се отчита заслепяващото действие на множество източници се използва формулата:

$$GI = 10 \log_{10}[0.5(\sum g)] \quad (6)$$

където g се определя по (5).

Колкото по-големи са стойностите на GI, g, толкова по-голям дискомфорт предизвиква осветителната уредба, която се изследва. Граничните стойности на този показател са подобни на тези, които се нормират при UGR метода, като за офис помещения границата е 19.

4. GLS - БАЗИРА СЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕ НА DeBoer (1958)

Той смята, че сумирането на заслепяващото действие на отделните източници на светлина е некоректно. Според него оценката на заслепяването трябва да се основава на субективна оценка на цялата осветителна уредба. При тази система за оценка на заслепяването няма математически апарат за оценка, а само препоръчителни гранични стойности на яркост. Тя има ограничено приложение.

5. UGR - МЕТОДИКА, СЪЗДАДЕНА ОТ CIE

Основната формула за изчисляване на заслепяването е:

$$UGR = 8 \log_{10}\left[\frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2}\right] \quad (7)$$

където: L_b - яркост на обкръжението (cd/m^2);

L – яркост на светещата част(и) на всеки осветител по посока на очите на наблюдателя (cd/m^2) ;

ω – пространствен ъгъл под който се вижда светещата част(и) на осветi-

теля от наблюдателя (sr);

p – позиционен индекс на Гът за всеки осветител (взаимно разположение на наблюдателя и осветителя).

При този метод яркостта на обкръжението се изчислява, като се изключва яркостта на самия светлинен източник:

$$L_b = \frac{E_i}{\pi} \tag{8}$$

Яркостта на източника на заслепяване се определя както следва:

$$L = \frac{I}{A_p} \tag{9}$$

където I е интензитетът на светлината на осветителя по посока на наблюдателя (cd);

A_p е площта на проекцията на осветителя, m^2.

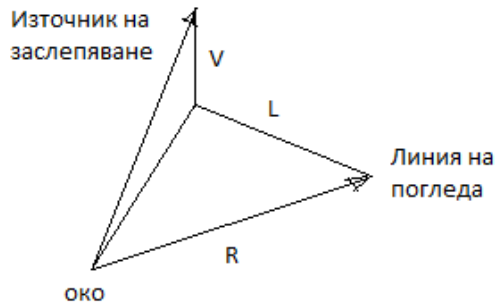
Пространственият ъгъл ω се определя по зависимостта:

$$\omega = \frac{A_p}{r^2} \tag{10}$$

където A_p е проекцията на светещата част от осветителя, m^2;

r – разстояние от наблюдателя до центъра на светещата част на осветителя, m.

Позиционният фактор се определя посредством интерполация от таблица [4] в зависимост от стойностите на отношенията V/R и L/R, където R, L и V са съответно разстояние проектирано на линията на погледа, хоризонтално странично отстояние от линията на погледа и височина над линията на погледа фиг.1.



Фиг.1. Геометрия за определяне на позиционния индекс.

Стойностите на UGR варират между 10 и 30, като по–високите стойности обуславят по-голям дискомфорт. UGR е създаден така, че да отговаря на интервална скала – разликите между съседните стойности на показателя да отговарят на еднакво възприемани психологични въздействия.

През 2002 г. [6] е предложена модификация на UGR метода за оценка на заслепяването, според която в зависимост от площта на проекцията на светлинния източник (а не от ъгловия размер), осветителите, предизвикващи дискомфорт се разделят на малки, нормални и големи. Формула (7) остава валидна за осветители с проекция на светещата площ между 0.005m^2 и 1.5 m^2. За осветители с по–малки размери използването на тази формула води до завишаване на реалния дискомфорт, а за осветители с по-големи размери – съответно до занижаването му.

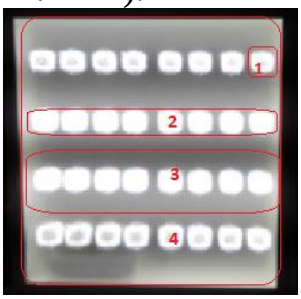
За малки източници на заслепяване е въведена модификация на зависимостта (7):

$$UGR = 8\log_{10}\left[\frac{0.25}{L_b}\sum 200\frac{I^2}{r^2 p^2}\right] \tag{11}$$

6. ИЗЧИСЛИТЕЛНО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАСЛЕПЯВАНЕТО ОТ СВЕТОДИОДНИ ОФИС ОСВЕТИТЕЛИ

Основно влияние при определяне на заслепяването от светодиодни офис осветители имат няколко фактора - светоразпределението на осветителите, спектъра на излъчване на светодиодите, позиционният фактор и светещата площ, която трябва да бъде използвана при изчислението. Най-доброто светоразпределение за офис помещения – батуинг се постига при светодиодните осветители като се използва специална първична и вторична оптика на светодиодите и осветителите, което води до значителни загуби и намалява ефективността от използване на светодиоите като светлинен източник. По отношение на колориметрията и определянето на спектъра на излъчване на светодиодите се провеждат редица проучвания, които не са обект на настоящия доклад, тъй като все още въпросите са спорни. По отношение на позиционния индекс, определен от Лекиш и Гът – стойностите му са определени при използване на светлинни източници с равномерно разпределение на яркостта, кръгова геометрия и постоянен спектър на излъчване [4]. При голяма част от светодиодните осветители гореспоменатите параметри са различни. При тях по-скоро се търси подобие със съществуващите луминесцентни осветители по отношение на външния вид и светлинен поток. За постигане на тази цел в осветители с форма и размери, подобни на луминесцентните такива се влагат мощни светодиоди или матрици от такива, като се добавят различни по вид разсейватели и отражатели без да се държи сметка за разпределението на яркостта по повърхността на осветителя. Въпреки, че са правени изследвания по отношение на позиционния фактор за матрични светлинни източници, не е достигнато до окончателно и еднозначно решение за нови стойности на този показател, затова все още в изчислителните подходи се използват стойностите определени през 1949г.

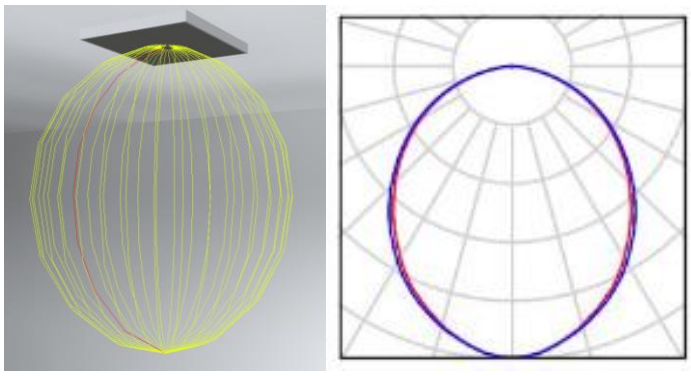
Другият основен фактор, който оказва съществено влияние върху степента на дискомфорта, предизвикван от офис осветители със светодиоди е коя точно площ трябва да се възприеме като светеща площ на осветителя – тази на единичен светодиод или матрица (фиг.2 - 1) от светодиоди, тази на светещата линия от светодиоди (фиг.2 - 2), тази на светещата линия и обкръжението ѝ (фиг.2 - 3) или тази на целия осветител (фиг. 2 - 4).



Фиг.2 Светеща площ на светодиоден осветител: 1-единична матрица от светодиоди; 2-светеща светодиодна линия, състояща се от 8 матрици; 3- светеща светодиодна линия, състояща се от 8 матрици и обкръжението ѝ; 4- площ на целия осветител.

В настоящото изследване е изследван светодиоден осветител с размери 600х600мм, размер на единична матрица от светодиоди 40ммх40мм, размери на светещата линия 40х540мм, размери на светещата линия и околността ѝ –

120x600мм. Осветителят е с корелирана цветна температура Tcr =4000K и светлинен поток 4000lm. Светоразпределението на осветителя е косинусно, а оптичната му система се състои от първична оптика и призматичен разсейвател (фиг. 3).



Фиг. 3. Светоразпределение на разглеждания светодиоден осветител

За разглеждания светодиоден осветител по изчислителен път са определени стойностите на VCP, BGI, UGR в зависимост при използване на определените на фиг.2. светещи площи. Освен това е направена и субективна оценка на заслепяването по скалата на Хопкинсън, като за целта е направен експеримент с 20 участника – 16 мъже и 4 жени с нормално зрение. Получените по изчислителен път стойности за показателите на дискомфортно заслепяване са дадени в табл.1. В табл.2 са систематизирани резултатите от субективното възприятие на осветителна уредба, изпълнена с разглеждания осветител.

Таблица 1

Резултати от изчислителното определяне на дискомфорта при използване на различни методи и възприемане на различна площ на светещата повърхност

Светеща част от осветителя според фиг.2	Площ, m^2	I, cd	L, cd/m^2	VCP	BGI	UGR изч.	UGR според EN 12464-1/2011
1	32x0.0016	32x45.14	32x28212.5	37.5	36.1	26.6 у-е (7) 23.4 у-е (11)	19
2	8x0.024	8x361.1	4x16409	43.25	27.62	24.4	19
3	8x0.072	8x361.1	4x5015.28	56.4	23.9	20.6	19
4	0.36	1444.5	4012.5	61.9	20	19.8	19

Таблица 2

Субективна оценка на заслепяването по скалата на Хопкинсън, предизвиквано от осветителна уредба, изпълнена с разглеждания осветител

Субективна оценка на осветлението	**Брой участници в експеримента дали оценката**
С незабележим дискомфорт	1
С приемлив дискомфорт	8
Дискомфортно	9
Предизвикващо непоносим дискомфорт	2

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати от изчислителното определяне на дискомфорта, причиняван от светодиодни офис осветители по съществуващите методи показват еднозначно, че е възможно постигане на препоръчваните стойности на показателя на дискомфорт, само ако той се оценява за цялата повърхност на осветителя. Това, обаче не е коректно, тъй като изследвания тъй като светлинните източници не излъчват еднороден светлинен поток във всички направления и се открояват като ярки светещи петна. Според резултатите от проведения експеримент за субективна оценка на дискомфорта подобен тип светодиодни офис осветители болшинството участници възприемат осветлението като дискомфортно. Въпреки многобройните изследвания за определяне на заслепяването и дискомфорта, причинявани от светодиодни осветители за вътрешно осветление, все още не е намерена единна мярка за оценката на този показател. Необходимо е да се намери такава, като се обърне особено внимание на хомогенността на светещата повърхност на осветителите и светоразпределението им.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикуваните резултати са свързани с работа по проект ДУНК-01/3/2009.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ILV: International Lighting Vocabulary Standard CIE S 017/E:2011

[2] IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) 2000. The IESNA Lighting Handbook, 9th ed. New York: IESNA

[3] CIBSE 1997. CIBSE Code for interior lighting 1994: Additions and corrections 1997. ISBN 0 900953 64 0

[4] Luckiesh M., S. Guth, Brightness in the visual field at the borderline between comfort and discomfort (BCD) Illum. Eng., 44, 650-670

[5] De Boer J., Performance and comfort in the presence of veiling reflections, Lighting Res. Technology, 9, 169-176, 1977

[6] CIE 147:2002 Glare from small, large and complex sources

[7] Василев Хр. В. Георгиев, Г. Ганчев, ДИФУЗЕН СВЕТОДИОДЕН ОСВЕТИТЕЛ, Международна научна конференция УНИТЕХ, Габрово, 20-21 ноември, 2009 г, стр. I-87 – I-92

Автор: Ива Чавдарова Петринска, гл. ас. д-р, кат. "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *ipetrinska@tu-sofia.bg ;* Дилян Иванов, ас. маг. инж., кат. "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *dianivanov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: д-р Петър Димитър Павлов

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАСЛЕПЯВАНЕТО ПРИ ДНЕВНО ЕСТЕСТВЕНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ПОМЕЩЕНИЯ В ОБЩЕСТВЕНИ СГРАДИ

Дилян Иванов

Резюме: *Естествената светлина е неизчерпаем и сигурен светлинен източник, осигуряващ едновременно комфорт и енергийна ефективност. Основните предимства на слънчевата светлина за обитателите на помещения в обществени сгради са от една страна нейното физиологично и психологично действие, а от друга възможността за икономия на електрическа енергия за осветление. Високи стойности на осветеността, създадени от естествената светлина, обаче, могат да допринесат за появата на заслепяване (дефинира се като чувство, което се проявява под въздействието на яркост в зрителното поле, многократно надвишаваща тази, на която е адаптиран зрителният анализатор на човека и която причинява раздразнение, дискомфорт или загуба на видимост и невъзможност за извършване на зрителната задача). Като последствие психологичните и физиологични предимства на дневното осветление значително намаляват. В настоящата публикация е направено сравнение на различните методи за оценка на заслепяването от естествена светлина. Направено е и експериментално изследване на геометричните и фотометрични параметри на помещенията, които оказват влияние върху заслепяването, което може да се прояви при дневно естествено осветление.*
Ключови думи: *Дискомфорт, отблясъци, дневна светлина*

DAYLIGHT GLARE ESTIMATION IN PUBLIC BUILDINGS

Dilyan Ivanov

Abstract: *The natural daylighting is an everlasting light source, the use of which assures simultaneously comfort and energy efficiency. The main advantages of the daylighting for the building occupants are both its positive psychological and physiological influence and the opportunity for lighting energy savings. High indoor illuminance values, however may lead to glare effects, which can decrease significantly the positive influence of daylight on the occupants. The current publication gives some figures about the glare from daylight that can occur in typical indoor situation in the summer, whenever daylight is abundant.*
Keywords: *discomfort glare, disability glare, daylight*

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Наличието на светлинни отвори със значителна площ в обществени сгради води до увеличаване на количеството проникваща естествена светлина и има положителен ефект по отношение на енергийната ефективност и икономия на електрическа енергия и едновременно с това до повишаване на навлизащото в помещенията инфрачервено лъчение и зрителен дискомфорт. Заслепяването, което се определя като ефект на намаляване на контраста във зрителното поле при наличие на ярки светлинни източници е обект на обширни научни изследвания с различен обхват и може да бъде количествено оценено посредством няколко индекса.

Широко използван показател за оценка на заслепяването от естествена светлина е Daylight Glare Index (DGI), предложен от Хопкинсън през 1970[1]. Оценката на DGI е сложна, поради факта, че е необходимо едновременно оценяване на геометричните параметри на разглежданите помещения като пространствен ъгъл и позиционен индекс в зависимост от положението на наблюдателя и фотометричните такива – яркостни нива, възприемани от зрителния анализатор, за кратък период от време поради динамичната промяна на естественото осветление. Освен това е възможно подразделение на източника на естествено осветление на отделни елементи, но такова подразделение и определянето на яркостта им оказва влияние върху крайната оценка на заслепяването [2]. DGI се базира на формулата на Корнел, разработена за определяне на дискомфорта от източници на изкуствена светлина със значителни размери [3]. По-късно е разработен по-опростен модел, според който [4]:

$$DGI = 10log\sum_{i=1}^{n} G_i \quad (1)$$

където:

$$G_i = 0.478\left(\frac{L_s^{1.6}\Omega_i^{0.8}}{L_b+(0.07\omega^{0.5}L_w)}\right) \quad (2)$$

В зависимостите (1) и (2) L_s е яркостта на всички части на източника, cd/m^2; L_b е средната яркост на повърхностите, попадащи в зрителното поле, cd/m^2, L_w е претеглената средна яркост на прозореца като функция на относителната площ на небето, обструкциите и земята, които се виждат, cd/m^2, ω е пространствен ъгъл под който се вижда прозореца, sr, Ω е пространствен ъгъл на източника в зависимост от посоката на зрителната ос и позиционния фактор, sr. Оценката на заслепяването по този показател става според табл.1:

Оценка на заслепяването посредством показателя DGI **Таблица 1**

Субективна оценка	DGI
Неосезаемо заслепяване	<18
Осезаемо заслепяване	18-24
Смущаващо заслепяване	24-31
Нетърпимо заслепяване	>31

Най-съвременният показател за оценка на заслепяването от естествено осветление е Daylight Glare Probability (DGP) [5]. Във връзка с този показател са напра-

вени редица изследвания, повечето от които симулационни с цел получаване на модел на зрителното поле. Изчислителен анализ на показателя DGP и негови опростени варианти [6] анализиращи влиянието на вертикалната осветеност и контраста върху заслепяването показват, че е необходимо допълнително изследване на контраста, особено при ниски нива на осветеност. Въпреки необходимостта от допълнителни изследвания този метод е най-точен при оценка на заслепяването от дневната естествена светлина.

$$DGP = 5{,}87.10^{-5} E_v + 9{,}18.10^{-2}.log\left(1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{L_{s,i}^2 \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} + P_{s,i}^2}\right) + 0.16 \qquad (3)$$

където E_v е вертикална осветеност на нивото на окото, lx; L_{si} е яркост на източника, cd/m^2, ω_s – пространствен ъгъл, под който се вижда източника; p_{si}, позиционен индекс

Оценка на заслепяването посредством показателя DGP (Wienold and Christofferson, 2006) **Таблица 2**

Субективна оценка	DGP
Неосезаемо заслепяване	<0.35
Осезаемо заслепяване	0.35-0.4
Смущаващо заслепяване	0.4-0.45
Нетърпимо заслепяване	>0.45

Зависимостта (3) е съставена от три члена. Третия е константа, затова няма да бъде анализиран. Втория член има форма подобна на тази, която използват другите методи за оценка на заслепяването. Първия член в (3) е този, който отличава разглеждания метод за оценка на заслепяването от другите такива представлява произведение на вертикалната осветеност с константа. Това означава, че високите нива на осветеността в помещенията са причина за дискомфорт, дори и при липса на ярък светлинен източник в зрителното поле т.е. ако приравним вторият член (3) на нула, то при вертикална осветеност по-голяма от 4100lx DGP индекса ще е над 0.4 и ще има смущаващо физиологично заслепяване. Друг недостатък на метода е, че индексът DGP не е дефиниран за нива на вертикална осветеност под E_v < 320lx. За тези нива на осветеност в [7] е предложено получените стойности за DGP да се умножават с корекционен коефициент, който има вида:

$$DGP_{Ev<320} = DGP \frac{e^{0.024Ev-4}}{1-e^{0.024Ev-4}} \qquad (4)$$

Съществуват и други методи за оценка на заслепяването от дневна естествена светлина, които само ще бъдат споменати в настоящата публикация. Такива са PGSV (Predicted Glare Sensation Vote) [8], при който е предложена формула за оценка на заслепяването от естествена светлина, базирана на резултатите от експеримент със симулирани прозорци за 120 тестови условия, в който са взели участие над 200 тестови обекта. Възприеманата степен на дискомфорт е представена посредством показателя GSV (Glare Sensation Vote), даван от тестовите обекти по многофакторна скала:

$$GSV = \frac{(DGI - 16)}{4} \qquad (5)$$

$$PGSV = 3.2log_{10}L_{wp} - 0.64log_{10}\omega + (0.79log_{10}\omega - 0.61)log_{10}L_b - 0.82 \quad (6)$$

$$L_b = \left(\frac{E_v/\pi - L_{wp}\Phi_w}{1-\Phi_w}\right) \quad (7)$$

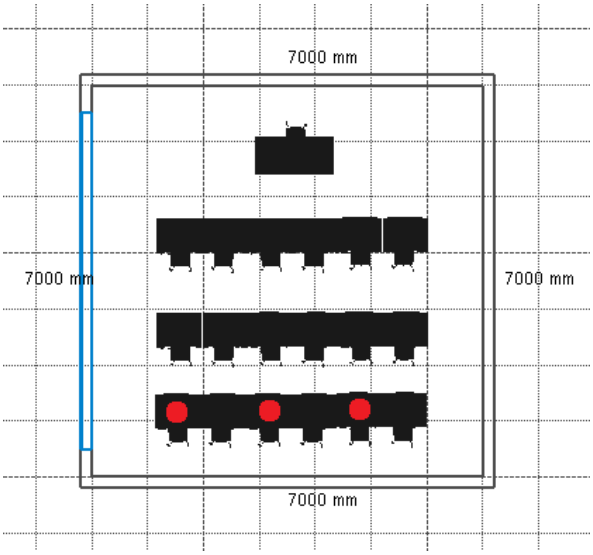
Вертикална осветеност E_v на нивото на окото, lx; L_{wp} е яркостта на видимата част от прозореца, lx, [cd/m^2]; ω е пространствен ъгъл под който се вижда прозореца, sr; Φ_w е конфигурационен фактор на прозореца.

Други методи са J – Index [9], който дефинира условията на оптимален визуален комфорт; SVR (Stationary Virtual Reality), базирана на компютърни симулации с цел да се предложат еквивалентни тестови условия на всички тестови обекти [10]; VCEM (Visual Comfort Evaluation Method), валиден за дефиниране степента на дискомфорт в условия на естествено осветление [11]; DGI_N, зависещ от яркостта на прозореца; адаптационната яркост и яркостта навън, които са корелирани посредством уравнението [12]:

$$DGI_N = 8log_{10}\left\{0.25\left[\frac{\sum L_{ex}^2\Omega_N}{L_{adapt}+0.07(\sum L_{window}\omega_N)^{0.5}}\right]\right\} \quad (8)$$

2. ГЕОМЕТРИЯ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ПОМЕЩЕНИЕ

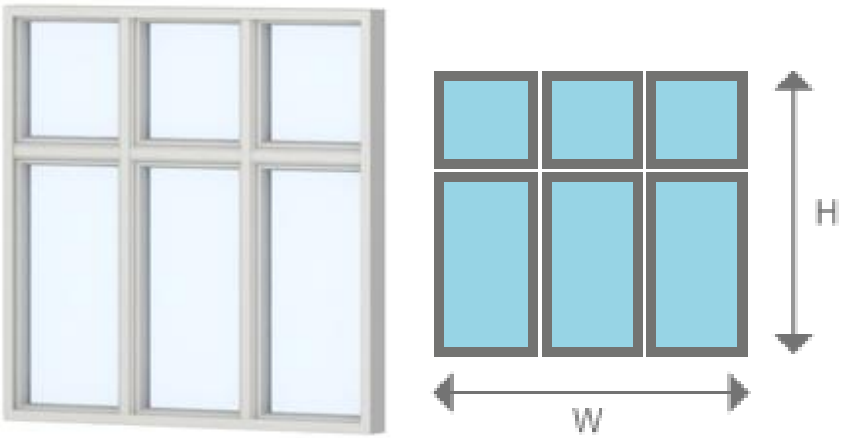
За оценка на заслепяването е използвано помещение с габаритни размери 7 на 7 м и височина 2,8м (фиг.1). В помещението са разположени 3 реда учебни маси и едно работно място за преподавателя, разположено насрещно. Таванът на помещението е бял, матово боядисан с коефициент на отражение 0,84. Подът е със светло кафяви плочки и коефициент на отражение 0,617. Стените са светло жълти, матово боядисани с коефициент на отражение 0,686.



Фиг.1. Геометрия на изследваното помещение

Работните места, за които е определено заслепяването от дневната естествена светлина са маркирани с червено на фиг.1. Те са разположени на най- задния ред, от където при насочване на зрителната ос към учебната дъска, в зрителното поле ще попада най- голяма част от прозоречната площ.

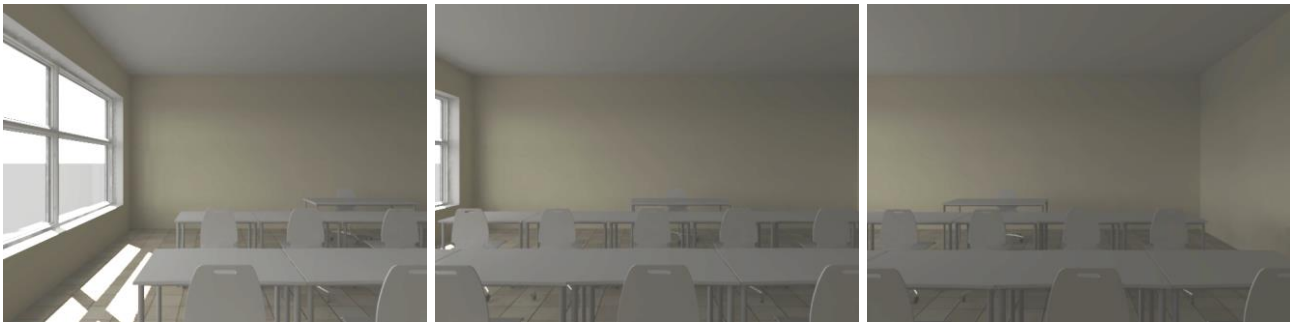
Прозорците в помещението се състоят от две части горна и долна, с обща височина H=1,8м и ширина W=6м. фиг.2.



Фиг.2. Геометрия на прозорците в изследваното помещение.

3. ИЗЧИСЛИТЕЛНА ПРОЦЕДУРА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАСЛЕПЯВАНЕТО ОТ ЕСТЕСТВЕНА СВЕТЛИНА В РАЗГЛЕЖДАНОТО ПОМЕЩЕНИЕ

За определяне на яркостите в помещението е използван софтуер „VELUX Daylight Visualizer“. За определяне на стойностите на вертикалната осветеност в разглежданото помещение са използвани експериментални данни, получени от автоматична система за измерване на хоризонтална и вертикална осветеност на отбелязаните на фиг.1 работни места. Автоматични системи за измерване на осветеността със същата конфигурация са използвани за определяне на заслепяването на помещения с географска ориентация на изток, запад, север и юг. Помещенията, в които са разположени измервателните системи за посока север, юг и изток са с различна големина, но с цел съпоставимост на резултатите и поради еднаквата конфигурация на измерване на вертикалната и хоризонтална осветеност са приети с размери равни на тези на западното помещение. Използваният софтуер съдържа база данни за промяната на естествената осветеност навън за района на град София. Изчисленията за определяне на заслепяването от дневната светлина са направени за слънчев ден през месеца, в който яркостта на небосвода е най- голяма - Август. Използван е стандартен наблюдател с височина на зрителната ос 1,2м от нивото на пода. На фиг.3 е показан симулационен модел на зрителната задача за трите работни места, за които са извършени изчисленията. На фиг.4 са показани симулираните яркости, които влизат в зрителното поле. С червено са изобразени най- високите нива на яркостта, а с тъмно синьонай- ниските. Фиг.3 и фиг.4 се отнасят за южна ориентация на прозорците.



Фиг.3. Нормален изглед от работните места за ориентация на прозорците юг.

Фиг.4. Изглед на яркостите отчетени от работните места за ориентация на прозорците юг

Снети са резултати за яркостта на прозоречните площи за четирите ориентации и са показани на табл.3, като позиция едно е най- близката до прозорците.

Яркост на прозорците **Таблица 3**

	Яркости на прозорците cd/m2			
	Изток	Запад	Север	Юг
позиция 1	1653	2000	1611	3358
позиция 2	1954	1983	842	3467
позиция 3	0	0	0	0

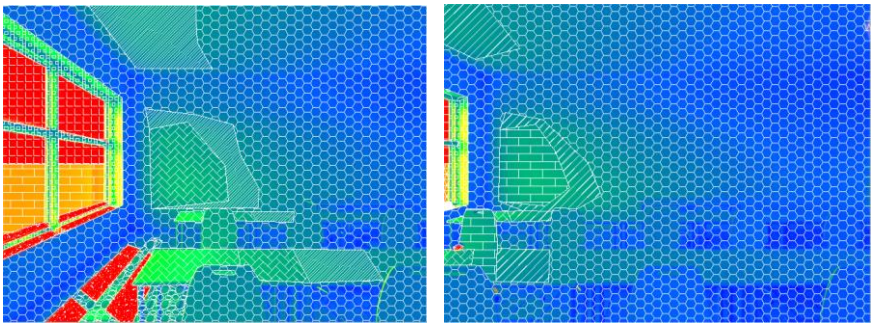
Измерена вертикална осветеност на височината на погледа (1,2м от пода) за трите работни места е показана на табл.4.

Стойности на вертикалните осветености **Таблица 4**

	Вертикалната осветеност lx			
	Изток	Запад	Север	Юг
позиция 1	640	850	640	1100
позиция 2	381	490	405	560
позиция 3	232	290	250	300

4. ОЦЕНКА НА ЗАСЛЕПЯВАНЕТО

За извършване на оценка на заслепяването от естествена светлина е необходимо да се изчисли средната яркост на повърхностите, попадащи в зрителното поле. За целта, изображението на симулационния модел, се разделя на равноярки повърхности фиг.5.



Фиг.5. Разделяне на симулационния модел на равнояркосттни повърхности

Колкото е по- голяма една повърхност, с толкова по-голям тегловния коефициент участва в изчислението на яркостта на обкръжението L_b.

Заслепяването от естествената светлина по метода, използващ индекс (DGI) е определено по зависимостите (1) и (2) и получените резултати са систематизирани в табл.5.

. Заслепяване от естествена светлина **Таблица 5**

	Стойност на DGI			
	Изток	Запад	Север	Юг
позиция 1	16,9	17,4	16,8	18,7
позиция 2	8,1	8,2	5,9	9,6
позиция 3	0	0	0	0

За оценка на заслепяването от естествено осветление е приложен и метода DGP (Daylight Glare Probability), използвана е зависимостта (3). Резултатите са представени в табл.6

Стойности на заслепяването от естествено осветление **Таблица 6**

	Стойност на DGP			
	Изток	Запад	Север	Юг
позиция 1	0,245	0,254	0,244	0,284
позиция 2	0,191	0,195	0,185	0,205
позиция 3	0	0	0	0

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените изчисления за наличието на заслепяване от дневната естествена светлина за помещения с различна географска ориентация в гр. София се вижда, че при използване на метод за заслепяването от естествена светлина (DGI), единствено при прозорци ориентирани на юг съществува осезаемо заслепяване, което е на границата с неосезаемото. При използване на по-съвременния метод за оценка на заслепяването от естествено осветление (DGP) резултатите за четирите разглеждани помещения попадат в графата неосезаемо заслепяване. Вероятната причина за това е, че при оценка на заслепяването посредством показателя DGP са използвани резултатите от съвременни научни изследвания, показващи, че поради характера на дневното естествено осветление, човек толерира много високи нива на яркост в зрителното си поле, без да почувства осезаем дискомфорт или намаляване на остротата на зрението си, поради физиологично заслепяване.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Hopkinson R., Glare form windows, construction research and development journal, 2, N3 pp 98-105, N4 pp 169-175 1970

[2] L.Bellia, A. Cesarano, G .Spada, Application of videophotometer in the evaluation of DGI in scholastic environment, International Journal on Architectural Science, Vol. 6, 2, pp.82-88, 2005

[3] Iwata T., K. Kimura, M. Shukuya, K. Takamo, Discomfort caused by wide source glare, Energy and buildings 15-16, pp391-398, 1990

[4] Nazzal A., A new evaluation method for daylight discomfort glare, International Journal of Industrial Ergonomics, pp. 295–306, 2006

[5] Wienold J., Dynamic daylight glare evaluatio, Eleventh International IBPSA Conference, Scotland July 27-30, 2009

[6] Wienold J., J. Christoffersen, Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with use of CCD cameras, Energy and buildings 38, pp.743-757, 206

[7] Wienold, J. Dynamic Daylight Glare Evaluation. Proceedings of Building Simulation; 2009

[8] Tokura, M., T. Iwata, M. Shukuya (1996).Experimental study on discomfort glare caused by windows, part 3. Development of a method for evaluating discomfort glare from a large light source, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering, No. 489, pp. 17-25

[9] Meyer, J.J, D. Francioli, H. Kerkhoven (1996). A new model for the assessment of visual comfort at VDTworkstations, Advances in Occupational Ergonomics and Safety I, Proceedings of the XIth Annual International Occupational Ergonomics and Safety Conference, 2, pp. 233 - 238, Zürich, Switzerland

[10] Wienold, J., K. Beckinger, P. Apian-Bennewitz, C. Reetz, C. Reinhart (1998). Stationary Virtual Reality (SVR) – A new method for predicting user acceptance of daylighting systems, Proceedings of the First CIE Symposium on Lighting Quality, pp. 178-182, Ottawa, Canada

[11] Cowdroy, R. McL (1972). A study of the scalar effect in the use of models for the assessment of glare, M. Blg. Sc. Thesis of the Macquarie University, Sydney, Australia

[12] A. Nazzal, A new evaluation method for daylight discomfort glare, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol.35, pp. 295 – 306, 2005

Автор: Дилян Иванов, ас. маг. инж., кат. "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *dianivanov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Вълчан Георгиев

РАЗРАБОТВАНЕ НА УСТРОЙСТВА И НАЧИНИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА КОЕФИЦИЕНТИТЕ НА ПРОПУСКАНЕ И НА ОТРАЖЕНИЕ НА СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ

Захари Иванов

Резюме: *В работата са предложени методики и устройства за измерване на коефициентите на пропускане на стъкла в помещенията и в атомобилите и коефициентите на отражение на стените*
Ключови думи: *методики, измерване, светлотехнически материали, осветителни уредби*

DEVELOPMENT OF DEVICE AND METHOD FOR MEASURING TRANSMITTANCE AND REFLECTANCE OF LIGHTING MATERIALS

Zahari Ivanov

Abstract: *In the work are proposed methods and devices for measuring the transmittance of glass in buildings and in car and the reflectance of the walls*
Keywords: *methodology, measurement, photometric materials, lighting systems*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

За минимално потребление на енергия от сградата при гарантиране на добър микроклимат е необходимо на първо място минимизиране на загубите от топлопреминаване през прозорците. Сградният стъклопакет може да повлияе от 70 до 90% на разхода за енергия и да гарантира високо ниво на енергийна ефективност [3].
Слънчева топлина може да е видима (пряка слънчева енергия, или т. нар. "къси" вълни) и инфрачервена (непряка слънчева енергия, или т. нар. "дълги" вълни). Пряката и непряката слънчева енергия всъщност представляват дължини на вълните от 780 nm до 5000 nm, които могат да преминават през фасадното остъкляване и по този начин да допринасят за увеличаване на топлинният добив от слънчевото греене в общия енергиен баланс.

2. РАЗРАБОТВАНЕ НА УСТРОЙСТВА ЗА ИЗМЕРВАНЕ КОЕФИЦИЕНТИТЕ НА ПРОПУСКАНЕ НА МАТЕРИАЛИ ЗА ПРОЗОРЦИ В ПОМЕЩЕНИЯ И АВТОСТЪКЛА

Разработени са две лабораторни постановки и са предложени начини за измерване на коефициентите на пропускане и на отражение на светлотехнически материали. Постановка № 1 е за измерване коефициента на пропускане на мате-

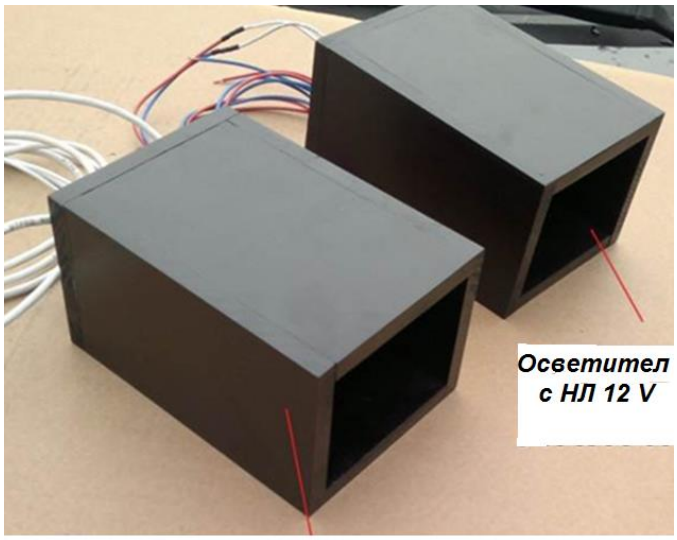
© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

риали за прозорци в помещенията, като е предвидена и възможност за измерване на коефициентът на пропускане на автомобилни стъкла. Тя се състои от две паралелопипедни кутии с размери (50/100/90)mm, боядисани в черна матова боя и поставени двете една срещу друга (фиг.1 до фиг.4). На едната кутия има отвор с диаметър 50 mm, в който се поставя луксметър и друг отвор в който се поставя проба от материала, който искаме да измерим. В другата кутия е поставен осветител (фиг.1) .

2.1. УСТРОЙСТВО ЗА ИЗМЕРВАНЕ КОЕФИЦИЕНТИТЕ НА ПРОПУСКАНЕ НА СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ ЗА ПРОЗОРЦИ

Когато измерваме коефициентите на пропускане на материали за прозорци в помещенията използва се „осветител“ захранван с 230 V, а тази за автомобилни стъкла с 12V (фиг.1).



Осветител
с НЛ 230 V

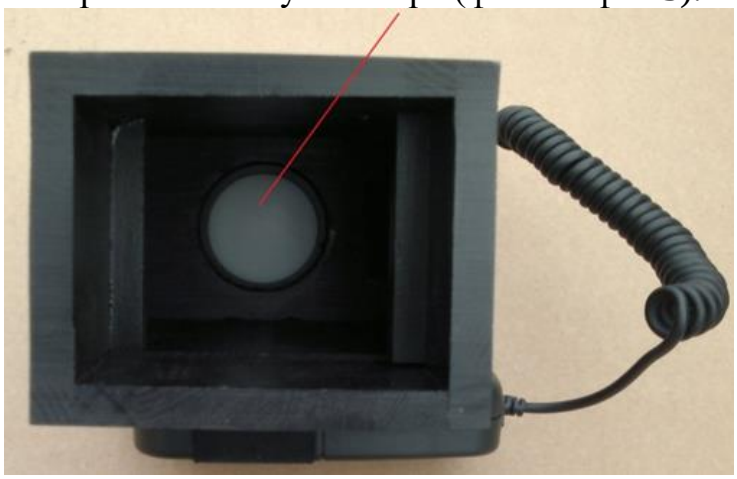
Фиг.1. Осветител с НЛ 12V и с НЛ 230V .

Кутията в която се разполага фотоприемника на луксметъра е с размери: дължина – 150 mm, широчина – 100 mm., височина – 90 mm (фиг. 2 до фиг.4).

Фиг.2. Отвор за измерваното стъкло

Фиг.3. Разположение на луксметъра

Накрая на кутията е изрязан отвор с диаметър 50 mm, в който плътно приляга фотоприемник на луксметъра (фиг.4). В горната част на кутията е поставена еластична лента за закрепване на луксметъра (фиг.2 и фиг.3).



Фиг.4. Разположение на фотоелемента.

В горната страна на кутията е оставен процеп, (виж фиг.2) през който се поставят пробите от измервания материал. Използваните материали са стъкла с размери: широчина – 80 mm, височина – 100 mm (фиг.5 и фиг.6)

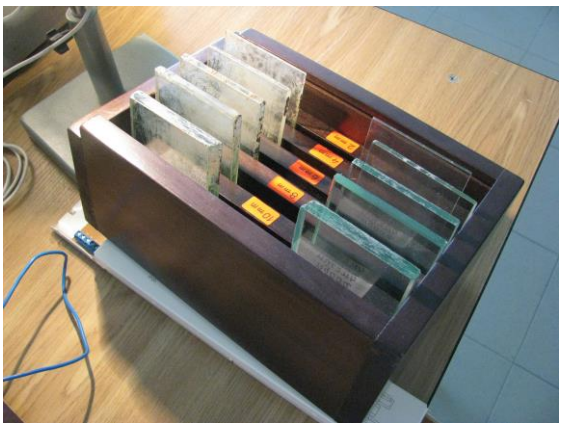
Измервани са стъкла с дебелина 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm и 10 mm. В единият случай стъклата са изчистени, а във втория – замърсени (фиг. 6) Определи са коефициентите на пропускане на материалите за прозорци, с различни дебелини и замърсяване на стъклата.

При чисти стъкла коефициентите на пропускане са между 84% и 87% , докато при замърсените, той варира между 45% и 70%.

Коефициентите на пропукане на замърсените стъкла значително намаляват т.е. те трябва да се поддържат чисти, вместо да се използва допълнителна изкуствена светлина, за достигане на нормената осветеност в помещенията.

.

Фиг.5. Стъкла с дебелина от 2 mm до 10 mm.



Фиг.6. Измервани чисти и замърсени стъкла с различна дебелина

Целта на упражнението е да се покаже, какви са коефициентите на пропускане на материалите за прозорци, с различни дебелини и какви са коефициентите на поглъщане, при замърсяване стъклата на прозорците.

РЪКОВОДСТВО ЗА ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА „ОПИТНА ПОСТАНОВКА ЗА ИЗМЕРВАНЕ КОЕФИЦИЕНТА НА ПРОПУСКАНЕ НА МАТЕРИАЛИ”

Осветителят се захранва с напрежение 230V.

1.1. Поставете фотоелемента на луксметъра върху отвора на кутията предназначена за приемник. Позиционирайте фотоелемента по начин показан на фиг.4.

1.2. Поставете луксметъра на стойката върху кутията (фиг.3).

1.3. Поставете кутията на осветителя и кутията на приемника съосно [2].

1.4. Включете захранващия кабел на осветителя.

1.5.Запишете показанията на луксметъра без да е поставена проба в отвора.

1.6. Поставете изследвания материал в отвора (фиг.2) .

1.7. Запишете показанията на луксметъра при включен осветител и поставена проба от изследваният материал (стъкло).

2.2. УСТРОЙСТВО ЗА ИЗМЕРВАНЕ КОЕФИЦИЕНТИТЕ НА ПРОПУСКАНЕ НА МАТЕРИАЛИ ЗА АВТОМОБИЛНИ СТЪКЛА

Осветителя се захранва от автомобилния акумулатор с напрежение 12V.

2.1. Повтарят се стъпките от точка 1.1. до точка 1.5.

2.2. Поставете осветителя и приемника в една равнина от двете страни на измерваното автомобилно стъкло (фиг. 7).

Фиг.7. Разположение на опитната постановка

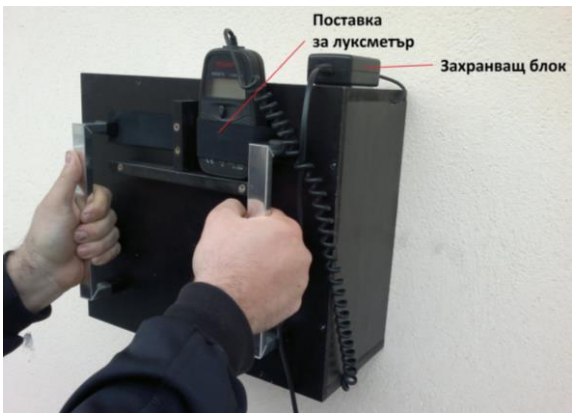
2.3. УСТРОЙСТВО ЗА ИЗМЕРВАНЕ КОЕФИЦИЕНТИТЕ НА ОТРАЖЕНИЕ НА МАТЕРИАЛИ

То се състои от една правоъгълна кутия с размери 350/300/15 mm боядисана в черен матов цвят (фиг.8). Кутията има две стойки в които се поставят двата луксметъра. Единият луксметър измерва осветеността попадаща върху стената, а другият измерва осветеността отразена от стената [1].

През средата на кутията има монтирана преграда с помощта на две планки (с размери: дължина – 320 mm, височина – 100 mm и широчина – 15 mm).

Вътре в кутиятя са монтирани две стойки, направени от ламарина с дебелина 1mm и покрити с термо шлаух. На тези стойки се поставят двата луксметъра. Луксметър 1 измерва осветеността попаднала на стената, а луксметър 2 – осветеността след отразяването от стената.

В горния край на кутията е поставен осветител от светлодиодна лента под ъгъл 20° спрямо луксметър 1 и стената. Осветителят излъчва равномерно разпределена светлина по цялата дължина на опитната постановка. Лентата се захранва посредством захранващ блок 12V/1A, разположен на горната част на опитната постановка (фиг.8).



Фиг.8. Общ вид на постановка № 1 **Фиг.9.** Начин на измерване

РЪКОВОДСТВО ЗА ЕКСЛОАТАЦИЯ НА ЛАБОРАТОРНА ПОСТАНОВКА № 2 ЗА ИЗМЕРВАНЕ КОЕФИЦИЕНТА НА ОТРАЖЕНИЕ НА СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ

1. Поставете датчика на луксметъра, който ще измерва попадналата върху изследвания материал светлина на стойка 1 (фиг.8).

2. Прекарайте кабел през канала до стойката и закачете луксметъра на стойката разположена на задната стена на опитната постановка. (фиг.8, фиг.9).

3. Поставете датчика на луксметъра, който ще измерва отразената от изследвания материал светлина на стойка 2 (фиг.8).

4. Прекарайте кабел през канала до стойката и закачете луксметъра на стойката разположена на задната стена на опитната постановка (фиг.9).

На фиг.8 са означени разположенията на поставките на двата луксметъра.

5. Включете захранващия кабел на опитната постановка в мрежата (фиг.9).

6. Разположете плътно опитната постановка на изследвания материал (фиг.9).

7. Запишете показанията на двата луксметъра.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработена е лабораторна постановка № 1 и е предложен начин за измерване коефициента на пропускане на материали за прозорци в помещенията, като е предвидена и възможност за измерване на коефициентът на пропускане на автомобилни стъкла. Получените резултати от това измерване показват, колко е важно материалите за прозорци, да се поддържат чисти, вместо да се използват допълнителни изкуствени източници на осветление, за достигане на нормената осветеност в помещенията

Разработена е лабораторна постановка № 2 за измерване коефициентите на отражение на стените на помещенията, необходими при проектиране на вътрешните осветителни уредби.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Андрианов К.А., Матвеева И.В., Макаров А.М. ***Строительная физика.*** Тамбовский государственный технический университет, 2007

[2] Диканаров. Г, ***Ръководство за лабораторни упражнения по осветителна и инсталационна техника,Техника, 2002***

[3] http://lorex-ny.com/project/lorex-m6/ ***Лорекс ЕООД – PVC и Алуминиеви профили и дограми***

Автор: Захари Иванов, проф. д-р, катедра ЕСЕО, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Вълчан Георгиев

ПРИЛОЖЕНИЕ НА СВЕТЛОВОДНИ СИСТЕМИ ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ НА МЕТРОСТАНЦИИ

Захари Иванов, Виктор Манов, Васил Станков

Резюме: *Представено е нетрадиционно и съвременно светлотехническо решение за осветяване на метростанции. Разработени са проектни варианти с използването на кухи светловоди с надлъжна светеща ивица и плоски светловоди.*
Ключови думи: *светловод, плосък светловод, осветителна уредба, метростанция*

APPLICATION LIGHT GUIDE LIGHTING SYSTEMS FOR METRO STATIONS

Zahari Ivanov, Viktor Manov, Vasil Stankov

Abstract: *Presented is untraditional and contemporary lighting engineering solution for lighting subway stations. Developed design options using a hollow light guide with longitudinal luminous strip and flat a light guide.*
Keywords: *Hollow light guide, flat light guide, lighting system, subway station*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В страните от Европейския съюз активно се разработват програми на правителствата в подкрепа на прилагането на светловодите. Например, във Франция, се разглежда въпроса за включване на светловодите в списък на продукти, използващи възобновяеми източници на енергия, както се подкрепя закупуването и монтажа на светловодите от страна на ЕС.

Здравните експерти са все по-наясно, че ограниченото използване на изкуствена светлина, като същевременно се гарантира получаване на естествена светлина в рамките на даден 24-часов цикъл е от ключово значение, за да останем здрави. Основна причина за това е, че нашите хронобиологични часовници са разстроени.

Сравнително нова и неизползвана у нас система за вътрешно и външно осветление, е прилагането на кухи тръбни и плоски светловоди за въвеждане на естествена и изкуствена светлина в помещенията [1, 3, 4]. При такива уредби обектите се осветяват от разположени на тавана светещи тръби или плоски повърхности, в краищата на които са монтирани светлинните източници. Светлинният поток се разпространява по протежение на тръбата, съответно плоската повърхност.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

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. При масово използване на вариантите с въвеждане на естествена светлина би се спомогнало и за подобряване здравният статус на нацията.

Методите за въвеждане на естествено и изкуствено осветление от разстояние в помещенията биват:

I. Кухи тръбни светловоди;

II. Плоски светловоди;

III. Оптични влакна.

Кухите тръбни светловоди от своя страна могат да се разделят на:

A. С надлъжна светеща ивица (СНСИ) - фиг.1 [3];

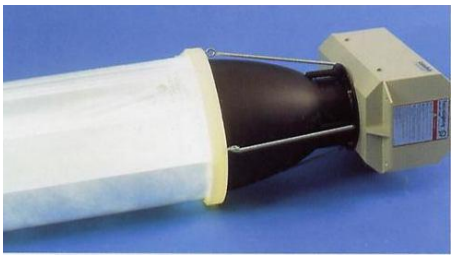
B. Призматични светловоди - фиг.2;

C. Светловоди за въвеждане на естествена светлина - фиг.3.

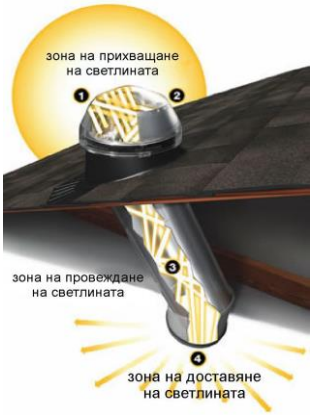
Според вида на използвания светлинен източник биха могли да се разграничат на такива с:

1. Изкуствен светлинен източник (лампи);
2. Въвеждане на естествена светлина (от слънцето и небосвода);
3. Въвеждане на естествена и изкуствена светлина.

Фиг.1.



Фиг.2.



Фиг.3.

Интересни проекти за осветяване на метростанции чрез използването на кухи светловоди са:

Метростанция „Серпуховская” в южната част на московския метрополитен [1]. Открита е през ноември, 1983 г. За осветление на централната зала към тавана са монтирани кухи тръбни светловоди с надлъжна светеща ивица с обща дължина от 60 m и диаметър на тръбата 0.625 m (фиг.4). Светловодите са изработени от огледално и матово полиетилентерефталатно фолио с по пет светлоп-

ропускащи ивици, обезпечаващи равномерно осветяване на свода, колоните и пода на централната зала. Реализирана е средна осветеност от 150 lx, при специфичен коефициент на инсталирана мощност - 18 W/m². Тръбният светловод е закрепен на 12 метални куба (8 - декоративни и 4, в които са поставени входните устройства с рефлекторни металхалогенни лампи, които са насочени в светловодните тръби) - фиг.4.

Фиг.4.

Друг пример, показващ практичността и широката област на приложение на този тип осветителни уредби е този, реализиран на ”Potsdamer Platz” в Берлин. Там е създадена нова градска обществено-търговска зона, към която зона спада и подземната зала на регионалното метро.

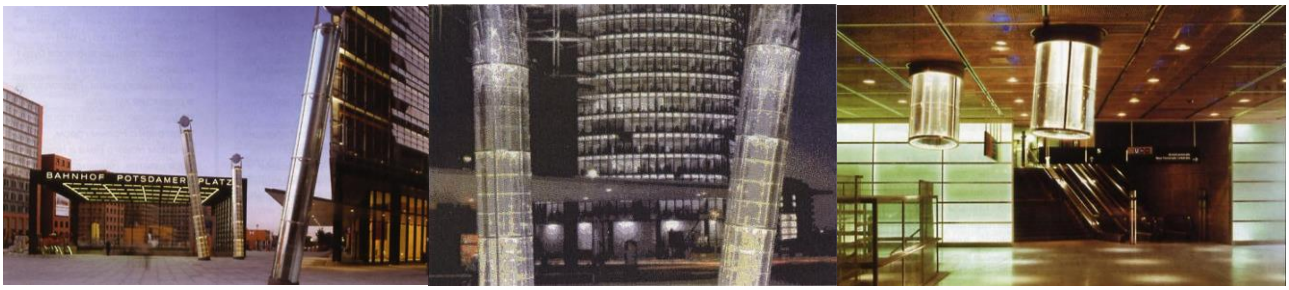
В този градски комплекс е реализирана светлинна връзка между надземните градски структури и подземната метростанция. Това е постигнато чрез използване на кухи светловоди, преминаващи под земята. С помощта на светловодите се решават две задачи:

- транспортиране на дневната светлина на определени места в подземната зала;

- създаване на отличителни архитектурни черти на площада през нощта и привечер.

Въвеждането на дневна светлина позволява посетителите на подземната зала (метростанцията) да получават представа за времето и атмосферните явления на повърхността, което да притъпи в тях усещането за изолираност под земята (”чувството на тунела”).

При хубаво време слънчевата светлина се улавя с помощта на хелиостат, следящ движението на слънцето и въвежда светлината в светловода, представляващ сам по себе си метална тръба с диаметър 700 mm, комплектован отвътре с призматично фолио, осигуряващо многократните отражения на светлината (фиг.5).



Фиг.5.

Коаксиално на металната тръба е монтирана стъклена тръба с диаметър 1000 mm, като между двете тръби има отразяващо призматично фолио. Нощно време и привечер, изкуствената светлина от светлинните източници в подземните помещения излиза и над повърхността чрез отражение на тази светлина в пространството между двете тръби. По този начин частите на светловодите над повърхността изглеждат като гигантски светещи колони. Пълната дължина на светлодите е 14, 17 и 21 m, а частта над повърхността достига до 10 m.

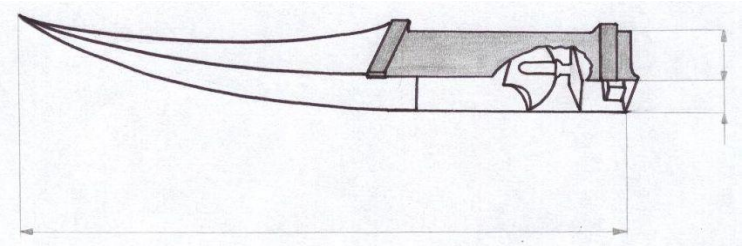
Благодарение на всичко това в подземната зала навлиза дневна светлина, а нощем светловодите пренасят светлината от електрическото осветление от метростанцията над повърхността и придават авангардност и уникалност на ”Potsdamer Platz” (фиг.5).

В Канада също има реализирани светловодни системи за осветление на метростанции: Транзитна станция в Кагари - фиг.6 и Bremalea City Centre в Торонто - фиг.7.

Фиг.6.

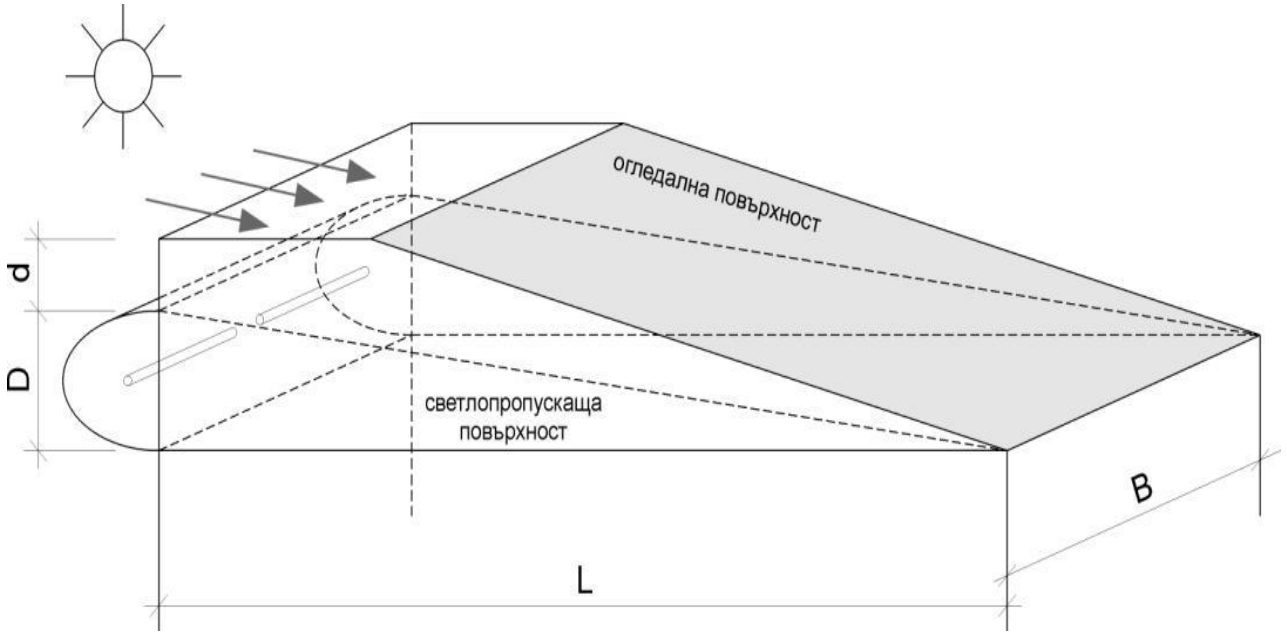
Фиг.7.

В Русия има и метростанция, където е използван метода на плоския светловод за реализиране на уникално осветление, подчертаващо куполообразната форма на таваните - фиг.8.



Фиг.8.

Принципът на действие на плосък светловод, осигуряващ равномерно разпределение на осветеността по цялата светеща повърхност е показан на фиг.9 [1, 4].



Фиг.9. Плосък светловод.

Светлинният поток се въвежда в пространство, образувано от горната огледална повърхност и светлопропускаща повърхност, от долната страна.

2. ПОЕКТИРАНЕ НА ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ СЪС СВЕТЛОВОДИ С НАДЛЪЖНА СВЕТЕЩА ИВИЦА И С ПЛОСКИ СВЕТЛОВОДИ

Метростанция “ Люлин” е обектът, за който е извършено проектирането. Осветяваната повърхност на метростанцията е с размери: а) дължина – 90 m, b) широчина – 10 m; c) височина – 3.8 m. Нормената осветеност е 150 lx.
Използвана е компютърна програма за проектиране.

2.1. Проектиране на осветителна уредба със светловоди с надлъжна светеща ивица

2.1.1. Определени са мощността на светлинните източници, броя на светловодите и тяхното разположение в помещението. Използвани са керамични МХЛ 250W (26000 lm). Броят на светловодите е 24 с дължина 5 m и диаметър 0.6 m. Разположени са в две линии по 12 броя през 2 m. Инсталираната мощност на осветителната уредба е $P_{инст.} = 6.72$ kW.

2.1.2. Изчислена е средната осветеност ($E_{ср} = 157$ lx) и равномерността на осветеността $E_{мин}/E_{ср} = 0.62$.

2.2. Проектиране на осветителна уредба с плосък светловод

2.2.1. Параметрите на плоския светловод са (9 x 2 x 0.8) m, а височината

на окачване 3 m. Използвани са МХЛ с мощност 100 W и светлинен поток Фи=7800 lm. Инсталираната мощност на осветителната уредба е $P_{инст.}$ = 4,03kW.

2.2.2. Изчислена е средната осветеност ($E_{ср}$ = 146 lx) и равномерността на осветеността ($E_{мин}/E_{ср}$ = 0.79).

3. РЕАЛИЗИРАНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ СЪС СВЕТЛОВОДИ ЗА ВЪВЕЖДАНЕ НА ЕСТЕСТВЕНА СВЕТЛИНА В ПОМЕЩЕНИЯ

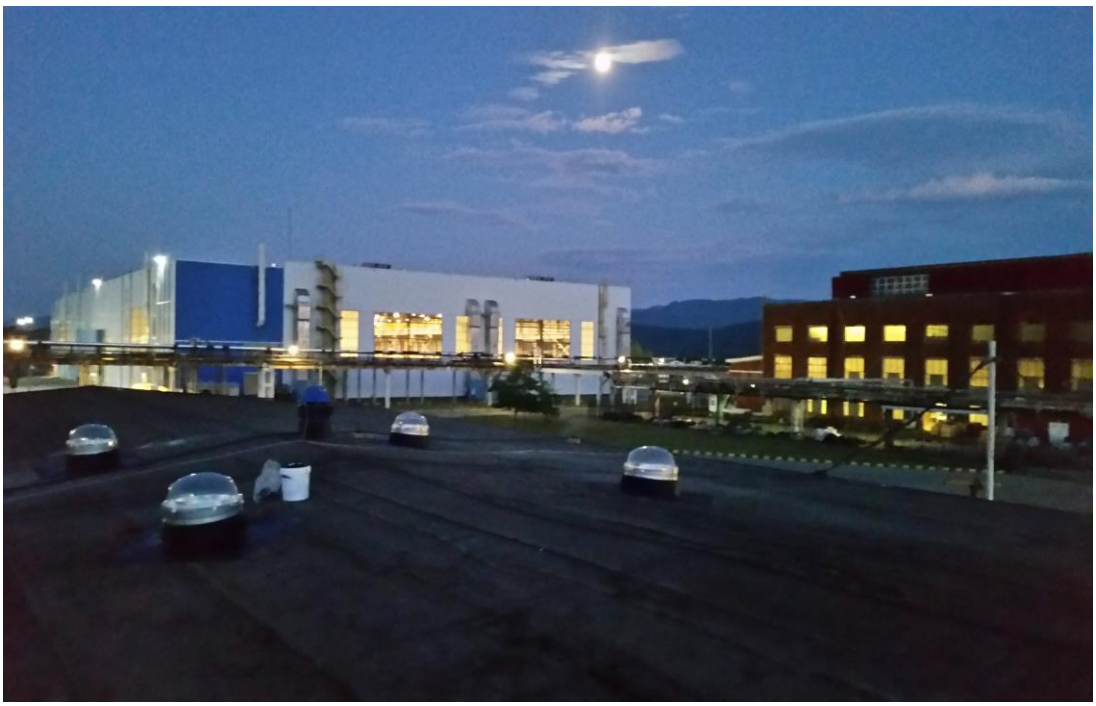
В подкрепа на технологията за въвеждане на естествено и изкуствено осветление в метростанциите, през 2016 година са реализирани в София и Пирдоп уредби с тръбни светловоди за въвеждане на естествена светлина в помещения:

1. В диагностично консултативен център (ДКЦ) №8 в квартал „Надежда” – София (*виж* фиг. 10). Измерена е 408lx средна осветеност и КЕО = 0.5%.

2. В медодобивния завод на Аурубис – България, в региона на Средногорието. Осветен е склад за катодна мед с размери: дължина - 35 м.; ширина - 14 м. , и височина - 5,5 м. (фиг.11 и фиг.12).

преди май 2016 ***юли 2016***

Фиг.10. Използване на светловоди за въвеждане на естествена светлина в помещение на осмо ДКЦ - София (***виж снимката в дясно***).



Фиг.11. Монтирани светловоди в Аурубис – България.

И в двата обекта са монтирани по 4 броя светловодни системи с диаметър Ф = 530 mm, преминаващи през покривните конструкции.

Фиг.12. Осветление на склад със светловоди за естествена светлина.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемите в използване на слънчевата енергия в последно време пораждат друга съвременна насока в развитието на осветителните уредби - съчетаване на естествено и изкуствено осветление в една осветителна уредба.

Проблемът на интегрирането на естествено и изкуствено осветление е един от важните проблеми на съвременната светлотехника. Успешното решение на тези проблеми е важно не само за високите едноетажни сгради (цехове, универсални магазини и музей), но и за остъклени дълбоки здания , които са с голямо разстояние от прозорците до централната зона на зданието, а също така и помещения без естествена светлина (подземни търговски центрове, гаражи, складове и станции на метро и т.н).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Айзенберг, Ю. Б., Пятигорский В. М., Бухман Г.Б, ***Щелевые светловоды,*** Наука в СССР, 4, 1988

[2] Иванов З. А., ***Възможности и предимства на осветителни уредби с кухи тръбни светловоди"*** , сп."Енергетика", № 6-7, 1996 , стр. 15-16

[3] 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/ 1995, кн.3., стр. 235-240.

[4] Иванов З. А., Манов В., ***Изчисляване на оптична система за плосък светловод,*** XI национална конференция по осветление "Осветление 2001", 13-15 юни 2001, Варна

Автори: Захари Иванов, проф. 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*; Васил Станков, маг. инж., фирма „Advance energy and engineering, Sofia, Bulgaria”, E-mail address: *v.stankov@aee.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Вълчан Георгиев

ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ ЗА ХИБРИДНИТЕ АВТОМОБИЛИ

Цветомир Стоянов

Резюме: *Настоящата публикация представлява обзор на развитието на хибридните автомобили, тяхното разпространение, бъдещото им развитие, техните предимства и недостатъци. Представени са данни за хибридните модели на основните автомобилни производители.*
Направен е обзор на електрическите машини използвани при задвижване на хибридните автомобили и са обобщени изискванията към тях. Описани са и различните структури на хибридните автомобили
Ключови думи: *хибридни автомобили, електрозадвижвания*

ELECTRICAL MACHINES USED IN HYBRID CARS

Tsvetomir Stoyanov

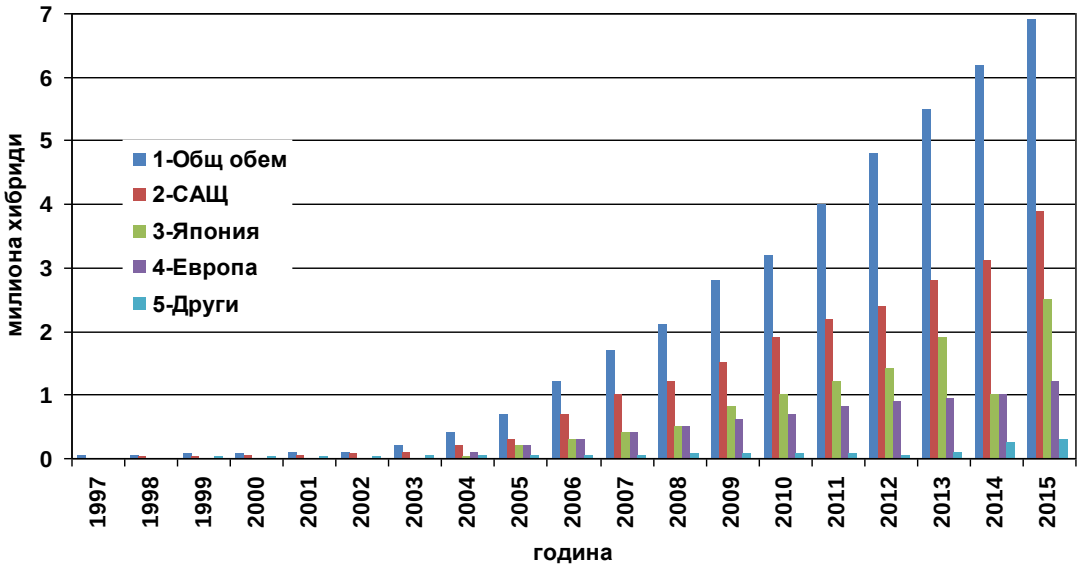
Abstract: *The current publication presents a survey of the hybrid cars distribution, future, development and their advantages and disadvantages. The article describes data on hybrid cars model of the major automotive manufactures.*
In the article also give information about the different types of the traction motors used in hybrid cars and requirements to them. The hybrid car's structures are described.
Key words: *hybrid cars, traction motors*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

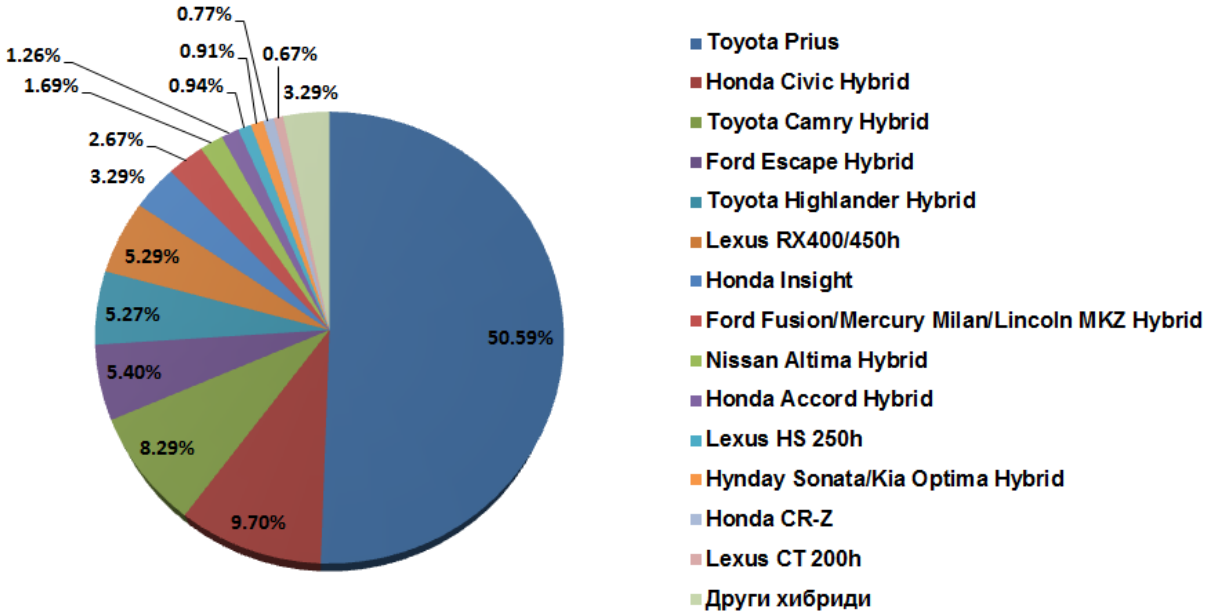
Хибридните автомобили получават голямо разпространение през последните години и набират все по-голяма популярност.
От появата на първия сериен хибриден автомобил Toyota Prius преди двадесет години до днес, броя на хибридните автомобили нараства непрекъснато. Фиг.1 представя количеството продадени хибридни автомобили в световен мащаб и в отделните страни [5], като по прогнозни данни [8] през 2020 година количеството продадени хибридни автомобили ще бъде около 30 милиона автомобила.
Редица автомобилни производители Toyota, Honda, Ford, Nissan, Hyundai, Kia [15], произвеждат хибридни автомобили. Като абсолютен лидер е Toyota Prius (с нейните четири поколения [6]), с дял от над петдесет процента от всички хибридни автомобили в света [5], както е показано на фиг.2.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829



Фиг.1. Количество продадени хибридни автомобили



Фиг.2. Разпределение на хибридните автомобили по марки и модели

Заедно с това автомобилните производители не само се стремят да имат в гамата си хибриден автомобил, а също така той да има същите а и по-добри характеристики, оборудване и комфорт от конвенционалните автомобили [4].
Нарастващата популярност и търсене на хибридни автомобили се дължи на следните няколко причини:

- ресурсни- поради непрекъснатото промяна цената на петрола повишаване или понижаване, достигане в най-близко време на недостиг на изкопаеми горива или най мрачните прогнози за изчерпване на петролните залежи до петдесет години.

- екологични- едно от основните изисквания към автомобилите на двадесет и първи век е да са екологично чисти [17], поради тази причина екологичните норми към автомобилния транспорт стават все по строги. Според директива 93/116 на ЕС количеството на CO_2 в отработените газове изхвърляни от ав-

томобилите през 2012 трябва да е 120-130 г/км. [4] (което отговаря на въведения през 2015 екологичен стандарт Euro 6). Като според програмата на ООН Global Fuel Economy Initiative през 2050 тази норма трябва да е намалена на половина.

- технически- те могат да се разделят на няколко групи:
  - първа група- хибридните автомобили имат по- нисък разход от стандартните им аналози табл.1 [4] .

Сравнителна таблица на хибриди и стандартните им аналози **Таблица 1**

Автомобил	Маса	Обем	Мощност на ДВГ	Мощност на електродвига-теля	Разход на гориво при Европейски цикъл	Понижение на разхока на гориво при хибрид	CO_2
	[кг]	[л]	[KW]	[KW]	[Л]	[%]	[г/км]
Honda Civic хибрид	1249 1720	1,34	70	15	5,2/4,3/4,6	59/46/49	109
Honda Civic аналог	1265 1700	2	148	-	12,7/7,9/9,1	-	215
Toyota Corolla хибрид	1380 1805	1.8	73	60	3,8/3,8/3,8	56/31/24	89
Toyota Corolla аналог	1250 1750	1.8	108	-	8,7/5,5/6,7	-	155
Honda Insight хибрид	1200 1650	1.34	65	10	4,2/4,6/4,4	-/-/51	101
Honda Insight аналог	1610	3.47	206	-	-/-/9,0	-	-
BMW 7 хибрид	2045 2635	4.4	330	15	12,6/7,6/9,4	26/15/21	219
BMW 7 аналог	1945 2575	4.4	300	-	17,1/8,9/11,9	-	279
Porsche Cayenne хибрид	2240 2910	3	245	34	8,7/7,9/8,2	45/6,0/27	193
Porsche Cayenne аналог	1995 2765	3.6	220	-	15,9/8,4/11,2	-	263
Cadillac Escalade хибрид	2780 3400	6	248	60	11,6/10,7/11,0	42/5,0/24	264
Cadillac Escalade аналог	2580 3310	6.2	301	-	20,1/11,3/14,5	-	339

Това се постига по няколко начина. Съчетава се използването на ДВГ и електродвигателя всеки работи при благоприятни за него условия. ДВГ работи при високи обороти с максимален момент, а при градски условия работи електродвигателя. Наличието на две електрически машини в хибридния автомобил [10], позволява едната електрическа машина да се проектира да работи в режим на генератор, задвижвана от ДВГ при неговите оптимални условия за работа. И не на последно място електрическата машина има над два пъти по-високо КПД от ДВГ.

- втора група-създаването на активни, конструктивни и изолационни материали обезпечаващи работата на електрическите машини при високи електромагнитни и топлинни натоварвания [15]. Допустимата токова плътност за стандартно изпълнение на електрическа машина и конструктивни материали внедрен преди 20-30 години варира в следните граници: 5 A/mm^2 за АД и до 15 A/mm^2 за синхронни генератори с принудително водородно охлаждане. За сравнение допустимата токова плътност при СДПМ е в интервала 20-50 A/mm^2. Бързото развитие и наличието на база

от електронни компоненти е способна да осигури създаването на инвертори за управлението на тези машини [15].

Освен горните причини за бързите темпове на разпространение на хибридните автомобили, други фактори благоприятстващи разпространението им са техните предимства:

- максимален въртящ момент от състояние на покой и нисък разход на гориво в градски условия.
- наличието на електрическа машина в задвижването на автомобила позволява преминаването й в режим на генератор и рекуперирането на енергия. Което от своя страна позволява повишаването на к.п.д. на автомобила, но това води до по сложни алгоритми за управление на инверторите.

Наред с многото предимства хибридните автомобили притежават редица недостатъци:

- по-висока цена от стандартните автомобили, поради наличието на батерии и инвертор.
- необходимост от наличието на тягова акумулаторна батерия. Което от своя страна води до няколко проблема, поради характеристиките и свойствата на акумулаторните батерии:
  - срок на експлоатация до пет години
  - ограничен брой цикли заряд разряд (до хиляда за някои видове батерии)
  - ниска плътност на енергията на акумулаторната батерия до 150 Wh/kg, което води до увеличаване на теглото на батерията и на автомобила като цяло.

Въпреки горните недостатъци на химичните източници на енергия, в тази област се работи много и активно. Съществуват разработки на литиево въздушни батерии с плътност на енергията от 1500 Wh/kg и способни да осигурят пробег от 500 километра.

-утилизацията на акумулаторните батерии;

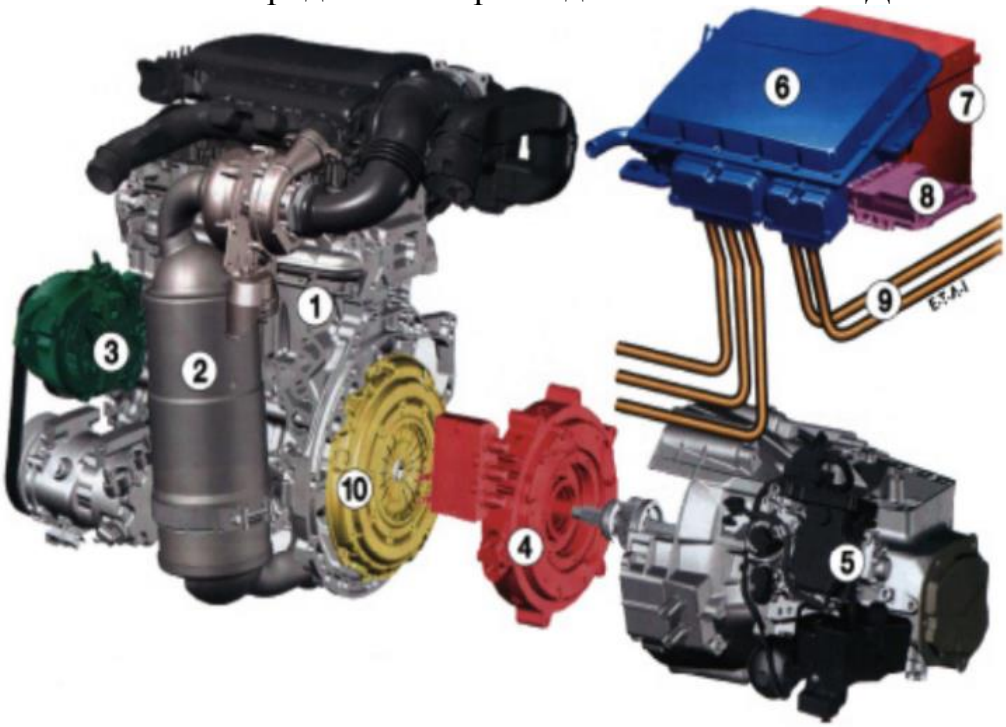
- техническото обслужване на хибридните автомобили в сервизите не е добре организирано към този момент и поради тази причина сервизите нямат възможност за извършване на качествен ремонт;

- наличието на много електронни компоненти събрани на едно място и работата им с високи честоти, създават електромагнитно поле опасно за човешкото здраве[7].

2. ЗАДВИЖВАНЕ НА ХИБРИДНИЯ АВТОМОБИЛ

Задвижването на един хибриден автомобил се състои от ДВГ, електродвигател и трансмисия. Връзката между ДВГ и електродвигателя и предаването движението на водещите колела може да се осъществи по няколко начина, както е показано на фиг.3 до фиг.5 [9]. Всеки начин на връзка влияе на избора на структура на хибридния автомобил и вида на използвания електродвигател.

Фиг.3. Електродвигател присъединен към вала на ДВГ



1-ДВГ 2-Стартираща и спираща система 3-Електродвигател 4-Скоростна кутия 5-Инвертор и изправител 6-Управляваща система

Фиг.4. Независими електродвигател и ДВГ

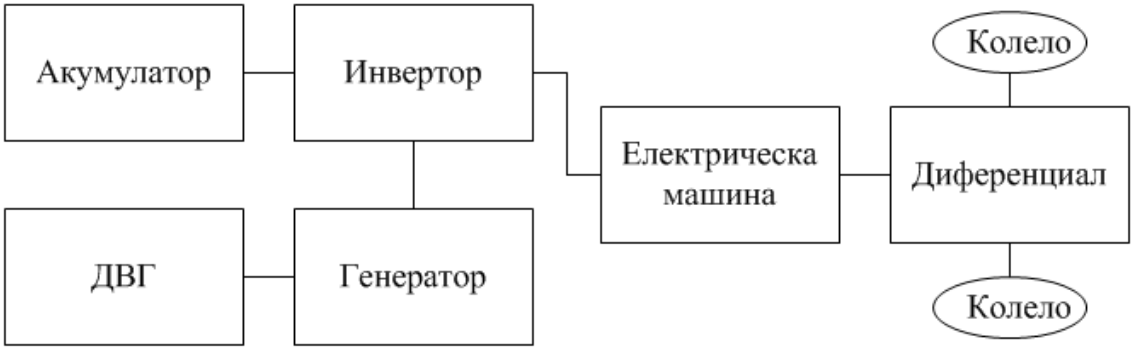
Фиг.5. Електродвигател монтиран в задвижващата гума

Функции и изисквания към задвижването на хибридния автомобил [3] :

- сумиране на въртящия момент от два източника на енергия и предаването му на колелата на транспортното средство
- обезпечава движението на автомобила на определен източник на енергия
- обезпечава безстепенно изменение на предавателното отношение
- има относително малки загуби

Структурата на хибридния автомобил бива няколко вида [3, 11]:

-последователна - показаната на фиг.6 структура има двойно преобразуване на енергията от механична в електрическа и после пак в механична, което води до намаляване на КПД. Електрическата машина трябва да е същата по мощност като ДВГ. Това условие води до увеличаване теглото на трансмисията и превозното средство.

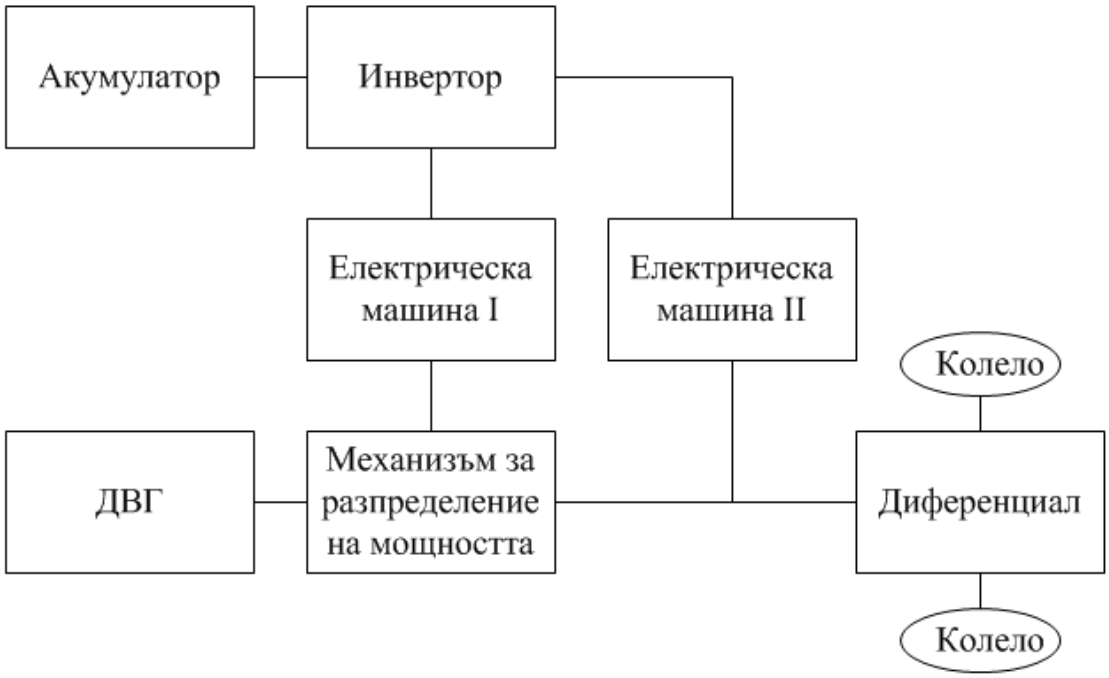


Фиг.6. Последователна хибридна структура

- паралелна - електрическата машина може да бъде обединена с ДВГ (фиг.7). Регулирането на предавателното число се осъществява с механична скоростна кутия, а регулирането на мощността чрез електродвигателя. Електрическата машина е с мощност около 15 % от мощността на ДВГ. Има механична връзка между ДВГ и водещите колела на автомобила.

Фиг.7. Паралелна хибридна структура

- с разпределяне на мощността на ДВГ- представлява електромеханично устройство, което осигурява безстепенно изменение на предавателното число, но са необходими две електрически машини (фиг.8).



Фиг.8. Хибридна структура с разпределение на мощността на ДВГ

3. ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ИЗПОЛЗВАНИ ЗА ЗАДВИЖВАНЕ НА ХИБРИДНИ АВТОМОБИЛИ

Към електродвигателите използвани за задвижване на хибридни автомобили се налагат следните изисквания [2], [16] :

- лесна и технологична изработка;
- лесна обслужваемост;
- лесна регулируемост;
- надеждност;
- работа при високи обороти 10000-15000;
- висок момент в целия скоростен диапазон;
- възможност за рекуперация;
- висок КПД;
- високо съотношение маса/мощност
- способност за кратковременни претоварвания- два пъти по мощност и до четири пъти по момент;
- минимална маса;
- минимална цена;

Неразделна част от електрозадвижването на един хибриден автомобил е електронния преобразувател, осигуряващ токове и напрежения със съответната големина, форма и честота. Друга важна функция на преобразувателя е управлението на електрическата машина. Поради тези причини, изискванията към електродвигателя се определят и от преобразувателя.

Съществува голямото разнообразие при класификацията на електрическите машини, базирано на различни фактори - скорост на въртене на магнитното поле създадено от котвата и индуктора, вид и форма на захранващото напрежение, начин на възбуждане на магнитното поле в индуктора, закони и начини за уп-

равление на електрическите машини. От друга страна сливането на тези разграничения, до определена степен поради използването на електронен преобразувател, създава нови възможности за управление и свойства на електрическите машини. Поради тези факти, класификацията на електрическите машини използвана за задвижване на хибридни автомобили, ще бъде аналогична на литературните източници за такива автомобили [12], [1], където машините са разделени на асинхронни двигатели (АД), постояннотокови двигатели (ПД), синхронни двигатели, най-често с постоянни магнити (СДПМ) и реактивни двигатели. Друг факт подкрепящ тази класификация е употребата на тези типове електродвигатели от водещи автомобилни производители в серийните им хибридни автомобили и произведените от тях единични бройки или малки серии: асинхронни двигатели - Ford, постояннотокови двигатели -Toyota най-вече при електромобили, синхронни двигатели най-често с постоянни магнити(СДПМ)- Toyota, Honda, реактивни- BMW, Land Rover.

Сравнени с останалите типове електродвигатели, всеки има следните предимства и недостатъци.

1. Асинхронните машини [17]:
   - предимства- лесна изработка, ниска цена, най-добра надеждност
   - недостатъци сложни алгоритми за управление, по-голяма маса за единица мощност
2. Постояннотоковите двигатели (разглеждат се само безколекторни двигатели) [17]:
   - предимства- лесна изработка и управление, ниска цена
   -недостатъци-по-голяма маса за единица мощност, най- енергонеефективни
3. Реактивни двигатели [17] :
   - предимства- лесна изработка и ниска цена, поради липсата на намотка в ротора няма загуби там
   - недостатъци-консумацията на голям реактивен ток при стартиране и работа
4. Синхронни двигатели с постоянни магнити [14] :
   - предимства- имат най-високо КПД, масата им за единица мощност е най-малка
   - недостатъци- най-висока цена, главно паради постоянните магнити, отсъствието на намотка в ротора, позволява контролирането на магнитното поле само от страна на статора.

4. АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1.От появата на първия сериен хибриден автомобил Toyota Prius преди двадесет години до днес, броя на хибридните автомобили нараства непрекъснато. Това се дължи на редицата предимства, които имат хибридните автомобили пред конвенционалните им аналози: по-нисък разход на гориво, по-високо КПД, висок въртящ момент в целия скоростен диапазон и други. Наред с предимс-

твата хибридните автомобили имат и редица недостатъци- висока цена, по-сложна сервизна поддръжка.

2. Структурата на хибридния автомобил бива няколко вида и тя определя мощността и конструкцията на електрическата машина използвана в електрозадвижването на хибрида .

3.Съществува разнообразие от електрическите машини използвани в хибридните автомобили, но също така към тях се налагат и редица изисквания.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бербиренков, И. , В. Лохнин, Винтильные тяговые двигатели в электроприводе, МАМИ, 2011

[2] Бербиренков, И. , В. Лохнин, Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля, Электротехнические и информационные комплексы 10 и системы № 2, т. 7, 2011

[3] Котиев, Г. , С. Харитонов, М. Нагайцев, Обзор кинематических схем построения гибридных трансмиссий, Журнал автомобильных инженеров, 2010

[4] Ломакин, В. , А. Шабанов, А. Шабанов, К вопросу выбора мощности ДВС энергетической установки гибридного автомобиля, Журнал автомобильных инженеров, 2013

[5] Раков, В. , Развитие парка гибридных автомобилей, Мир транспорта, 2011

[6] Смирнов, О. , О. Дубас, Т. Матвієнко, Эволюция технических решений в гибридном автомобиле Toyota Prius, Харьковский Национальный Автомобильно - Дорожный Университет, 2011

[7] Селиванов, С. , В. Филенко, В. Каразина, А. Бажинов, Электромагнитные загрязнения биосферы автотранспортом (автомобили, электромобили, гибридные автомобили), Харьковский Национальный Автомобильно - Дорожный Университет, 2009

[8] Шаньгин, А., Электромобили как экологически чистый вид транспорта, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012

[9] Шабанов, А. ,В. Ломакин, А. Шабанов, Характеристики електромобилей и тенденции развития електропривода, Журнал автомобильных инженеров, 2014

[10] Adsani, A., Hybrid Permanent Magnet Machines for Electric Vehicles, University of Manchester, September 2011

[11] Mi, C., M. Masrur, D. Gao, Hybrid Electric Vehicles Principles And Applications With Practical Perspectives, John Wiley & Sons, Ltd, 2011

[12] Chen, L. , J. Wang, P. Lombard, P. Lazari, V. Leconte, High Efficiency Motor Design for Electrical vehicles, University of Sheffield, 2012

[13] Heikkila, T., Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications-analysis and design, Lappeenranta University of Technology, 2002

[14] Li, J. , S. Li, X. Chen, Adaptive speed control of a PMSM servo system using an RBFN disturbance observer, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2011

[15] Miller, J., Propulsion Systems for Hybrid Vehicles, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2008
[16] Narita, K. , T. Yamada, Y. Sakashita, K. Akatsu, Coupled Analysis Technique Involving Magnetic-Field-Control/Circuit Simulation and Loss Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machine, Electrical Engineering in Japan, Vol. 183, No. 3, 2013
[17] Yabumoto, M., C. Kaido, T. Wakisaka, T. Kubota, N. Suzuki, Electrical Steel Sheet for Traction Motors of Hybrid/Electric Vehicles, Nippon Steel Technical Report No. 87 July 2003

Автор: Цветомир Методиев Стоянов, инж. маг. докторант, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *cmetodiev@ tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Георги Тодоров

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАГУБИТЕ В РОТОРА НА СИНХРОННА МАШИНА С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ЗА ХИБРИДНИ АВТОМОБИЛИ

Радослав Спасов, Пламен Ризов, Цветомир Стоянов, Виктор Захариев

Резюме: *Целта на настоящата статия е да се определят пулсационните загуби в ротора на синхронна машина с V-образно разположени постоянни използвана при хибридни автомобили. Те ще бъдат определени на базата на изменението на пространственото разпределение на индукцията в феромагнитните области на ротора при различни натоварвания.*

Изследванията са извършени чрез моделиране на магнитното поле чрез програмния продукт FEMM и разработени програмни модули за изчисляване на магнитната индукция и загубите.

Ключови думи: *метод на крайни елементи, синхронни двигатели с постоянни магнити,* загуби.

ROTOR IRON LOSSES DETERMINATION IN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE FOR HYBRID CARS

Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Tsvetomir Stoyanov, Victor Zahariev

Abstract: *The purpose of the work is to determine the rotor's iron losses in V-shaped permanent magnet synchronous machines, used in hybrid cars. They will be determined based on the variation of the spatial distribution of magnetic flux density in the ferromagnetic areas of the rotor at different loads.*

The analysis is performed by finite element magnetic field modeling and program modules for of magnetic flux density and loss calculation.

Key words: *Finite Element Method* (*FEM*), *Permanent Magnet Synchronous Machine, iron losses*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Броя на продадените хибридни автомобили в световен мащаб расте непрекъснато [3]. Това се дължи на предимствата, които те имат пред конвенционалните автомобили: по-нисък разход на гориво, максимален момент в целият скоростен диапазон, възможност за рекуперация и други [2] [4].Независимо от типа на използваната електрическа машина в задвижването на хибридния автомобил, към нея се налагат много, но и взаимно противоречащи си изисквания. Максимална мощност от единица обем, цели намаляване на теглото на автомобила и постигане на максимална енергийна ефективност, което от своя страна води до значителни електромагнитни и топлинни натоварвания на машината. Намаляването

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

на масата на електрическите машини се постига като се увеличи скоростта на въртене, основно чрез повишаване на честотата на захранващото напрежение. Увеличаването на честота довежда и до увеличаване на загубите в машината [5].Поради редицата предимства, които има-висока ефективност и голяма мощност от единица обем [1], една от често срещаните електрически машини използвана при хибридните автомобили е синхронната машина с постоянни магнити.

Целта на настоящия доклад е посредством моделиране на магнитното поле в синхронни машини с V-образно разположени постоянни магнити да се определи:

- зависимостта на загубите от токовото натоварване;
- разпределението на магнитната индукция и загубите в рамките на роторния пакет;
- обработка на получените резултати за бъдещото им използване, при съставяне на топлинен модел на машината.

2. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ

За определяне на разпределението на магнитната индукция и загубите в рамките на роторния лист от токовото натоварване в статорната намотка при синхронни машини с постоянни магнити е приложено числено моделиране на магнитното поле. То е извършено посредством метода на крайните елементи, като е разработен 2D стационарен модел на магнитно поле и допълнително разработени софтуерни приложение в средата на Fortran и Excel за определяне на пространственото разпределение на магнитната индукция и загубите.

3. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Като обект за изследване е синхронна машина с данни дадени в табл.1

Таблица 1

канали за полюс и фаза	-	3	стъпка на намотката	-	5
въздушна междина	мм	0,5	височина на статорен канал	мм	25,5
Аксиална дължина	мм	176	широчина на статорен канал	мм	9,8
външен диаметър на статора	мм	350	външен диаметър на ротора	мм	269
вътрешен диаметър на статора	мм	270	брой магнити в ротора	-	12

4. РАЗРАБОТЕНИ ЧИСЛЕНИ МОДЕЛИ

В много литературните източници е описано определянето на загубите в стоманата, в различни части на СМПМ [8] [6] и други. Макар че различните автори използват различни формули за специфичните загуби в стоманата, те биха могли да бъдат представени в най-общ вид по следният начин:

$$p = f(B_m, f, k_h, k_v) \quad (1)$$

където: **p**- специфични загуби $\mathbf{B_m}$- максимална магнитна индукция **f**- честота на захранващото напрежение $\mathbf{k_h}$- коефициент определящ загубите от хистерезис $\mathbf{k_v}$ - коефициент определящ загубите от вихрови токове.

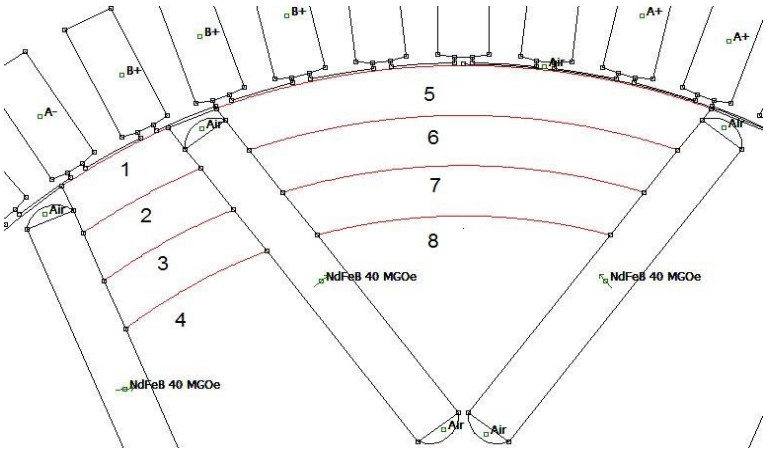
Както загубите така и коефициентите k_h k_v са честотно зависими [7]. Разделянето на изследваната област на големи участъци, би довело до значителна грешка при изчисленията, но и прекаленото раздробяване на изследваната област би изисквало много време, ако процеса не е автоматизиран. След намирането на специфичните загуби се намират и загубите в стоманата:

$$P_{cm} = \gamma V p \quad (2)$$

където: γ - специфична маса на стоманата **V**- обем на изследваната област.

За определяне на загубите е създаден модел в среда на продукта FEMM. За първоначален е приет момент 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. Разработени са варианти за три стойности статорния ток, които съответстват на еквивалентна токова плътност в канала 10 А/мм^2, 20 А/мм^2, 30 А/мм^2, както и празен ход.

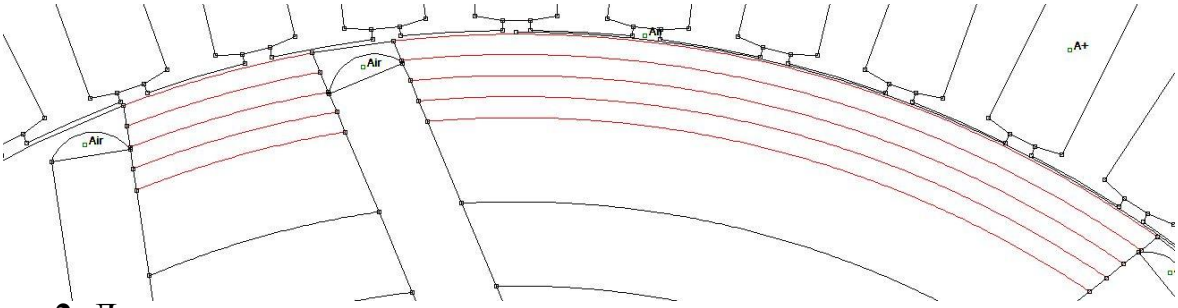
За всяка една стойност на токовите плътности са създадени и решени варианти заснемане на магнитната индукция при които ротора последователно се завърта на 3 геометрични градуса. За изчислението на магнитната индукция в модела бяха определени зони, границите на които са дефинирани с дъги както е показано на фиг.1.



Фиг.1. Дъги построени за снемането на магнитната индукция

Фиг.1. Дъги построени за снемането на магнитната индукция

В рамките на всяка дъга беше определена индукцията в 150 точки. За още по прецизни резултати, зоните с най-голямо изменение на магнитното поле, т.е. граничещите с въздушната междина, бяха намалени допълнително, както е показано на фиг.2.



Фиг.2. Допълнителни дъги построени за снемането на магнитната индукция

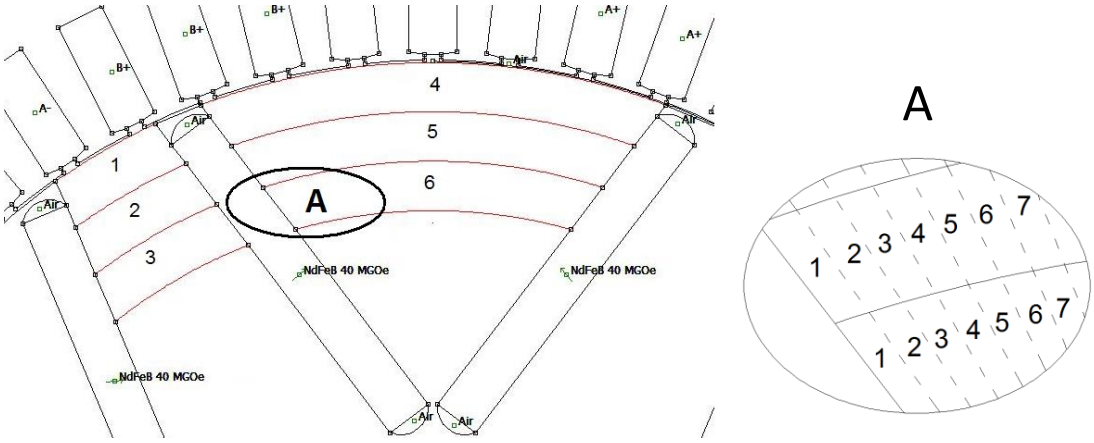
Фиг.2. Допълнителни дъги построени за снемането на магнитната индукция

Това помогна да се определи начина на разпределение на магнитната индукция. Получените резултати показват, че би могло да се приеме следното разпределение в областта между две дъги:

$$B_{121} = \frac{B_{Д11} + B_{Д21}}{2} \tag{3}$$

където $\mathbf{B_{121}}$- индукция в първа точка между първа и втора дъга $\mathbf{B_{Д11}}$- индукция в първа точка на първа дъга $\mathbf{B_{Д21}}$- индукция в първа точка на втора дъга

По аналогичен начин беше определена и индукцията между останалите дъги 2-3, 3-4, 5-6, 6-7, 7-8.



Фиг.3. Получените шест зони и разделянето им на елементарни обеми.

По този начин се получиха шест зони показани на фиг.3. (при отчитането на аксиалната дължина на машината, се получават 150 елементарни обема), с по 150 точки, за които специфичните загуби бяха определени по зависимостта (4) [9].

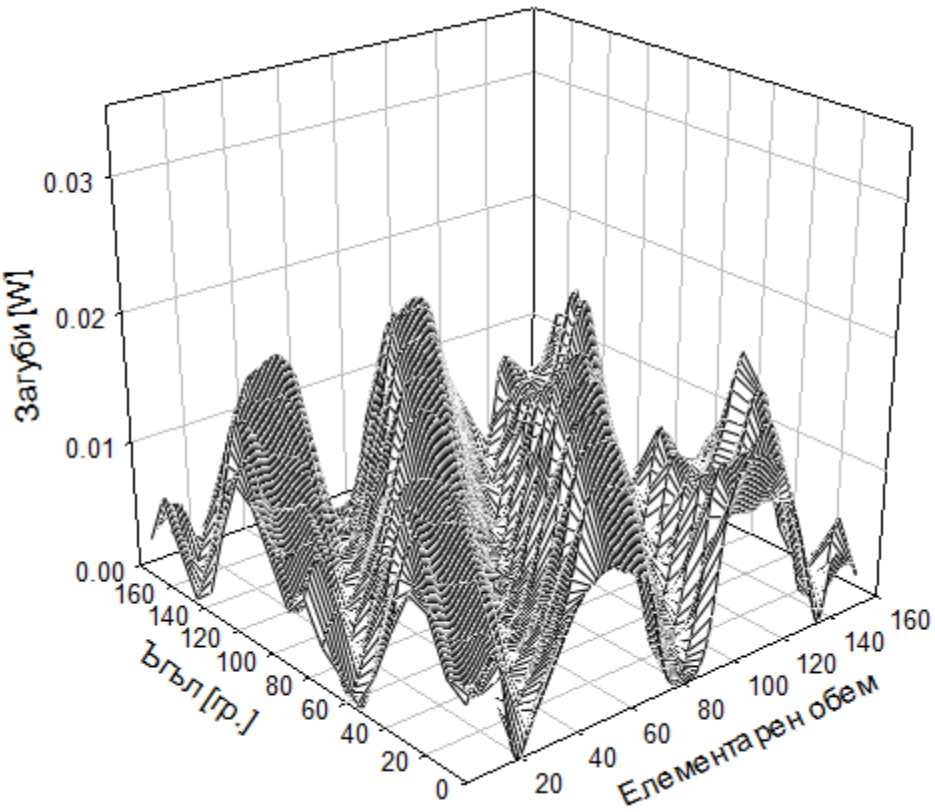
$$p = k_h B^2 k_f f + \pi^2 \frac{\sigma d^2}{6} B^2 f^2 k_f + 8.67 k_v B^{1.5} f^{1.5} k_f \tag{4}$$

където: $\mathbf{K_f}$- коефициент на запълване на магнитопровода със стомана σ- проводимост на изолацията **d**- дебелина на статорния лист

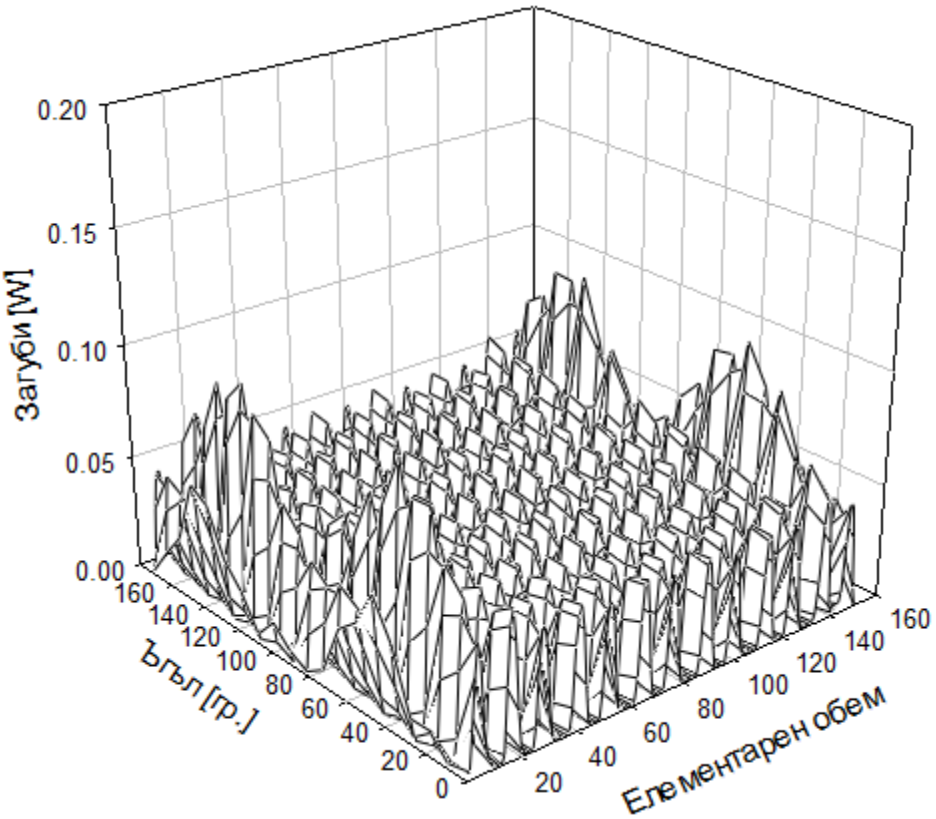
След това бяха определени и загубите в стоманата по зависимостта (2)

5. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

На фиг.4 е показана зависимостта на загубите от положението на ротора и точка от зоната, за първа зона и празен ход. Аналогичната зависимост за четвърта зона е показана на фиг.5.

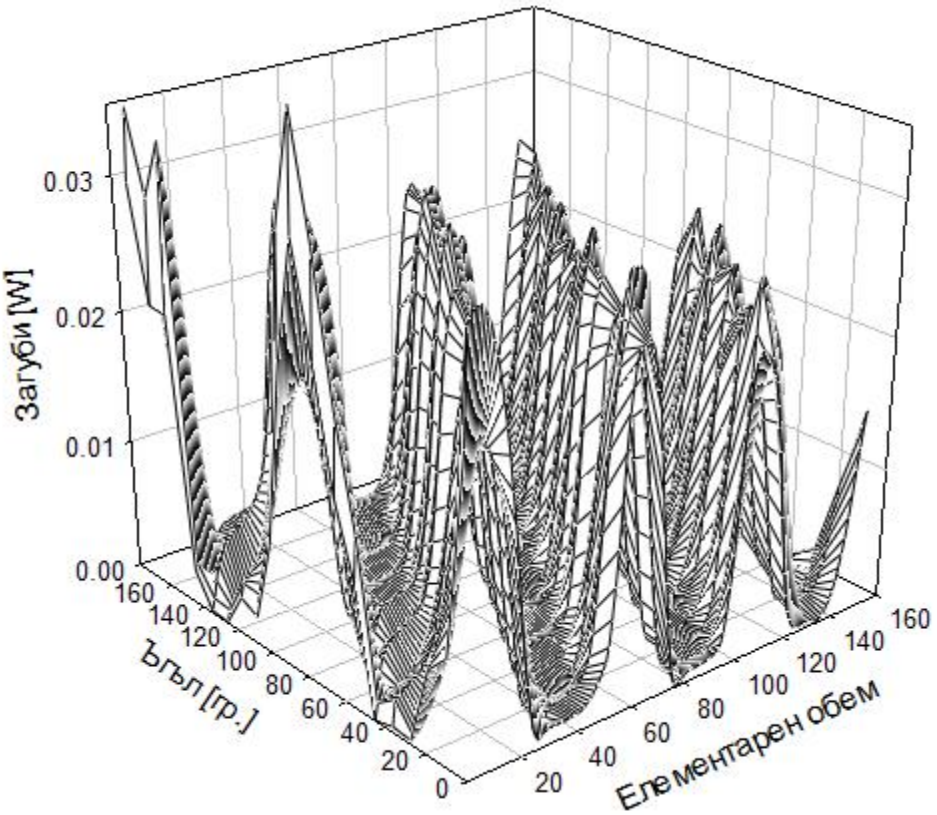


Фиг.4. Загуби в стоманата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за първа зона (ос q) и J=0A/mm^2.

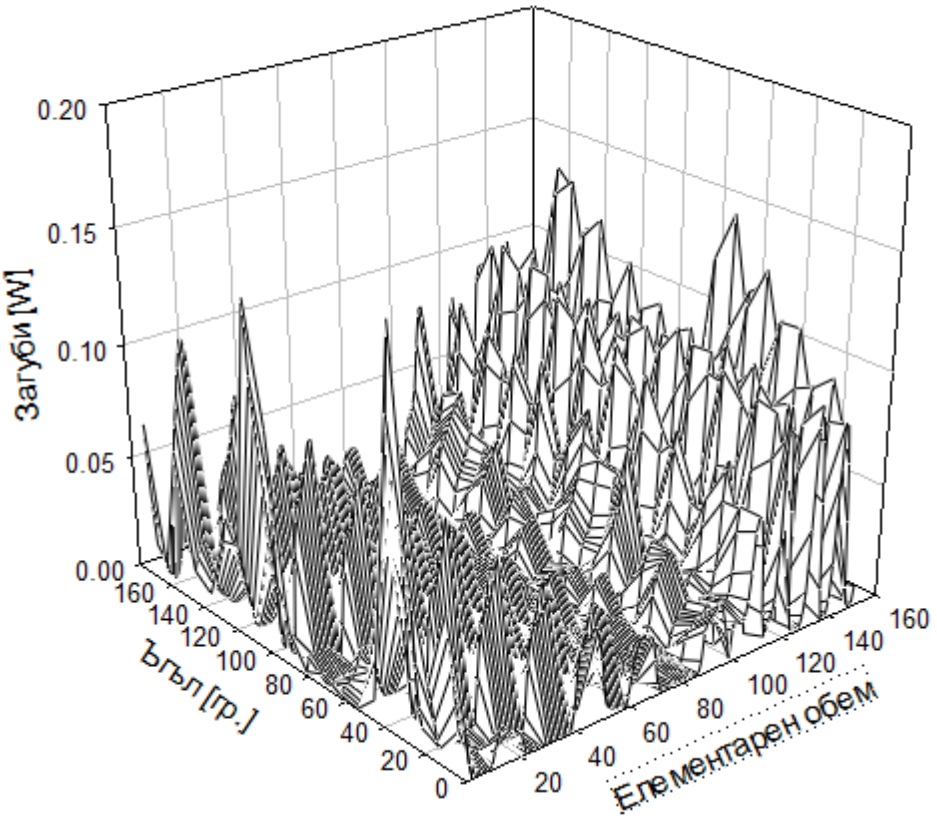


Фиг.5. Загуби в стоманата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за четвърта зона (ос d) и J=0A/mm^2.

На фиг.6 е показана зависимостта на загубите от положението на ротора и точка от зоната, за първа зона и J=30A/mm^2. Аналогичната зависимост за четвърта зона е показана на фиг.7.

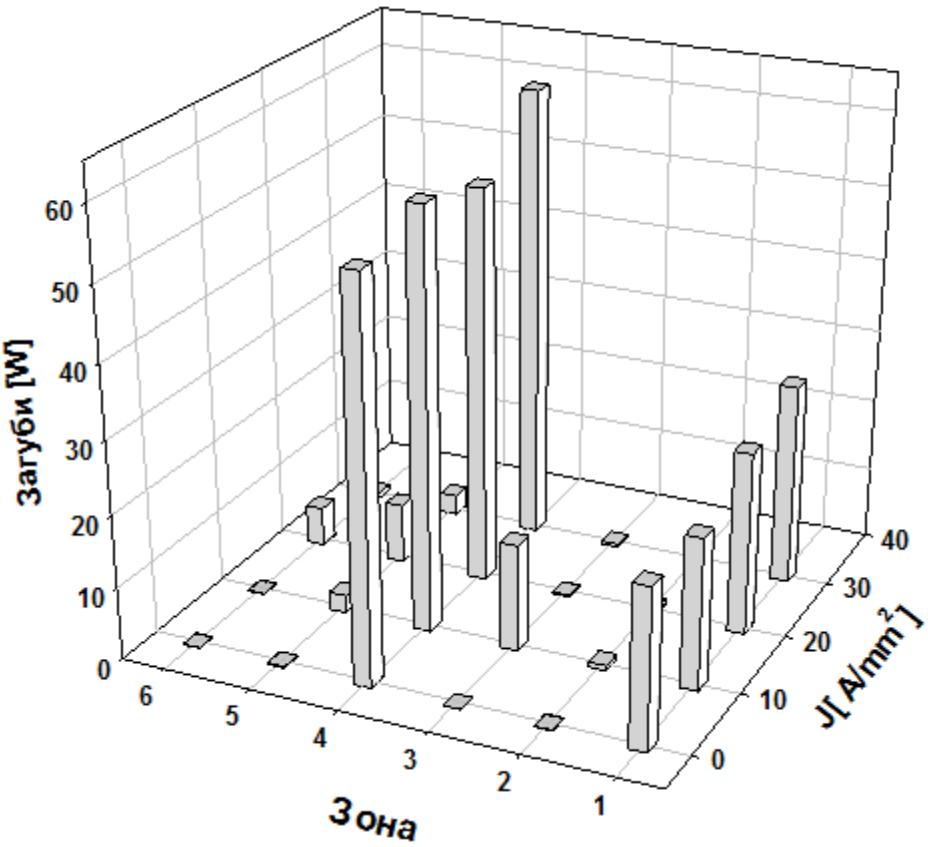


Фиг.6. Загуби в стоманата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за първа зона (ос q) и J=30A/mm^2.



Фиг.7. Загуби в стоманата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за четвърта зона (ос d) и J=30A/mm^2.

На фиг.8 е показана зависимостта на сумарните загубите в ротора, в зависимост от зоната и токовата плътност.



Фиг.8. Сумарни загуби в стоманата на ротора, в зависимост от зоната и токовата плътност.

В табл.2 е показано разпределението на загубите в различните зони на ротора при различни токови плътности.

Таблица 2

Зона/J	0	10	20	30
1	22.1	20.92	25.2	27.82
2	0.12	0.72	0.89	1.10
3	0.012	14.79	0.25	0.41
4	54.46	57.29	54.23	62.19
5	0.19	2.48	8.29	2.76
6	0.063	0.11	5.41	0.73

В табл.3 са показани сумарните загуби в ротора, при различни токови плътности.

Таблица 3

J [A/mm^2]	0	10	20	30
$P_{ст}$ [W]	76.96	96.33	94.28	95.11

На базата на проведените изследвания е изведена зависимостта (5) на $k_v=f(B_\delta)$.

$$k_v = 0.002 B_\delta^{0.699} \qquad (5)$$

7. АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1. От направените изследвания се вижда, че разликата в загубите в повърхностния слой на ротора, вследствие на пулсацията на магнитното поле, при празен ход и при натоварване е около двадесет процента. При празен ход максимума на загубите следва положението на ротора спрямо статорните зъби. По ос “d” при натоварване максимумът на загубите се премества към постоянните магнити като пиковите им стойности, дължащи се на неравномерната въздушна междина намаляват. По ос “q” загубите запазват положението си, но увеличават амплитудите си. Основната част от загубите се отделят в зоните, които са най-близко до въздушната междина.

2. Предложената формула за определяне на коефициента на загубите от вихрови токове достатъчно точно отразява физическите процеси в ротора на синхронна машина с “V” разположение на постоянните магнити, водещи до топлинни загуби.

3. Получените резултати за загубите могат да бъдат използвани при съставянето на топлинния модел на машината.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Тодоров Г., Стоев Б. Изследване на пулсациите на момента на синхронни двигатели с възбуждане от постоянни магнити. Годишник на Технически Университет – София 2016, Том 66, книга 1, стр. 285-294

[2] Ломакин, В. , А. Шабанов, А. Шабанов, К вопросу выбора мощности ДВС энергетической установки гибридного автомобиля, Журнал автомобильных инженеров, 2013.

[3] Раков, В. , Развитие парка гибридных автомобилей, Мир транспорта, 2011

[4] Adsani, A. , Hybrid Permanent Magnet Machines for Electric Vehicles, University of Manchester, September 2011.

[5] Bailey, C. , D. Saban, D. Lopez, Design and experimental evaluation of a high-speed, directly-coupled, multi- megawatt permanent magnet machine, Proceedings of the thirty-eighth turbomachinery symposium 2009

[6] Jabbar, M., A. Khambadkone, L. Qinghua, Design and Analysis of Exterior and Interior Type High-Speed Permanentmagnet Motors, Department of Electrical and Computer Engineering National University of Singapore

[7] Rilla, M., Design of Salient Pole Pm Synchronous Machines for a Vehicle Traction Application – Analysis and Implementation, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Yliopistopaino 2012

[8] Staunton, R. , S. Nelson, P. Otaduy, J. McKeever, J. Bailey, S. Das, R. Smith, PM Motor Parametric Design Analyses for a Hybrid Electric Vehicle Traction Drive Application, OAK Ridge National Laboratory, 2004

[9] Tariq, A. , C. Baron, E. Strangas, Iron and Magnet Losses and Torque Calculation of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Magnetic Equivalent Circuit, IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 46, NO. 12, December 2010

Автори: Радослав Лазаров Спасов, доц. д-р инж., кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *rls@tu-sofia.bg;* Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж., кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg;* **,** Цветомир Методиев Стоянов, инж. маг. докторант, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *cmetodiev@tu-sofia.bg;* Виктор Захариев Захариев, инж. маг. докторант, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *sun_goko@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Георги Тодоров

ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА НА КРАЙНИ ЕЛЕМЕНТИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВУСКОРОСТЕН АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Пламен Ризов

Резюме: *В доклада е показан алгоритъм за определяне на индуктираните напрежения в статорните намотки на двускоростен асинхронен двигател за средно напрежение посредством компютърно моделиране на електромагнитното поле, за което е използван метода на крайни елементи. В статорните канали са разположени две намотки с различен брой полюси. Превключването от едната към другата скорост се извършва при спрян двигател, чрез включване на захранващото напрежение към статорната намотка с по-голям или по-малък брой полюси. В незахранената намотка се индуктира напрежение със стойност различаващо се от това на захранващото напрежение.*
Ключови думи: *метод на крайни елементи, асинхронен двускоростен двигател, потокосцепление, индуктирано напрежение.*

APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD (FEM) FOR STUDY OF TW0-SPEED ASYNCHRONOUS INDUCTION MOTOR FOR MEDIUM VOLTAGE

Plamen Rizov

Abstract: *This report describes the algorithm for determining the induced voltages in the stator windings of a two-speed asynchronous induction motor for medium voltage through computer modelling of electromagnetic field, for which it is used the finite element method. In the stator channels there are two coils with different numbers of poles. The switching from one to the other speed is executed when the motor is stopped, by switching the supply voltage to the stator winding with a larger or smaller number of poles. In the unpowered winding it is inducted voltage with value different from the value of the supply voltage.*
Key words: *Finite Element Method* (*FEM*), *two-speed induction motor, flux linkage, induced voltage*

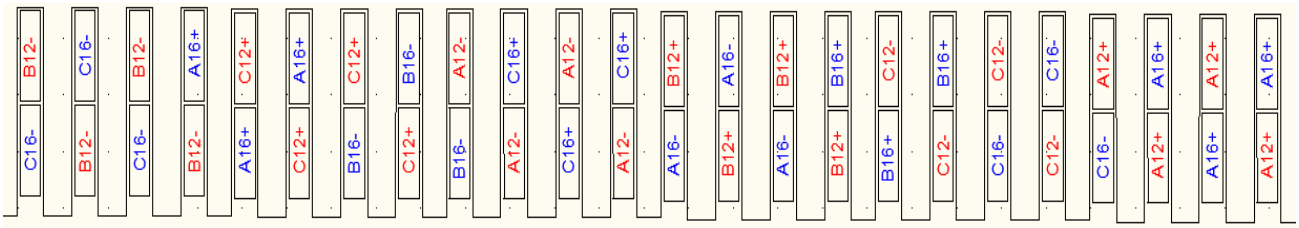
1. ВЪВЕДЕНИЕ

При двускоростните асинхронни двигатели за напрежение 6 kV в статорните канали се разполагат две отделни статорни намотки с различен брой полюси. В двигателят, който е обект на изследване намотката за по-ниска скорост е с 16

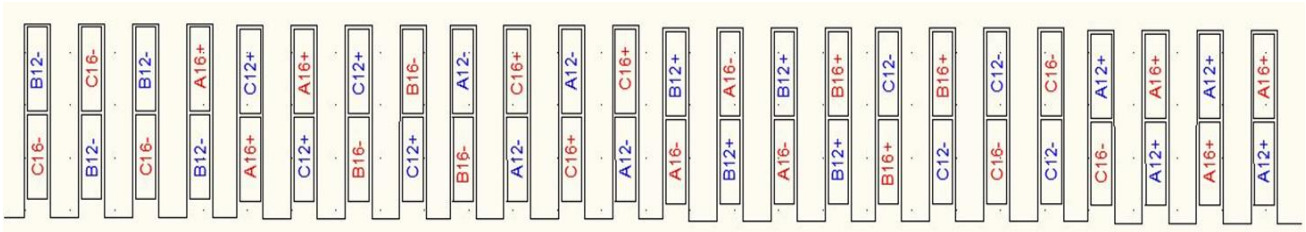
© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

полюса, а намотката за по-високата скорост е с 12 полюса. Намотките по принцип са еднослойни, но активните им страни се разполагат в каналите на статора както при двуслойните намотки. Първата активна страна на едната намотка е поставена в дъното на канала-долен слой, а другата в горния слой. Намотките са свързани в звезда с изолиран звезден център. Началата на фазите на всяка намотка са изведени в клемната кутия на двигателя. Превключването от едната скорост към другата се извършва при спрян двигател, чрез захранване на едната или другата намотка. Активните страни на секциите на двете намотки се разполагат в едни и същи канали. Във всеки канал има по две активни страни на секции, както е при двуслойните намотки, но в разглеждания случай те са от различните намотки, както е показано на фиг.1 и фиг.2.



Фиг.1. Модел на асинхронния двигател със захранване на статорната намотка с брой полюси 2p=12.



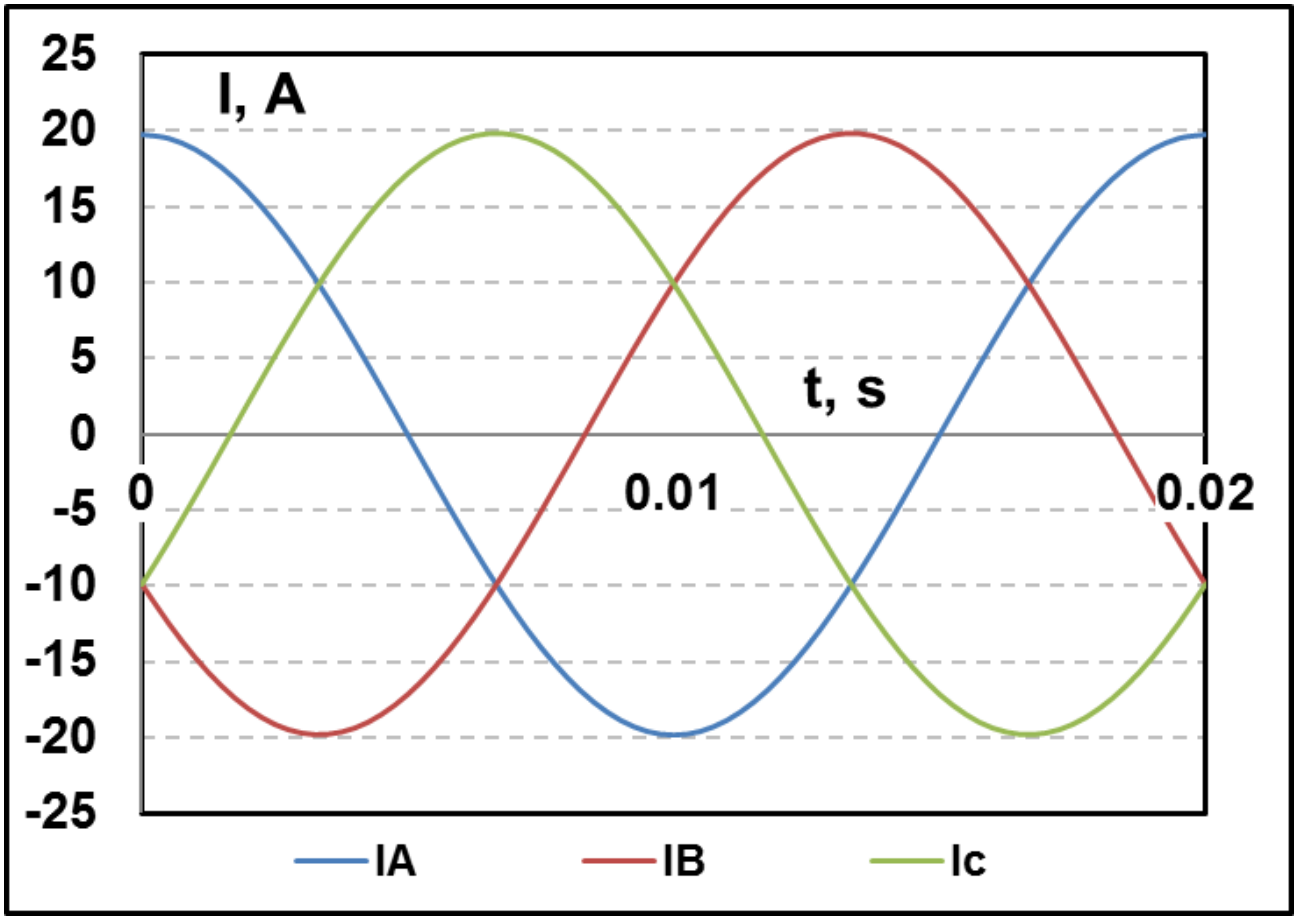
Фиг.2. Модел на асинхронния двигател със захранване на статорната намотка с брой полюси 2p=16.

При работа на която и да скорост, ток протича само във фазите на захранената намотка. При захранване на 12 полюсната статорна намотка се възбужда 12 полюсно въртящо се поле, което индуктира напрежение в фазите на 16 полюсната незахранена намотка и обратно. Въртящото се магнитно поле, възбудено от захранената 16 полюсна намотка индуктира напрежение в 12 полюсната незахранена намотка. Стойностите и изменението във времето на индуктираните напрежения зависят от това, по какъв начин потока възбуден от захранената намотка се сцепва със секциите на незахранената намотка. Възможно е във фазите на незахранената намотка да се индуктира напрежение, за което да не е оразмерена на изолацията. Това ще доведе до пробив в изолацията, в резултат на което е възможно да се получи межунавивково късо съединение с произтичащите от това последствия описани в [1]. Най-неблагоприятен ще е случая, ако захранващото и индуктираното напрежения са с различна честота. Тогава при изменение на напреженията във времето е възможно те да са дефазирани на 180 електрически градуса в секциите разположени в едни и същи канали и принадлежащи на различните намотки. Целта на настоящата статия е определяне на времевите функции и максималните стойности на напреженията индуктирани в незахране-

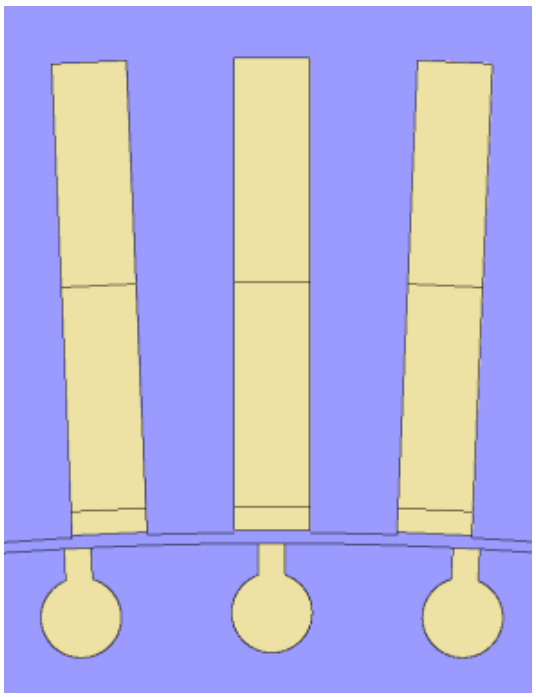
ната намотка. Тези стойности се използват за оценка на способността на електрическата изолация да запази изолационните си свойства при едновременно въздействие на напреженията в двете намотки.

2. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ

За определяне на времевите функции на потокосцепленията и индуктираните напрежения е използвано 2D компютърно моделиране на магнитното поле базирано на метода на крайните елементи. За целта е реализирано стъпково решение на електромагнитната задача в режим на идеален празен ход с времева стъпка Δt=0.5 ms. Създадени са два изходни модела на двигателя. При първият модел са зададени токовите плътности в секциите на 12 полюсната намотка обозначени на фиг.1 с индекс 12, а при вторият-секциите на 16 полюсната намотка обозначени с индекс 16. Изходните модели се използват за получаване на последователност от подмодели. При всеки от тях роторът е завъртян спрямо предходното си състояние със стъпка на геометричния ъгъл определена на базата на времевата стъпка и синхронната скорост на полето съответно при 2p=12 и 2p=16. За всяка стъпка в подмоделите са зададени моментните стойности на фазните токове, показани на фиг.3 за случая на 2p=12 и съответстващите им токови плътност.



Фиг.3. Изменение на фазните токове в модела за 2p=12.



Фиг.4. Изменение на фазните токове в модела за 2p=12.

Формата на статорните и роторните канали е показана на фиг.4. Роторните канали са с кръгла форма. Роторната намотка е изработена от медни пръти, които са заварени към накъсосъединяващите пръстени. Тъй като се моделира режим на идеален празен ход в моделите не е необходимо да се задават стойности на роторния ток.

Разработени са софтуерни приложения в средата на Excel за изчисляване на потокосцепленията и индуктираните напрежения в незахранената намотка.

3. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обектът за изследване е двускоростен асинхронен двигател използван за задвижване на водни помпи с голям дебит. Някои от данните на двигателя, използвани при изследването са дадени в табл.1.

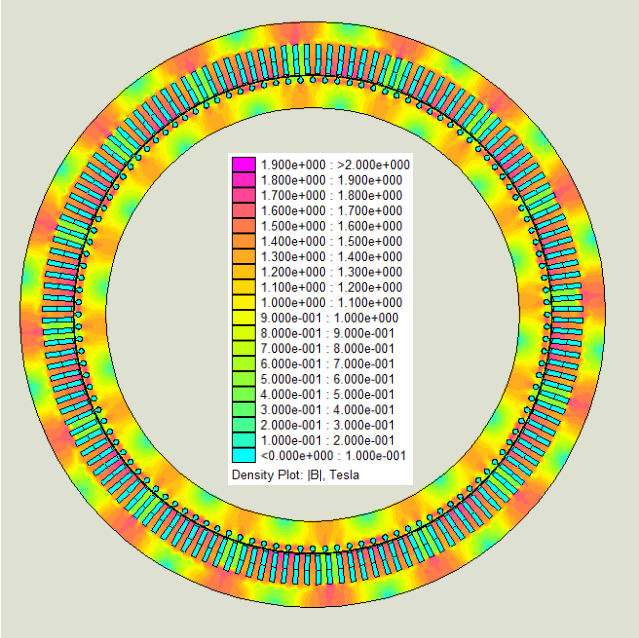
Таблица 1

-брой полюси	-	**12**	**16**
-номинална мощност	kW	800	400
-номинален ток	mm	95	60
-въздушна междина	mm	2	2
-брой навивки в секция	-	10	14
-номинални обороти	min^{-1}	494	371
-височина на статорен канал	mm	89,4	-
-широчина на статорен канал	mm	12,4	-
-аксиална дължина	mm	495	-
-външен диаметър на статора	mm	1790	-
-вътрешен диаметър на статора	mm	60	-
-клас на топлоустойчивост преди и след подмяна на изолацията на статорните намотки	-	B/F	-

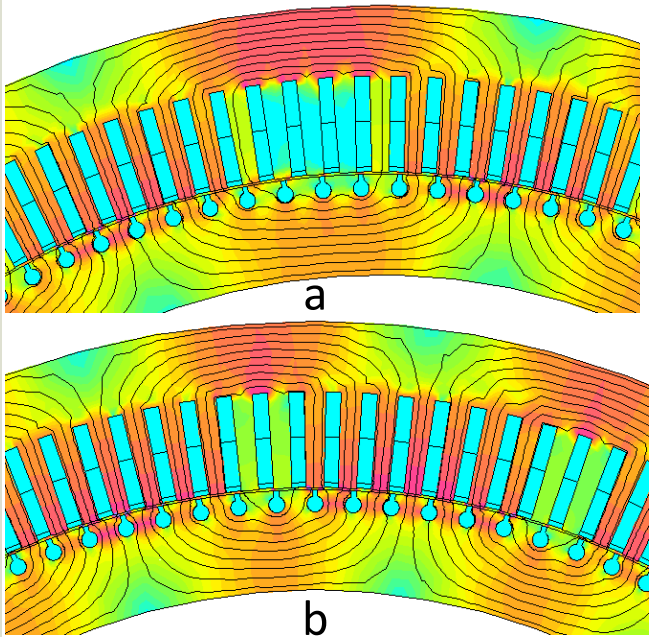
Разпределението на секциите в статорните канали, използвано в моделите за 12 и 16 полюсните намотки, разработени в програмния продукт FEMM [2] е показано на фиг.1 и фиг.2.

5. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

На фиг.5 е показано разпределението на магнитната индукция в напречното сечение на двигател при захранване на намотка с 2p-16. От този модел и неговите подмодели се определят потокосцеплениятa на фазите на намотка с 2p=12.



Фиг.5. Разпределение на магнитна индукция при 2p=16.



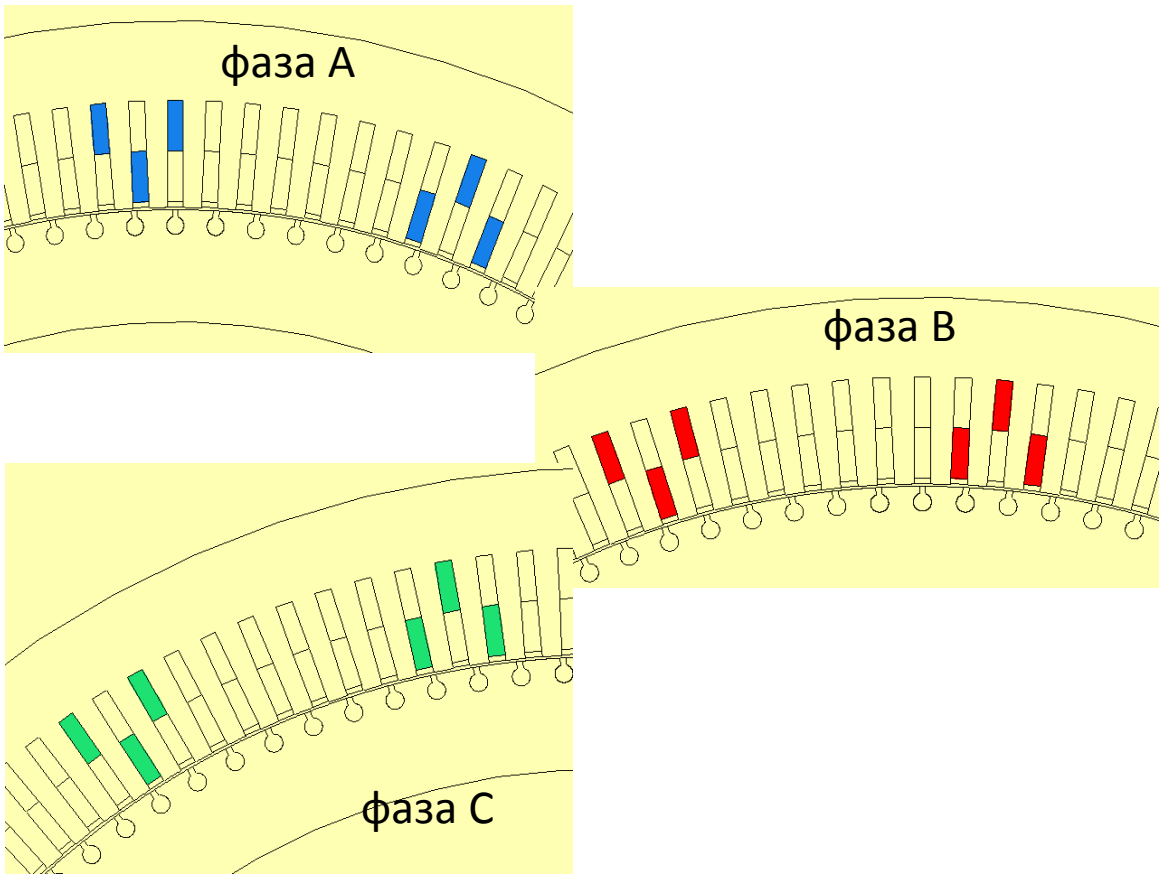
Фиг.6. Разпределение на магнитна индукция и еквипотенциалните линии на магнитния вектор потенциал при при 2p=12 (a) и 2p=16 (b).

6. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ВРЕМЕВИТЕ ФУНКЦИИ НА ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯТА

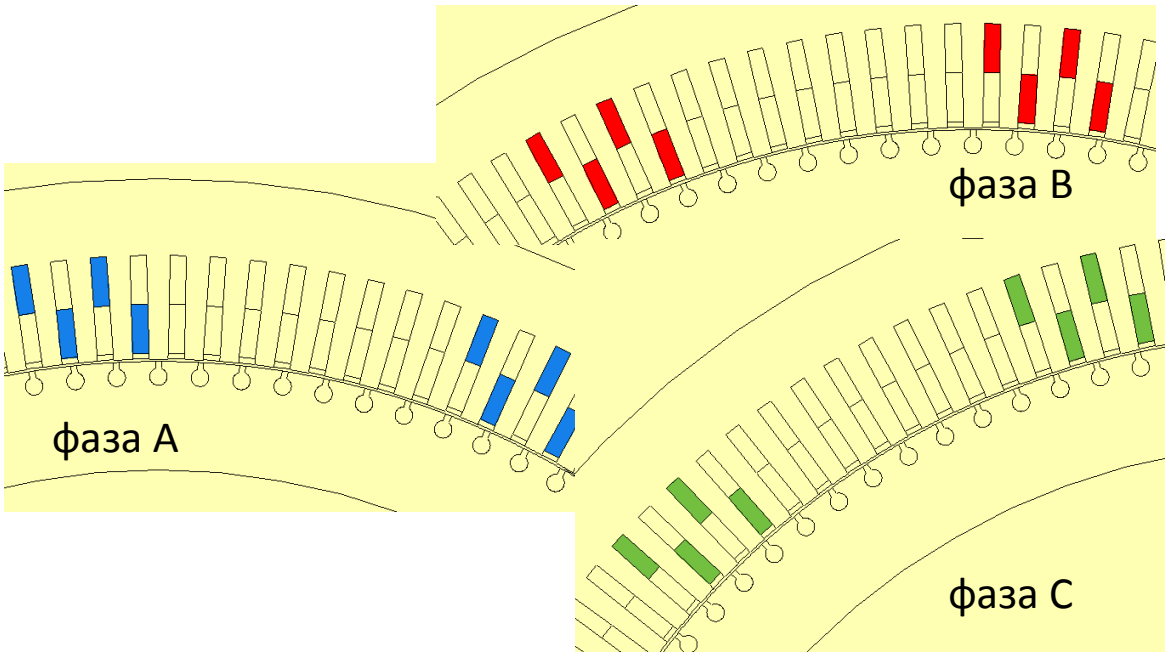
За всеки от изходните модели и неговите подмодели се определят моментните стойности на фазните потокосцепления. Те представляват една последователност от стойности, съотвестващи на последователните положения на ротора и съответните моментни стойности на фазните токове в режим на идеален празен ход. Тези последователности от стойности, представени в зависимост от времето представляват времевите функции на фазните потокосцепления. Потокосцеплението на фаза от едната намотка с потока създаван от другата намотка, е сума от потокосвцепленията на всички секции от намотката, разположени в всички полюси на двигателя. В тази сума, потокосцеплението на една сецонна група се определя, както е показано на фиг.7 за фази A, B и C на 12-полюсната намотка. Аналогично е определянето на потокосцеплението на на една секция на 16-полюсната намотка, както е показно на фиг.8. След обхождане на всички секционни групи в модела се получават числени стойности за потокосцеплени-

ята на първите и вторите активни страни на секционнните групи. Фазните потокосцепления се изчисляват съгласно:

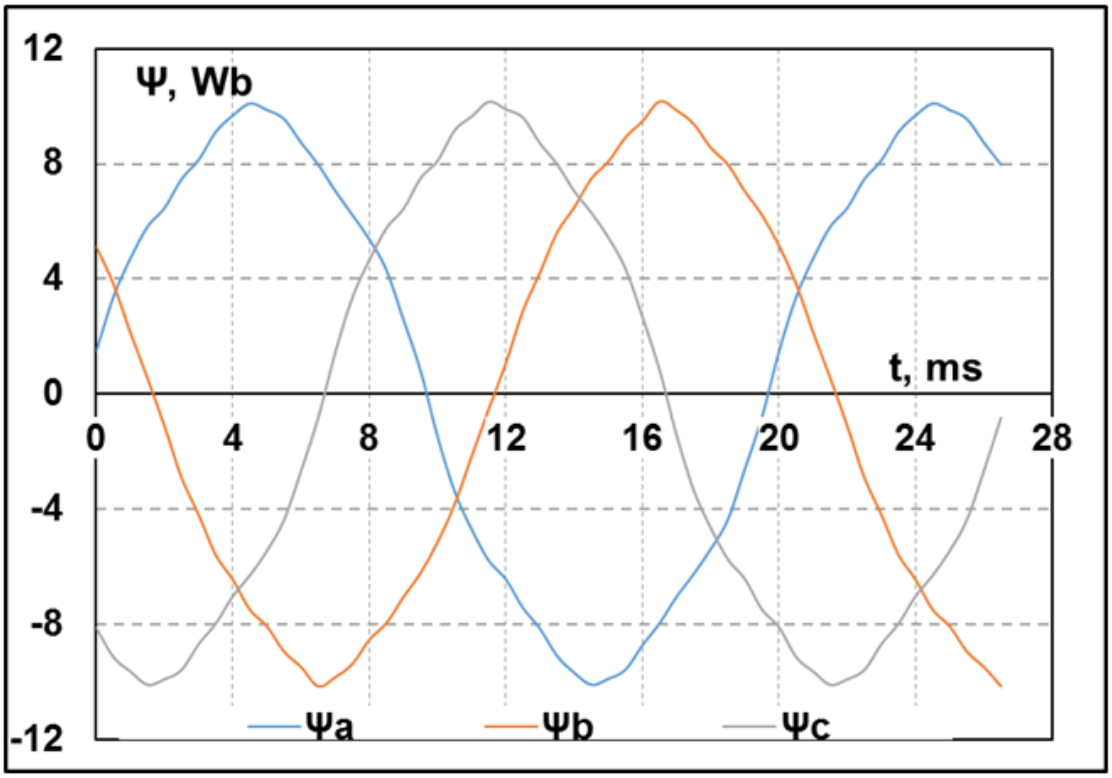
$$\Psi_{c(A,B,C)} = \sum_{i=1}^{q} \frac{w_c}{s_c} l_1 . \int_{S_{c(A,B,C)+}} A.ds - \sum_{i=1}^{q} \frac{w_c}{s_c} l_1 . \int_{S_{c(A,B,C)-}} A.ds \qquad (1)$$



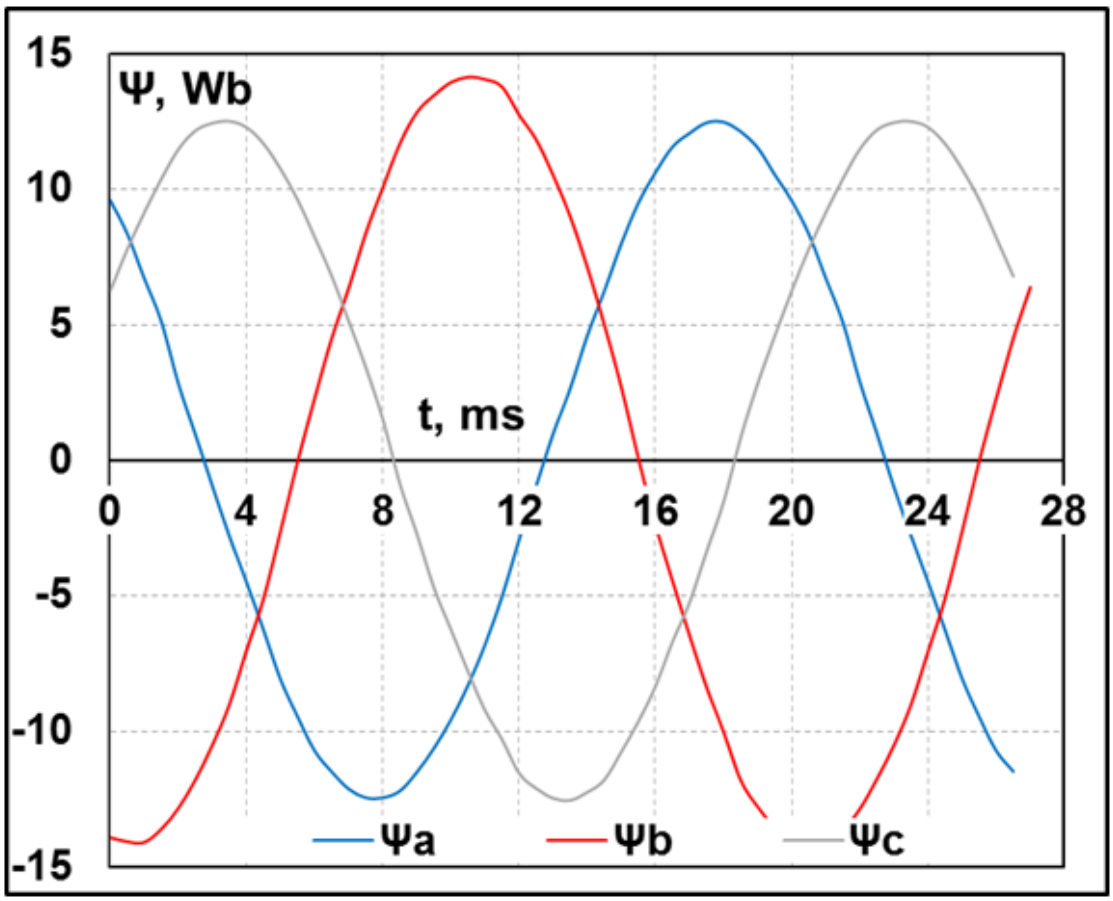
Фиг.7. Определяне на потокосцепленията на една секция от всяка фаза в намотка с 2p=16.



Фиг.8. Определяне на потокосцепленията на една секция от всяка фаза в намотка с 2p=12.



Фиг.9. Времеви функции на фазни потокосцепления на намотки с 2p=16.



Фиг.10. Времеви функции на фазни потокосцепления на намотки с 2p=12.

На фиг.9 е показано изменението на потокосцеплението на магнитния поток възбуден от захранената 16 полюсна намотка с фазите на 12 полюсната намотка, а на фиг.10 - аналогичното изменение магнитния поток, възбуден от захранената 12 полюсна намотка с фазите на 16 полюсната намотка. Стъпковото решение на електромагнитната задача обхваща интервал от 28 ms, за да се получи в първия случай пълно взаимодействие на 12 полюсното поле с 16 полюсната намотка и във втория случай обратното взаимодействие на 16 полюсно поле с 12 полюсна намотка.

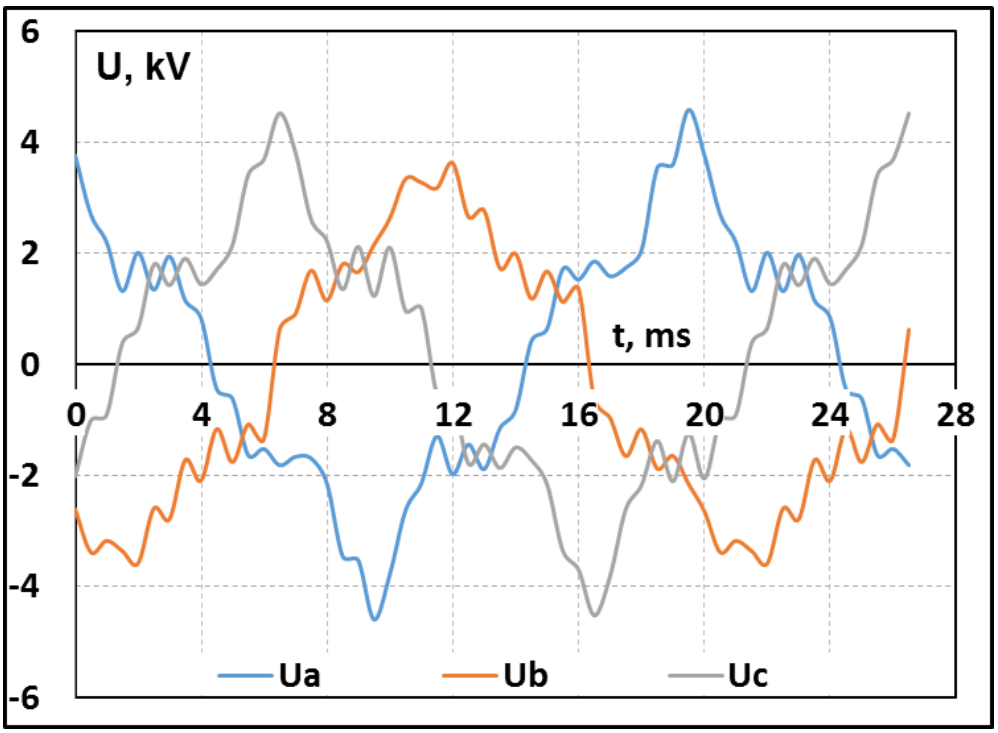
7. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ВРЕМЕВИТЕ ФУНКЦИИ НА ИНДУКТИРАНИТЕ НАПРЕЖЕНИЯ

Моментните стойности на индуктираните напрежения във фазите на незахранената намотка се определят като производни на времевите функции на индуктираните напрежения:

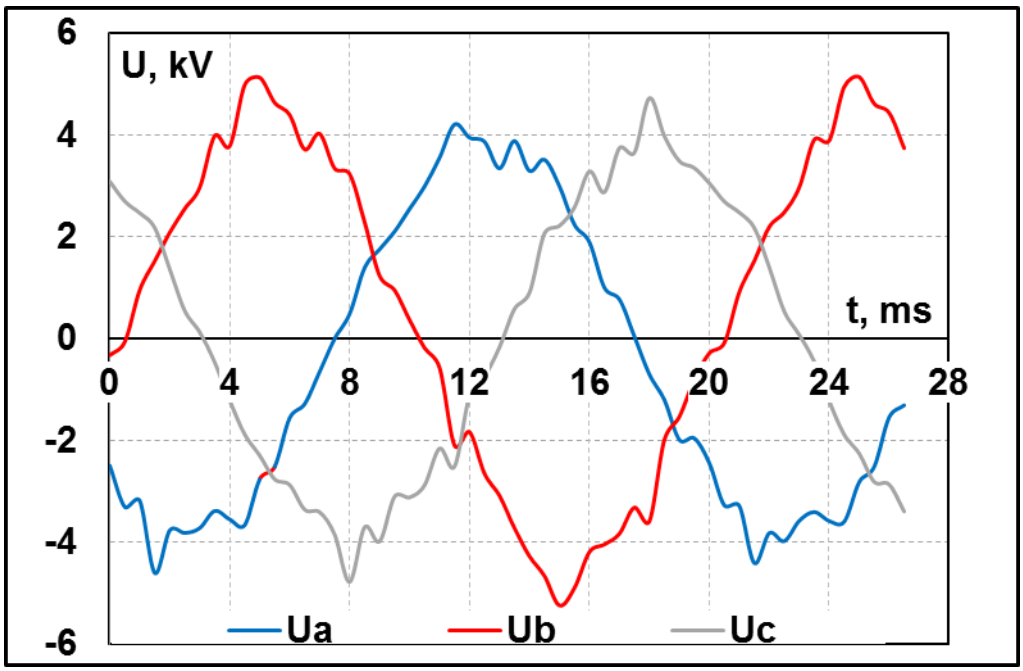
$$e_A = -\frac{\sum \psi_A\,(t2) - \sum \psi_A\,(t1)}{\Delta t}$$

$$e_B = -\frac{\sum \psi_B\,(t2) - \sum \psi_B\,(t1)}{\Delta t} \qquad (2)$$

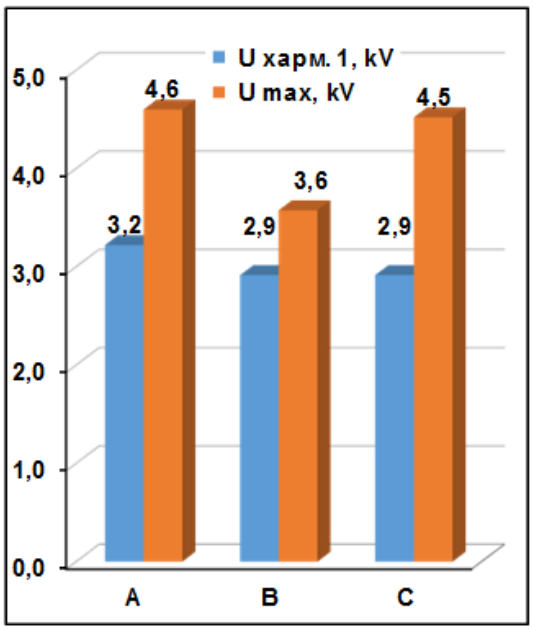
$$e_C = -\frac{\sum \psi_C\,(t2) - \sum \psi_C\,(t1)}{\Delta t}$$



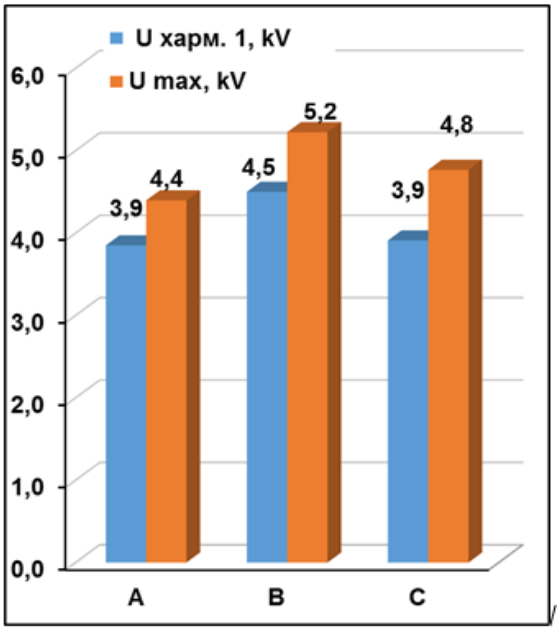
Фиг.11. Времеви функции на индуктирани напрежения в намотки с 2p=16.



Фиг.12. Времеви функции на индуктирани напрежения в намотки с 2p=12.



Фиг.13. Амплитуда на първи хармоник и максимална стойност на индуктирани напрежения в намотки с 2p=16.



Фиг.14. Амплитуда на първи хармоник и максимална стойност на индуктирани напрежения в намотки с 2p=12.

На фиг.11 е показано изменението на времевите функции на индуктираните напрежения във фазите на намотка с 2p=12, а на фиг.12 – времевите функции на индуктираните напрежения във фазите на 16 полюсната намотка.
На фиг.13 и фиг.14 е направено сравнение между амплитудните стойности на първия хармоник на индуктираните напрежения във фазите и техните максимални стойност.

6 АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1. Индуктираните напрежения в незахранените намотки са с еднаква честота, равна на честотата на захранващото напрежение – 50 Hz, тъй като в първия случай 12 полюсно въртящо се магнитно поле индуктира напрежение в 16 полюсна намотка. Във вторият случай, 16 полюсно въртящо се магнитно поле индуктира напрежение в 12 полюсна намотка.

2 Несинусоидалната форма на индуктираните напрежения се дължи на това, че в първия случай магнитния поток на един полюс (2p=12) обхваща навивки от всяка фаза, разположени в два полюса (2p=16), а във втория - навивките от един полюс (2p=12) са обхванати от потока на два полюса (2p=16).

3 Амплитудите на първите хармоници на индуктираните напрежения са с по-малки стойности от амплитудите на захранващото напрежения, докато максималните стойности на индуктираните напрежения са с близки по стойност до тях. Този факт дава основание да се приеме, че изолацията на статорните секции няма да е подложена на въздействието на напрежения по-големи от това за което е била проектирана.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Г. Тодоров, Г. Божилов. Мониторинг и анализ на статорния ток на асинхронен двигател за установяване на вътрешнонамотъчни несиметрии и къси съединения. Годишник на Техническия университет – София, том 63, книга 5, 2013, 241-248, ISSN 1311-0829

[2] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual

Автор: Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж., кат. „Електрически машини“, Електротехнически факултет, ТУ-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Радослав Спасов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ФОРМАТА НА РОТОРНИЯ ПОЛЮС ВЪРХУ НЯКОИ ОТ ПАРАМЕТРИТЕ НА СИНХРОННА МАШИНА С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Пламен Ризов

Резюме: *В доклада са публикувани резултатите от направените изследвания за влиянието на формата на роторния полюс в зоната на монтиране на постоянните магнити в синхронна машина. Изследванията са проведени чрез компютърно моделиране на електромагнитното поле, използващо метода на крайните елементи. Синхронната машина е с V-образно разположение на магнитите в роторния полюс, като укрепването им в радиално направление се осигурява от метален мост, разположен между магнита и въздушната междина. Основното му предназначение е да осигури стабилност на конструкцията на машината, но същевременно оказва влияние върху някои от електромагнитните параметри и процеси в нея.*
Ключови думи: *метод на крайни елементи, синхронни машини с постоянни магнити, магнитен поток на разсейване.*

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FORM OF THE ROTOR POLE ON THE SOME OF THE PARAMETERS OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS

Plamen Rizov

Abstract: *In this report are published the results of the executed studies of the influence of the form of the rotor pole in the zone of mounting of the permanent magnets in the synchronous machine. These studies and researches were conducted by using computer modeling of the electromagnetic field using the finite element. The synchronous machine has V-shaped disposal of magnets in the rotor pole as their reinforcements in radial direction is provided by the metal bridge located and placed between the magnet and the air gap. Its main purpose is to provide stability of the structure of the machine, but also influences some of the electromagnetic parameters and processes of the machine.*
Key words: *Finite Element Method* (*FEM*), *synchronous machines with permanent magnets, magnetic flux dissipation.*

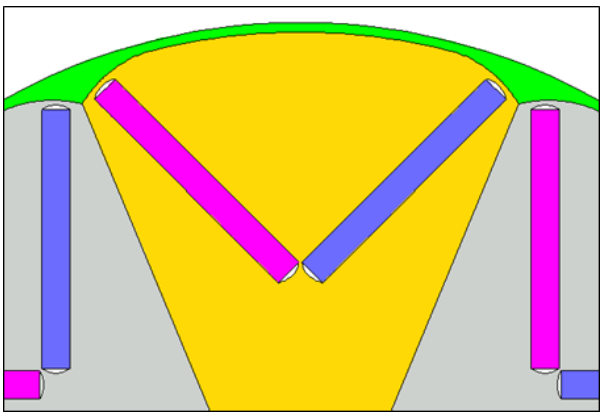
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Поради технологични съображения в синхронните машини с постоянни магнити най-често се използва ротор с цилиндрична повърхност. В зоната на монтиране на V-образно монтираните магнити откъм въздушната междина се

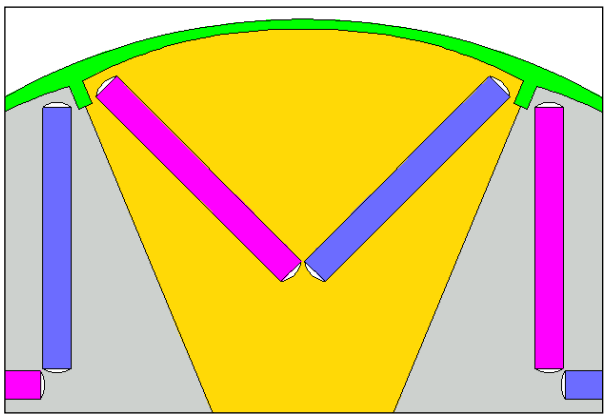
© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

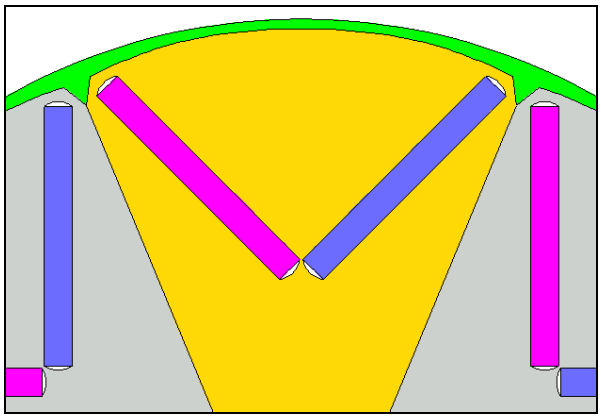
оформя метален мост. От механична гледна точка металния мост е необходимо да осигури стабилност на конструкцията, което определя неговата минимално възможна дебелина. От друга страна е необходимо да се вземат мерки за намаляване на потока на разсейване на магнитите, чрез увеличаване на магнитното съпротивление на магнитната верига, през която преминава този поток. Един от възможните начини за това е увеличаване на дължината на магнитната верига, като крайните участъци от повърхността на роторните полюси се изработват с форма различаваща се от цилиндрична. Другата възможност е постигане на високо насищане на стоманата в по-голямата част от металния мост [4]. За тази цел в пространството между роторните полюси се поставят прорези по повърхността на ротора, които имат предназначение, едновременно с увеличаване на дължината на магнитната верига, да осигурят възможност за силно насищане на стоманата на металния мост.



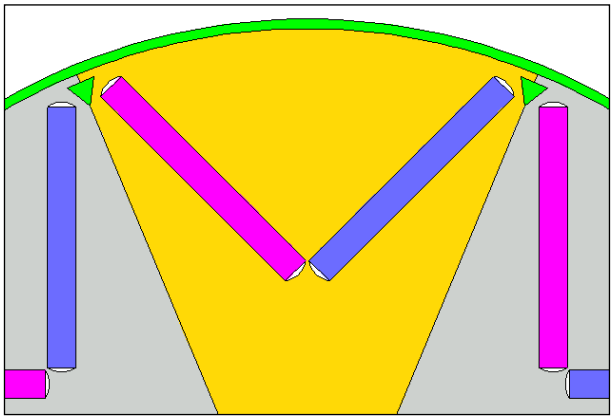
вариант 1



варианат 2



вариант 3



варианат 4

Фиг.1. Форма на металния мост укрепващ постоянния магнит откъм въздушната междина.

Целта на изследванията описани в настоящата статия е определяне влиянието на конструктивното оформяне на закрепянето на магнитите в роторния полюс върху:

- електромагнитния момент;
- потока на разсейване на магнитите откъм въздушната междина;

- разпределението на индукцията в магнитите.

2. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обектът за изследване е синхронен двигател с V- образно монтирани постоянни магнити в ротора. Данните за двигателя са взети от литературни източници. Основните от тях са показани в табл.1. Двигателя е с въздушно охлаждане, поради което токовото натоварване на намотките е от порядъка на 3-3.5 A/mm^2.

Таблица 1

-чифтове полюси	4	-	-широчина на статорен шлиц	3.2	mm
-въздушна междина	1,2	mm	-брой навивки в Канал	15	-
-аксиална дължина	270	mm	-вътрешен диаметър на ротора	60	mm
-външен диаметър на статора	364	mm	-брой магнити в Ротора	16	
-вътрешен диаметър на статора	251,2	mm	-материал на магнитите	NdFeB 40	-
-брой на статорните канали	48	-	-номинална Мощност	45	kW
-височина на статорен канал	35,5	mm	-номинален ток	78	A

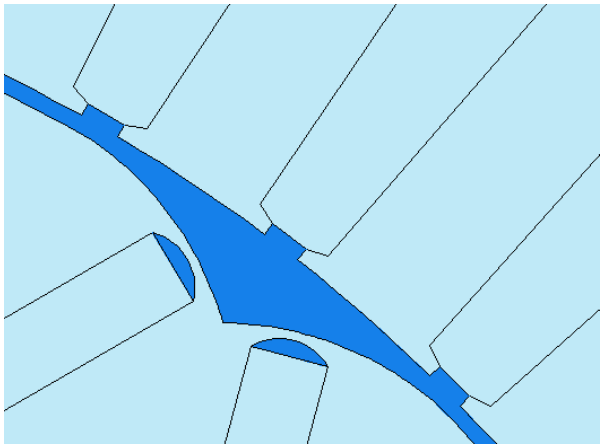
3. ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ

За извършване на изследванията е използвано 2D компютърно моделиране на магнитното поле, базирано на метода на крайните елементи. На базата на вариантите на оформяне на металния мост показани на фиг.1.

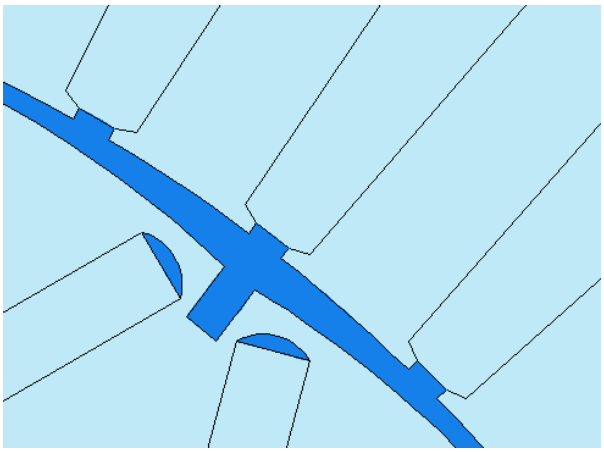
В средната на FEMM [1] са разработени са четири модела, които се различават по между си само в зоната на металния мост, укрепващ магнитите откъм въздушната междина на машината. Съставени са 2D стационарни модели на синхронния двигател с ”V”- образно монтирани постоянни магнити в ротора. в режима на натоварване на двигателя [3].

В статорните фази са зададени моментни стойности на фазните токове, съответстващи на момента от време, когато тока във фаза А е със стойност равна на амплитудната стойност на фазния ток. В моделите за стоманата на магнитопроводите на ротора и статора е използвана магнитната характеристика на стомана М250-35А.

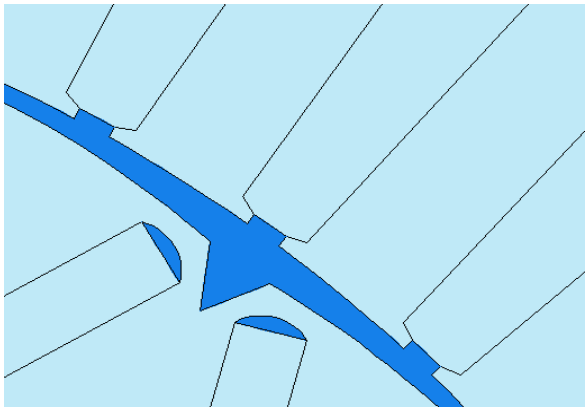
Моделите за компютърно моделиране в зоната на гранична област на полюсния накрайник са показани на фиг.2.



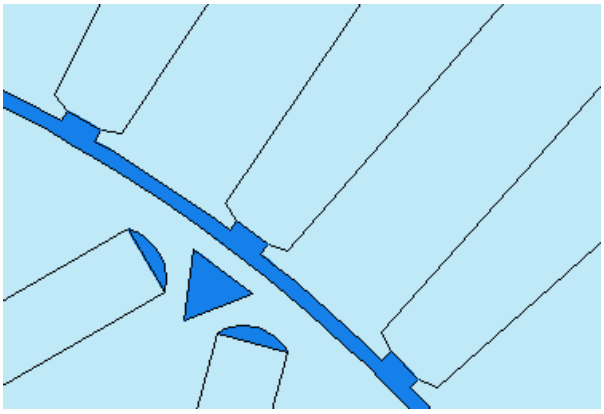
вариант 1



варианат 2



вариант 3



варианат 4

Фиг.2. Оформяне на края на полюса в моделите за компютърно моделиране.

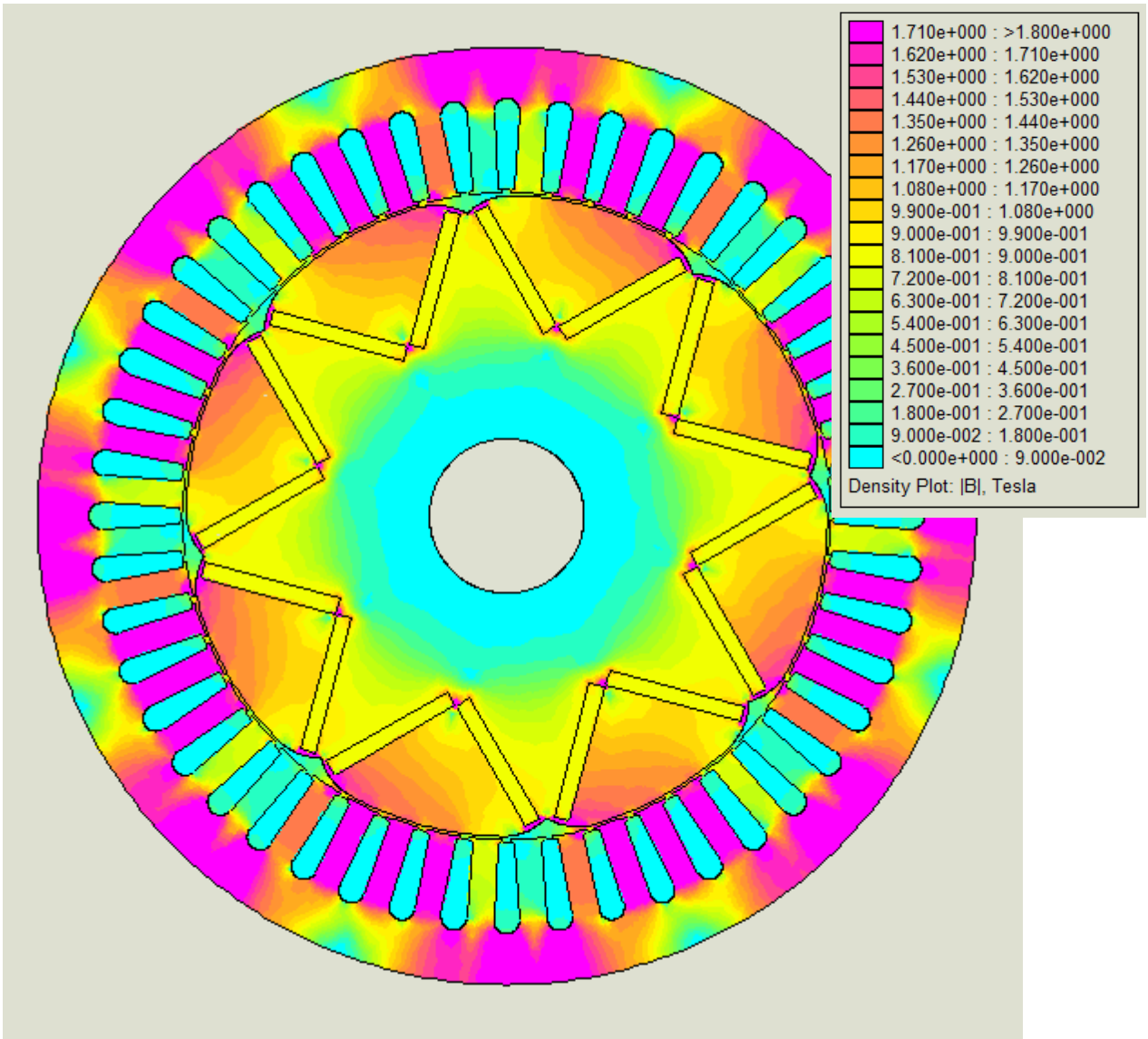
4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

На фиг.3 е показано разпределението на магнитната индукция в напречното сечение на синхронната машина с постоянни магнити при работа като двигател. Роторният полюс е оформен както е показано във вариант 1.

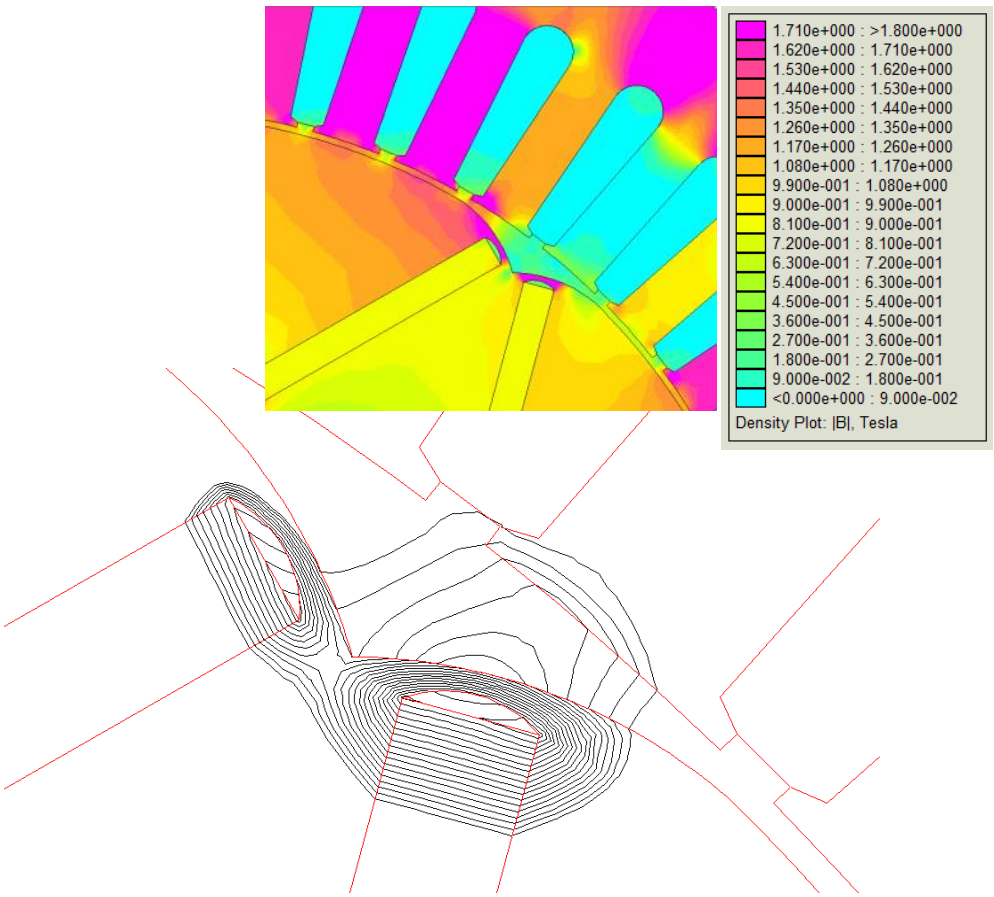
На фиг.4 е показан потокът на разсейване в случая, когато полюса в граничната зона е оформен съгласно вариант 1. Той се състои от три компоненти. Първата компонента включват потоците на разсейване, които обхващат само собствения постоянен магнит. Той може да се разглежда като собствен поток на разсейване на постоянните магнити в граничната зона между два съседни полюса. Втората компонента е потока на разсейване, който обхваща и двата магнита, но не напуска металния мост в посока към въздушната междина. Той може да се обозначи като взаимен поток на разсейване. Третата компонента на потока на разсейване е онзи поток, който е обусловен едновременно от двата постоянни магнита в граничната област, принадлежащи на два съседни полюса. Този поток навлиза във въздушната междина, достига до магнитопровода на статора, но не се сцепва с навивки от статорните фази. Големината на този поток се определя от степента на насищане на металния мост и от размера на въздушната междина

[2]. Той също е общ поток на разсейване на магнитите. От фиг.1 се вижда че, по цялата дължина на металния мост насищането на стоманата е голямо. Магнитното съпротивление на тази част на магнитната верига, ще е голямо по отношение на потока на трите компоненти на потока на разсейване на постоянните магнити.

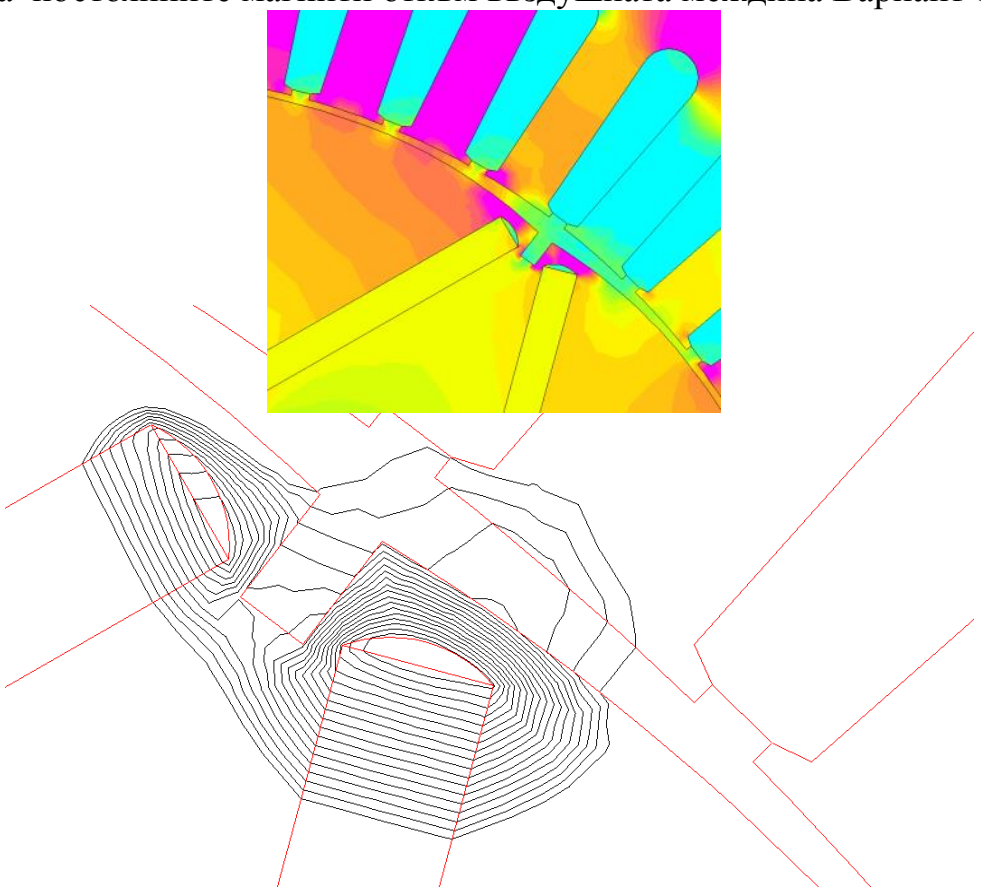
На фиг.5 е показано разпределението на потока на разсейване и разпределението на магнитната индукция в металния мост при вариант 2. Насищането на стоманата на металния мост е по-ниско и съответно магнитния поток, който преминава през въздушната междина и достига до статорния магнитопровод е по-малък. За сметка на това се увеличава взаимния магнитен поток на разсейване на двата магнита.



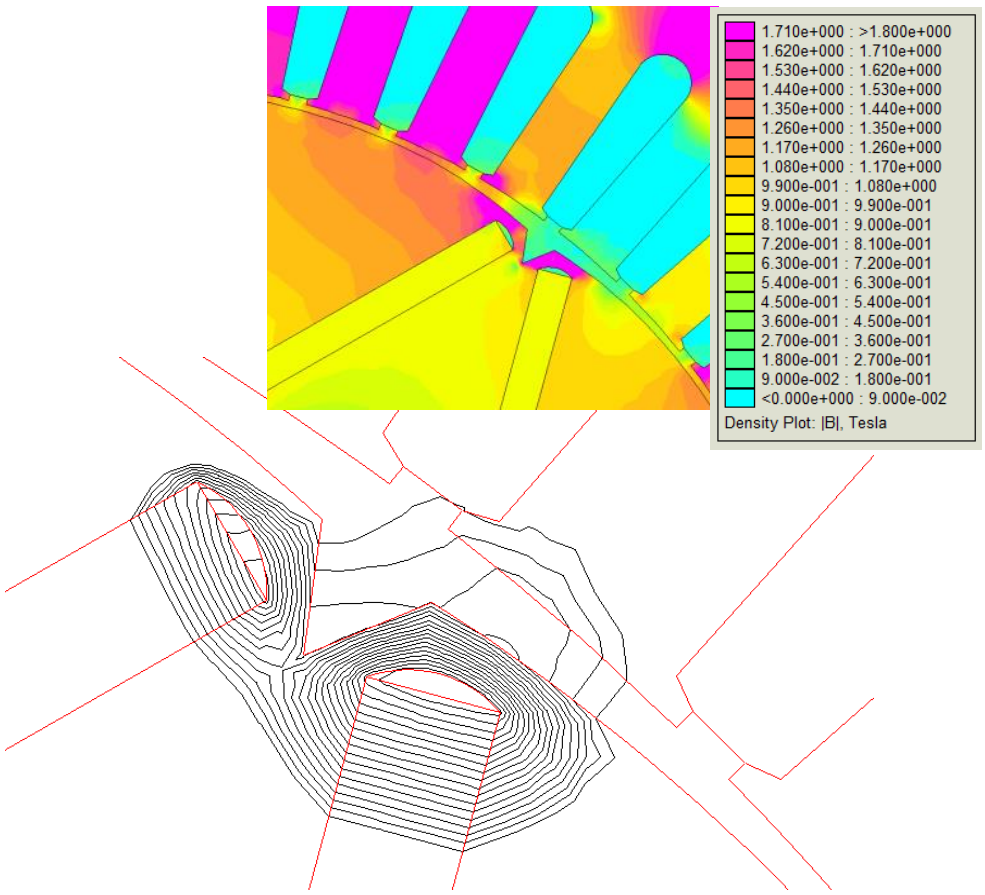
Фиг.3. Разпределение на магнитна индукция в напречното сечение на двигателя.



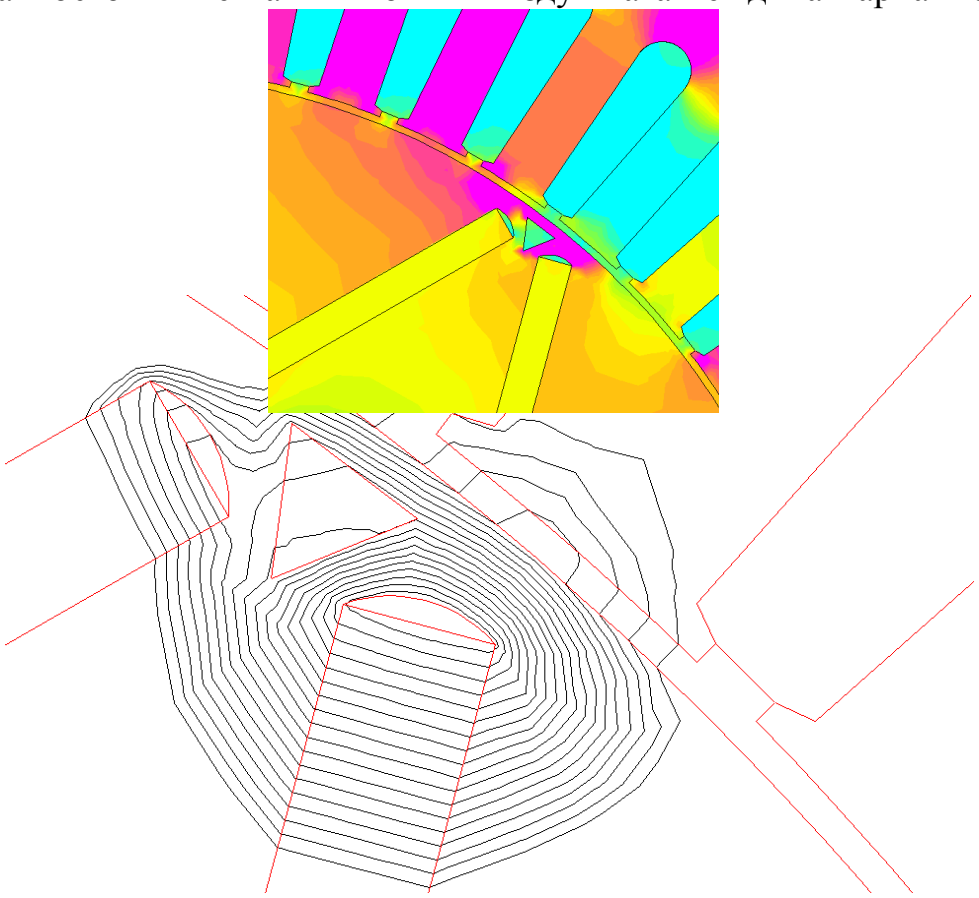
Фиг.4. Разпределение на магнитната индукция и потока на разсейване на постоянните магнити откъм въздушната междина Вариант 1.



Фиг.5. Разпределение на магнитната индукция и потока на разсейване на постоянните магнити откъм въздушната междина Вариант 2.



Фиг.6. Разпределение на магнитната индукция и потока на разсейване на постоянните магнити откъм въздушната междина Вариант 3.



Фиг.7. Разпределение на магнитната индукция и потока на разсейване на постоянните магнити откъм въздушната междина Вариант 4.

На фиг.6 са показани потока на разсейва-не и разпределението на магнитната индукция в зоната на металния мост, когато той е оформен съгласно вариант 3. На-лице е аналогично състояние по отношение на потока на разсейване и насищането на металния мост, както при вариант 2.

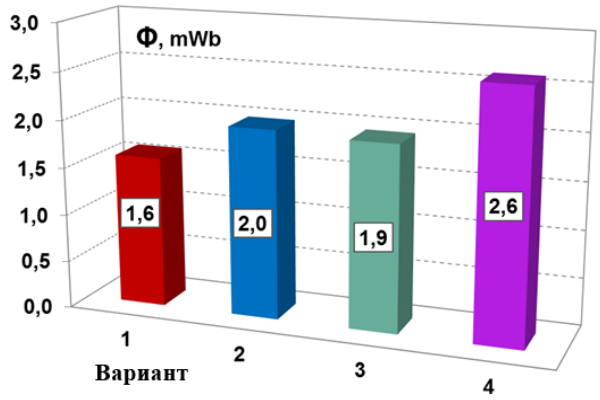
На фиг.7 са показани аналогични резултати както полюса в граничната зона е оформен съгласно вариант 4. В този случай роторът е с цилиндрична форма, а в междуполюсното пространство е изрязан триъгълен прорез. Над него е оформен допълнителен метален мост, в резултат на което въздушна-та междина в тази зона е с малък размер. Допълнителният скъсява дължината на магнитната верига за потока на разсейване. По-голяма част от потока преминава през металния мост, а по-прореза потока на разсейване е незначителен. Определянето на стойностите на по-тока на разсейване на постоянните магнити се извършва в средата на програмния продукт FEMM. Трите негови компоненти се определят по отделно.

Първо се определят собствените потоци на разсейване на двата магнита. След това се определя взаимния магнитен поток, преминаващ през металния мост и накрая потока преминаващ през въздушната междина и достигащ до статорния магнитопровод. Сумата от тези потоци при четирите изследвани варианта на оформяне на полюса са показани на фиг.8.

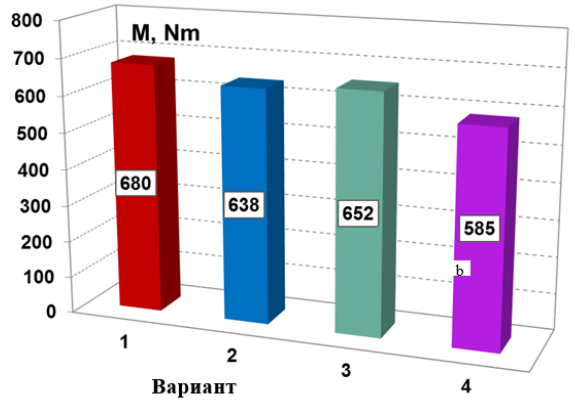
От тези резултати се вижда, че потока на разсейване е най-малък при вариант 1 на оформяне на полюса в граничната зона, а с най-голяма стойност той е при вариант 4. Варианти 2 и 3 са със съизмерими стойности на по- тока на разсейване.

На фиг.9 са показани стойностите на електромагнитния момент на синхронната машина работеща в режим на двигател.

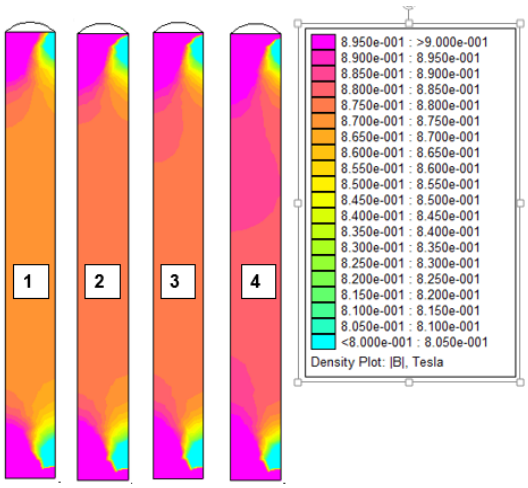
На фиг.10 е демонстрирано влиянието на оформянето на полюсния накрайник върху разпределението на магнитната индукция във постоянните магнити. Разлика се наблюдава единствено при вариант 4



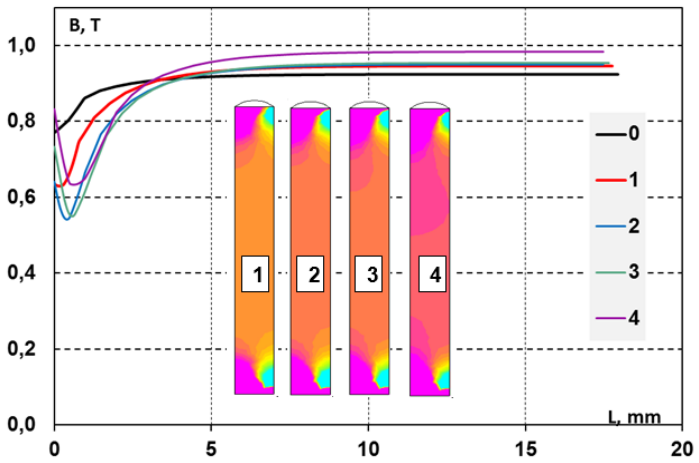
Фиг.8. Поток на разсейване на постоянните магнити откъм въздушната междина на синхронната машина



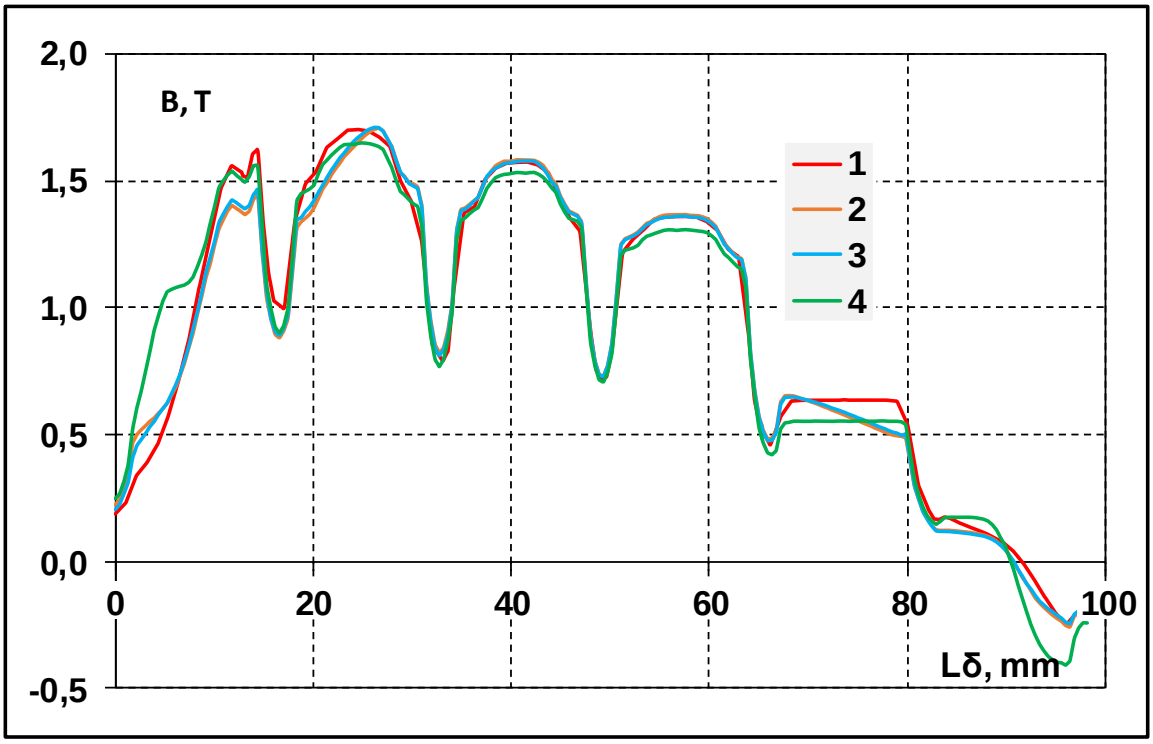
Фиг.9. Електромагнитен момент на синхроната машина



Фиг.10. Разпределение на магнитна-та индукция в постоянните магнити при различните варианти.



Фиг.11. Изменение на индукцията по височина на постоянните магнити.



Фиг.12. Разпределение на магнитната индукция във въздушната междина.

На фиг.11 е показано изменението на магнитната индукция в постоянните магнити, по контур разположен във вътрешността на магнита. Началото на координатната система лежи в горния десен край на магнитите показани на фиг.10. Дължината на контура (абцисна ос) е до средата на по височината на магнитите. С индекс 0 е обозначена кривата, показваща разпределението на индукцията при отсъствие на ток в статорните фази за вариант 1. Това разпределение се използва като основа за сравнение относно разпределенията за варианти от 1 до 4. На фиг.12 е показано разпределението на магнитната индукция във въздушната междина в границите на един полюс.

6 АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1. Вариант номер едно за оформяне на металния мост откъм въздушната междина осигурява на най-голям електромагнитен момент на синхронната машина, тъй като магнитния поток на разсейване на постоянните магнити е с най-ниска стойност. Това се дължи на факта, че при него е получено най добро съчетание на дължината на магнитната верига и насищане на стоманата в металния мост, при което се осигурява най-висока стойност на магнитното и съпротивление. В резултат на което потокът на разсейване на магнитите е най-малък и съответно потокът по надлъжната ос на синхронната машина е най-голям.

2 Най-значимо се изменя разпределението на магнитната индукция по височина на постоянните магнити при вариант 4, което е следствие на по-голямата стойност на потока на разсейване.

3 Различните варианти на оформяне на металния мост не-оказват съществено изменение на пространственото разпределение на индукцията във въздушната междина, а само на потоците на разсейване.

ЛИТЕРАТУРА

[1] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual

[2] Todorov G., B. Stoev. Saturation Effects on the Parameters of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Rotor Configuration. Applied Electromagnetic Engineering for Advanced Materials from Macro- to Nanoscale, Materials Science Forum, DOI:10.4028, ISSN: 0255-5476, Vol. 856, pp 257-262, 2016, Trans Tech Publications, Switzerland.

[3] Y. Chen P Pillay, An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation 2002 IEEE

[4] Г. Тодоров, Б. Стоев. Влияние на размерите на феромагнитните мостчета върху параметрите на синхронни машини с възбуждане от постоянни магнити. Годишник на ТУ София, том 66, книга 1, 2016, 295-303, ISSN 1311-0829.,

Автор: Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж., кат. „Електрически машини“, Електротехнически факултет, ТУ-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Радослав Спасов

ТЯГОВИ ДВИГАТЕЛИ НА ЕЛЕКТРОМОБИЛИ

Емил Соколов

Резюме: *Разгледани са конструктивните и технологичните характеристики на различни тягови двигатели в електрическите превозни средства, които се произвеждат сега. Анализирани са предимствата и аргументите за избор на определени решения и концепции при задвижването на електромобили.*
Ключови думи: *асинхронен двигател, синхронен двигател с постоянни магнити*

ELECTRIC CAR TRACTION MOTORS

Emil Sokolov

Abstract: *The main design and technology features of different traction motors in today's manufactured electric vehicles are reviewed. The advantages and the arguments for choice of certain principal solutions and concepts by the electric car drive are analyzed.*
Keywords: *induction traction motor, permanent magnet synchronous motor*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Последното десетилетие бележи значителен ръст на инвестициите, производството и продажбите на електрическите превозни средства – електрически и хибридни автомобили. Увеличава се броят на зарядните станции. Големите автомобилни компании в света имат собствени конструкторски звена и производствени мощности за електромобили. Създадена е компанията Tesla Motors, специализирана само в производството на електромобили. Прогресът се характеризира с разработването на нови оригинални конструкции и високи технологии. Впечатлява огромният брой на патентите – най-вече за акумулаторните батерии, а също за двигателите, силовата електроника и системите за управление. Сега изследванията са насочени главно към достигане на по-голям пробег и по-малко време за зареждане на батерията, повишаване мощността на двигателя и капацитета на батерията при същите или по-малки размери, по-висок кпд на задвижването, намаляване на цената и др. Основният принцип на първоначалния замисъл и избраната технология на тяговите двигатели обикновено се запазват, а непрекъснато се извършват многобройни подобрения и модификации.

В настоящата работа е направен преглед на конструкциите на тяговите двигатели в съвременните електромобили, технологичните особености при производството им и аргументите за тяхния избор. При анализа са използвани материали на фирмите и техническите издания, патенти и обзорни публикации.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

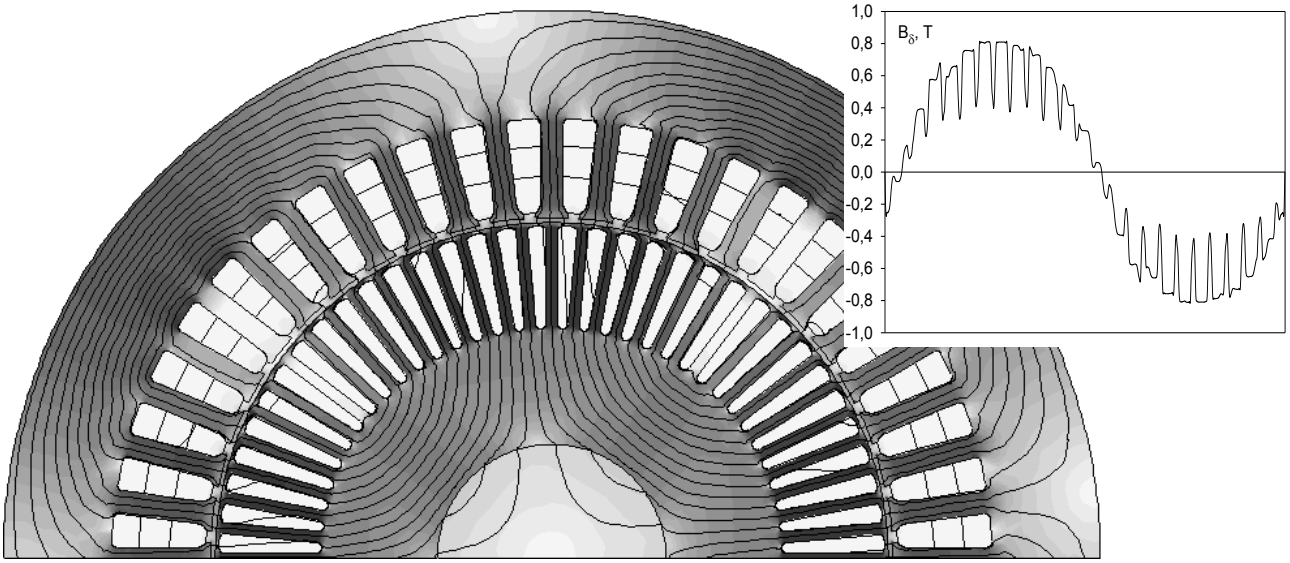
Положителната тенденция в развитието на електрическите превозни средства е изключително благоприятна за екологичното бъдеще на планетата. Оптимистичната прогноза сочи, че темпът на това развитие ще се запази и даже ще се ускори.

2. АСИНХРОННИ ТЯГОВИ ДВИГАТЕЛИ

Електромобилите на Tesla Motors се задвижват от трифазни асинхронни двигатели с меден роторен кафез. Най-популярната кола на компанията Model S се произвежда от 2012 г. Базовият модел 90D с батерия 90 kWh има пробег 557 km (NEDC) или 473 km (EPA) [1]. Максималната скорост е 250 km/h, ускоряването от 0 до 60 мили в час (0 – 96,6 km/h) става за 4,2 s. Максималната мощност на предния и задния двигател е 193 kW (Dual Motor), ограничена от батерията до 155 kW. Модел P100D (2016 г.) с още един двигател и батерия 100 kWh се ускорява до 100 km/h за 2,7 s. Ще отбележим, че мощността на двигателя зависи от състоянието на батерията, от околната температурата, от пътя и от много други фактори. Следователно мощността на двигателя в електромобила е различна от мощността му при индивидуална работа.

С максимален момент 329 N.m двигателите на Model S, 90D, могат да работят до 6000 об/min. Максималната скорост е 14000 об/min.

Двигателите са четириполюсни, което означава, че при 6000 об/min честотата е около 200 Hz. Това е предимство спрямо многополюсните тягови двигатели, чиято честота е 2-3 пъти по-висока. Пакетите са изработени от електротехническа стомана с дебелина 0,5 mm. фиг.1 дава представа за напречната геометрия и разпределението на магнитното поле в двигателя.



Фиг.1. Магнитно поле и индукция във въздушната междина.

Статорните канали са 48, а роторните – 68. Формата им е крушовидна, зъбите са с успоредни стени. Статорната намотка е насипна, трислойна, с два паралелни клона и голям брой паралелни проводници. Челните съединения са заляти изцяло с епоксидна смола с висока топлопроводимост.

Патентът на статорната намотка [2] се отнася за трислойна намотка с групи от 6 концентрични секции на полюсно деление. Всеки слой съдържа една фаза и за-

ема всички статорни канали. Съседните секционни групи са навити в обратна посока. Намотките на трите фази не се преплитат, симетрични са и са изместени на 60 ел. град. Челните съединения са скъсени максимално. Секциите са подходящи за навиване и полагане с автомати при голям коефициент на запълване на каналите [3]. Недостатък е по-малкият коефициент на намотката. Модификация на схемата е изпълнена с 3 концентрични секции в група, като вътрешните секции са с по-малък брой на навивките от външните [4]. Анализът с МКЕ показа, че индуктивността на разсейване на патентованата схема е по-малка от тази на еднослойна или двуслойна намотка. Това води до повишаване на максималния момент и претоварващата способност. Кривата на магнитната индукция във въздушната междина се доближава до синусоида.

Роторните канали са затворени към въздушната междина. Меднят роторен кафез на двигателите Model S е заварена конструкция [5]. Увеличеният брой на роторните канали подпомага топлоотдаването на намотката.

В интервю, водещият дизайнер от R&D на фирмата Laskaris [6] казва: „Ние можем да създадем различни геометрии и намотки на двигателя и да ги анализираме с FEA много бързо. С голям компютър изследваме повече виртуални модели в паралел и правим много голям брой изчисления. Можем да оценим един хипотетичен мотор преди да сме го произвели – загубите, кпд, възможните характеристики, пулсации на момента, загряване и всичко, което ни интересува. Така постигаме най-добрата оптимизация – екзотични качества без използването на екзотични материали и екзотични производствени методи".

След 2014 г. двата двигателя на задната група са заменени с един по-малък двигател, а втори двигател е монтиран към предните колела. Новите двигатели на модел 90D са по-малки и по-леки от предишното задвижване на задните колела. При дву-двигателното задвижване (all-wheel drive) моментът на предните и задните колела се управлява независимо според необходимата мощност във всеки един момент [7, 8]. Така общият кпд на задвижването се увеличава. Подобрява се ускоряването на колата и движението при всякакви предизвикателства на времето и пътя.

Няма сведения за принципа, приложен при регулирането на двигателите. Предполага се, че е използвана система на директно управление на момента (Direct Torque Control – DTC). Възможна е и друга система [9].

В завода на Тесла във Fremont с помощта на 160 робота се произвеждат седмично по 1000 коли от Model S [10]. Компанията Tesla Motors работи по подобряването на литиево-йонните акумулаторни батерии за електромобилите си в сътрудничество с Panasonic [11, 12]. В Рино, Невада, главният директор Elon Musk CEO, откри все още незавършения завод Gigafactory, чиято планирана продукция е 500000 коли годишно. Пълният капацитет трябва да бъде достигнат през 2018 г. Цялата електроенергия за Gigafactory ще бъде получавана от възобновяеми енергийни източници [13].

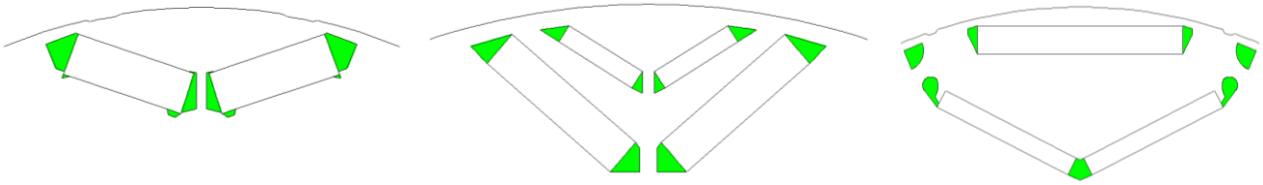
Електромобилът Toyota RAV4 EV се задвижва с асинхронен двигател на Tesla (максимална мощност 115 kW, батерия 41,8 kWh, пробег 166 km) [14].

Накратко могат да бъдат посочени следните предимства на тяговите асинхронни двигатели [29]. Те са надеждни, подходящи за автоматично производство, без

редкоземни магнити. При добро съчетание с управлението имат отлична динамика. Скоростта за работа в първа зона с постоянен момент е висока. Максималната скорост във втората зона също е висока. Работят много добре в режим на рекуперация. Недостатъци са по-сложното управление и по-ниските стойности на кпд, особено при слабо натоварване и при малка скорост.

3. СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Всички хибридни и повечето електрически автомобили работят със синхронни двигатели с редкоземни магнити. Тези магнити притежават много голяма магнитна енергия – от това следва намалено тегло и размери на двигателите. Разположени са вътре в ротора (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) и са обградени от стомана. Вграждането на магнитите концентрира радиалния поток по надлъжната ос и предизвиква разлика в магнитната проводимост по оси *d* и *q*. Тази разлика води до появата на реактивен момент, който се прибавя към основния и увеличава общия електромагнитен момент. На фиг.2 са показани някои конфигурации, които са намерили приложение в конструкциите на различни фирми.



а. **б.** **в.**

Фиг. 2. Конфигурации на магнитите в ротора.

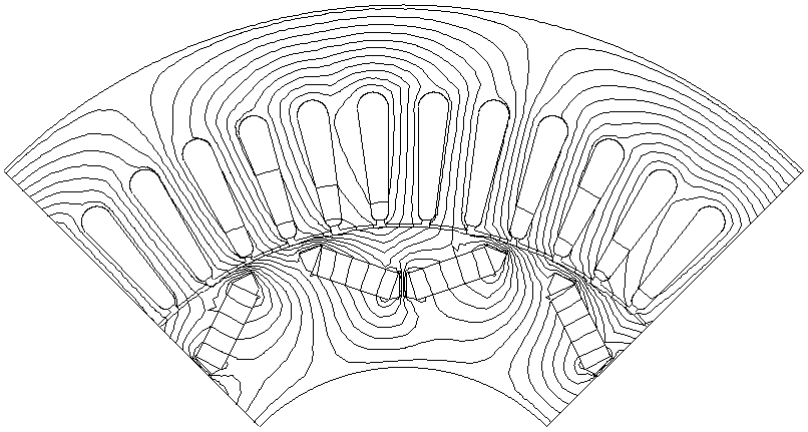
Разположението на магнитите във форма на V (фиг.2.а) е характерно за 8-полюсните двигатели на Toyota (Prius, Lexus, Camry, Mirai) и Ford Focus Electric. Двойно V е разположението на магнитите в 10-полюсните двигатели на електромобилите Chevrolet Spark EV на GM (фиг.2.б). Триъгълно подреждане е приложено в електромобилите Nissan LEAF с 8-полюсни двигатели (фиг.2.в). Размерите и подреждането на постоянните магнити и въздушните прегради са оптимизирани за получаването на необходимия поток във въздушната междина при минимален разход на магнитен материал и ограничено разсейване. Заедно с това са проверени механичните напрежения в ротора при максимална скорост.

Тойота Приус е пионер в областта на хибридите, който е в продажба от 1997 г. Последната версия има електродвигател с номинална мощност 53 kW и номинален момент 168 N.m [15]. Максималната скорост е 10000 rpm. Toyota Prius се предлага с никел-метал хидридна (Ni-MH) или литиево-йонна (Li-ion) акумулаторна батерия. Капацитетът на батерията 8,8 kWh позволява самостоятелен пробег 35 km. Напрежението на батерията, около 200 V, се повишава (boost dc-dc converter) до 600 V.

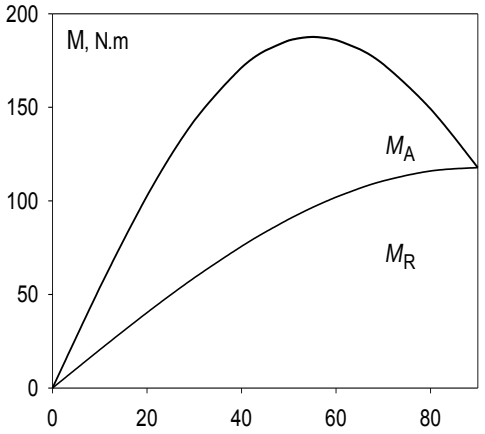
При 8 полюса и 3000 об/min честотата е 200 Hz. За някои многополюсни тягови двигатели се използва електротехническа стомана с дебелина 0,3 mm за да се намалят загубите в стоманата при по-висока честота [16].

Статорните канали на двигателя на Prius са 48. Статорната намотка е еднослойна концентрична, двуетажна. Моделът на фиг.3 е изграден по данни за размерите и

намотката от [17]. Показано е магнитното поле при натоварване и ток 100 A. Общият електромагнитен момент на двигателя (получен с тензора на напреженито на Максуел) е 186 N.m, а реактивният момент – 84 N.m.



Фиг.3. Магнитно поле при натоварване.



Фиг.4. Функции на момента от θ

Отношението на активния M_A и реактивния момент M_R е 1,214. Със същия модел е определена индуктивността на една фаза по двете оси. Отношението на индуктивностите е $L_d / L_q = 0{,}83$. На фиг.4 са показани активният момент, реактивният момент и сумарният момент в зависимост от ъгъла на натоварване θ. Подобно отношение между двете компоненти на електромагнитния момент съществува и при други тягови синхронни двигатели с постоянни магнити.

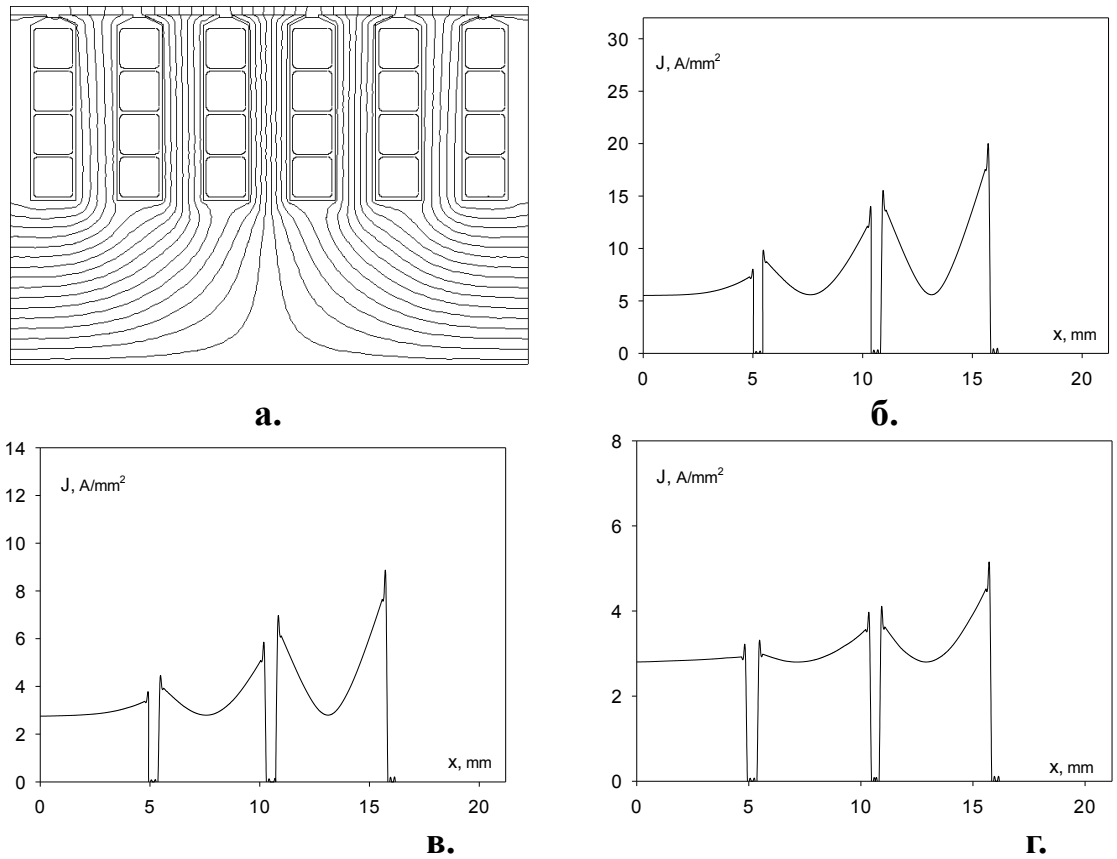
Тяговите двигатели с по-голяма магнитна несиметрия на ротора могат да работят в по-широк диапазон с постоянна мощност. По-големият реактивен момент позволява да се намали значителната размагнитваща компонента на статорния ток i_d в областта на регулиране с отслабване на полето. В тази област зададен момент може да бъде създаден с по-малък статорен ток и така да се увеличи максималната скорост. Такава е целта на патента [18]. Освен това чрез подреждането на магнитите и групите от въздушни каверни се намаляват пулсациите на индукцията и се подтискат пулсациите на момента. Конструкция на ротора според [18] е изпълнена в двигателя на електромобила BMW i3, който се произвежда в завода на компанията в Leipzig. С батерия Li-ion 22 kWh колата изминава 160 km (NEDC), ускоряването до 100 km/h става за 7,2 s, максималната скорост е 150 km/h [19]. С новата батерия 33 kWh (2017 г.) пробегът е 183 km (EPA). Двигателят е 12-полюсен с мощност 125 kW. Максималният момент е 250 N.m. Статорните канали са 72, статорната намотка е еднослойна концентрична (q = 2), двуетажна, с меки секции и се изработва с бобинажни автомати [20].

Тяговият двигател на електромобила Chevy Spark EV на General Motors има мощност 105 kW и максимален момент 443 N.m. Максималната скорост е 10000 об/min. Батерията Li-ion с капацитет 21 kWh осигурява пробег от 132 km (EPA) [21]. През 2013 г. компанията е инвестирала 270 мил. долара в технологията за производство на електродвигателите в завода в Baltimore.

Конструкцията на статора е изградена на база на технологията High Voltage Hairpin Winding [22]. Статорната намотка е 4-слойна, 10-полюсна, съставена от еднонавивкови секции от емайлиран меден проводник с квадратно сечение. Със-

тои се от две вълнови намотки с диаметрална стъпка, свързани в паралел. Статорните канали са 60. Те са полузатворени. Изолирани са с гилзи, всяка с по четири квадратни канала за проводниците. Секциите, оформени като фуркет, се вмъкват аксиално в каналите [23]. След това се огъват с автоматична хидравлична преса. Свободните краища на секциите се заваряват с дъгова заварка в защитна среда. Изолацията се възстановява и след загряване статорът се потапя в съд с аерирана суха епоксидна смола. Празнините в каналната изолация се запълват чрез капкова импрегнация.

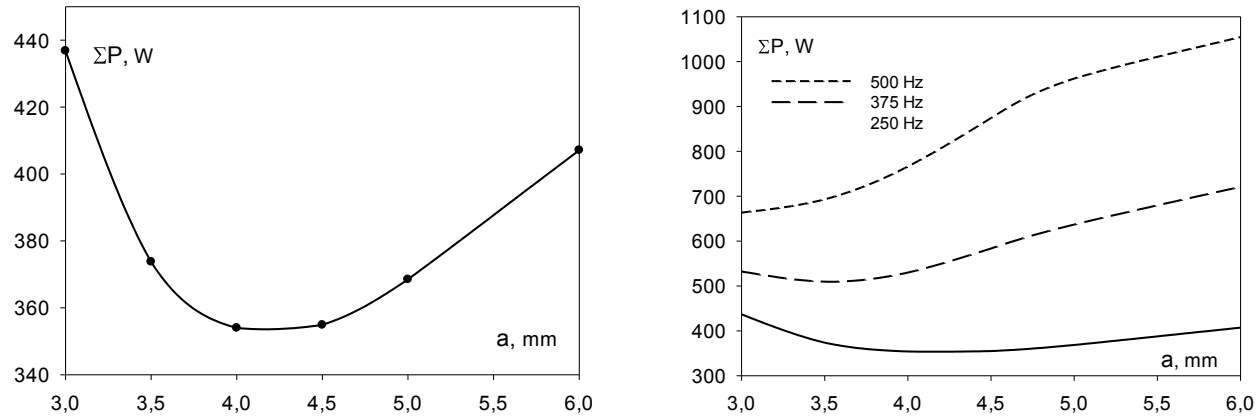
Предимства на този вид намотка са големият коефициент на запълване на канала, сравнително късите и твърди челни съединения, отличното топлоотдаване и технологичността. Обаче ефектът на токово изместване в масивните проводници увеличава загубите. При 10 полюса и 3000 об/min честотата е 250 Hz, а при 6000 об/min – 500 Hz.



Фиг.5. Модел на намотката за един полюс и разпределение на токовата плътност

Ефектът беше изследван с модел на едно полюсно деление (фиг.5.а) за проводник с размери 5 x 5 mm, ток 100 A и честота 250 Hz. На следващите фигури е представена функцията на токовата плътност по височината на първия (фиг.5.б), втория (фиг.5.в) и третия (фиг.5.г) статорен канал.

Загубите в активната част на проводниците на статорната намотка са определени с МКЕ за различни честоти и размери на проводника при еднаква дължина на пакета. На фиг.6.а е дадена функцията на загубите ΣP при честота 250 Hz, а на фиг.6.б – за три честоти.



а. **б.**

Фиг.6. Загуби в активната част на статорната намотка.

Размер на квадратния проводник над 4 mm ще се отрази върху стойността на кпд и загряването при работа на двигателя с висока скорост.

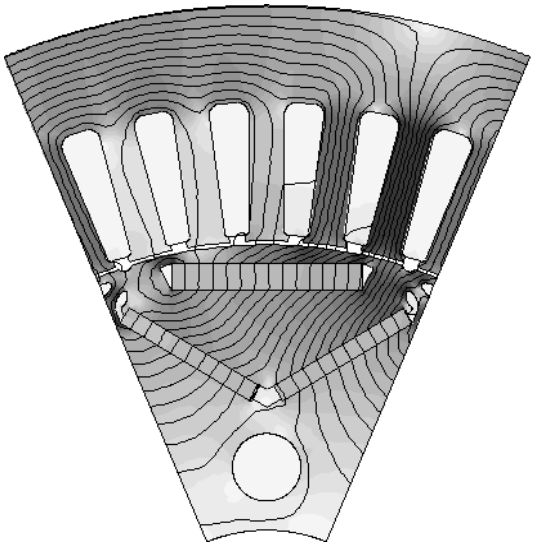
Роторните пластини на двигателя Chevy Spark EV се събират на няколко сегмента. Във всеки сегмент се поставят синтеровани редкоземни постоянни магнити (NdDyFeB) от две големини (виж фиг.2.б). Добавянето на диспросий към NdFeB повишава топлинното съпротивление и способността на магнитите да понасят по-висока околна температура. При подреждането магнитите се залепват с една-две капки термореактивно епоксидно лепило. Отделните сегменти по дължината на ротора са завъртяни на малък ъгъл. Получава се скосяване на стъпала. По такъв начин се намаляват пулсациите на момента, вибрациите и шума. В готовия ротор магнитите се намагнитват импулсно [23].

За подобряването на качествата на батериите GM работи в тясно сътрудничество с корейската компания LG Chem. Най-продаваният електромобил в света е Nissan LEAF. Двигателят има максимална мощност 80 kW и максимален момент 255 N.m при базова скорост 3000 об/min. С Li-ion батерия 30 kWh пробегът е 172 km (EPA). Двигателите се произвеждат в завода в Yokohama. Последната разработка на двигателя е от 2013 г. Статорната намотка е еднослойна, концентрична. Промени са направени главно в ротора. Оптимизирани са размерите и конфигурацията на магнитите. В резултат са намалени вибрациите и шума. Подобрена е характеристиката на момента и неговите пулсации са по-малки. Количеството на тежкия редкоземен метал диспросий в постоянните магнити е намалено, като е приложена нова технология на повърхностна дифузия. Въпреки това топлинното съпротивление на магнитите се запазва, а загубите в стоманата са по-малки. По-малките загуби в двигателя и инвертора са увеличили пробега на колата [24].

На фиг.7 е представен модел на магнитното поле при натоварване. Реактивният момент е 52 % от общия електромагнитен момент.

Тяговите синхронни двигатели с редкоземни магнити се отличават с по-добро използване на активните материали, по-малки размери и по-висок кпд при работа до номинална скорост. Управляват се добре, но не са особено ефективни при отслабване на полето. При висока скорост, за да се намали потока и индуктираното едн, трябва да се увеличи размагнитващата компонента на статорния

ток по надлъжната ос. Това води до нарастване на статорния ток и загубите, а кпд намалява. Тези двигатели са по-скъпи.



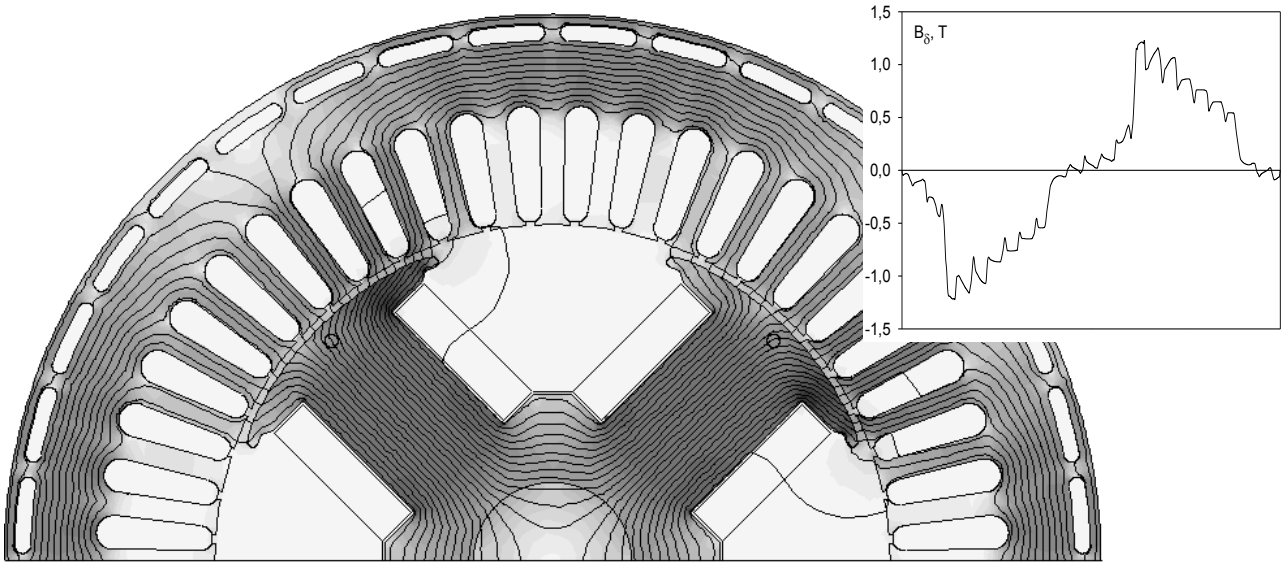
Фиг.7. Магнитно поле при товар

4. ДРУГИ ТЯГОВИ ДВИГАТЕЛИ

Не престава търсенето на тягови двигатели, при които не се използват редкоземни магнити [25]. Едно оригинално решение е приложено в електромобила Renault Zoe EV. Новият двигател R240 се произвежда в завода на фирмата в Cleon и представлява синхронна машина с независимо възбуждане. По такъв начин са преодолени проблемите на двигателите с постоянни магнити и максималната скорост при отслабване на полето е увеличена. Двигателят може да работи от 3000 до 11300 об/min с постоянна максимална мощност 65 kW. Номиналната мощност е 43 kW. Постоянен максимален момент 220 N.m двигателят развива от 250 до 2500 об/min. Намалението на загубите е увелечило пробега на Renault Zoe EV. С акумулаторна батерия Li-ion 22 kWh колата изминава 240 km (NEDC). Тя се ускорява от 0 до 100 km/h за 13,5 s. Максималната скорост е 135 km/h [26].

На фиг.8 е показано магнитното поле в напречното сечение при натоварване на двигателя. Активният и реактивният момент, определени от моделирането, се разпределят по равно в общия електромагнитен момент.

Двигателят има четири явни полюса с равномерна въздушна междина. Статорната намотка е еднослойна, триетажна (q = 4), с разположени секционни групи и четири паралелни клона [27]. Секциите се навиват и полагат с бобинажни автомати. Роторните листове са цели. На челните страни на ротора са разположени пластмасови крайни плочи. Полюсните бобини имат много голям брой навивки от кръгъл проводник и се навиват без прекъсване на проводника от автомати с висока скорост. За да се реализира навиването, полюсните накрайници са стеснени – полюсното покритие е едва 51 %. В двата края на ротора са монтирани алуминиеви намоткодържатели. Те служат и за динамично балансиране. Изводите на възбудителната намотка са свързани към два контактни пръстена. Охлаждането на двигателя е въздушно.



Фиг.8. Магнитно поле и индукция във въздушната междина

Известни надежди се възлагат на реактивените двигатели с електронна комутация (Switched Reluctance Motor), но за сега приложенията са ограничени. На автомобилно изложение в Женева през 2013 г. е показан Land Rover, задвижван с двигател SRM с мощност 70 kW на фирмата Nidec [28]. Батерията 27 kWh осигурява пробег над 80 km. Проблеми на този вид задвижване са пулсациите на момента и повишените вибрации и шум.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съпоставката на различните видове тягови двигатели на електромобили не дава основание за категорично предимство. Синхронните двигатели с възбуждане от редкоземни магнити са предпочитани заради по-високия кпд, по-малките размери и тегло и по-добрата претоварваща способност. Ключов недостатък на тези двигатели е работата им при регулиране с отслабване на полето. Двигателите с постоянни магнити са характерни за задвижвания с по-големи натоварвания и средни скорости, докато асинхронните двигатели доминират при по-високите скорости, където техният кпд е равностоен и даже по-добър. Скорости на двигателите до базовата са типични за движение в града, а високите скорости – за движението по магистрала. Асинхронните двигатели са по-слабо представени. Обаче при сравняване на характеристиките, цената и надеждността, те са напълно приемлива алтернатива на синхронните двигатели с редкоземни магнити. Много добри са резултатите на синхронния двигател с електромагнитно възбуждане. Моделирането на магнитното поле подпомогна анализа и оценката на отделните типове и конструкции тягови двигатели.

Съществува тясна връзка между конструкцията и технологията на всички тягови двигатели. Производственият процес е автоматизиран максимално.

Блокът на акумулаторната батерия и неговата система за терморегулация играят важна роля за качествата и надеждността на електромобилите. В бъдеще се очаква създаването и приложението на нов тип висококачествени батерии на базата на полимера графен.

В типичната структура на задвижването тяговият двигател е част от общ модул, в който конструктивно са обединени двигателят, електронният блок и едносте-

пенният редуктор. Електронният блок включва: инвертор, зарядни устройства (за бавно и бързо зареждане) и dc-dc преобразувател 12 V. В последните разработки на задвижванията се наблюдава висока степен на интеграция, компактност и намаляване на размерите.

За сега все още обемите на производство и продажби на електромобилите са малки. Обаче динамичното развитие на това технологично направление в последните години очертава перспектива за стремително нарастване.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Model S – Tesla motors, 2016.
[2] US 2010/0244612 A1, AC motor winding pattern.
[3] Tesla Motors: High efficiency electric drive unit, 2014.
[4] How it's made dream cars – Tesla Model S, 2016.
[5] US 2013/0069476 A1, Rotor design for an electric motor.
[6] Tesla's Top Motor Designer Talks Motors, 2016.
[7] Tesla all-wheel drive (dual motor). Power and torque specifications, 2015
[8] US 2014/0257613 A1, Control system for an all-wheel drive electric vehicle.
[9] Tesla Model S drivetrain hacked, 2015
[10] How the Tesla Model S is Made, 2013
[11] Battery and charging patents. Tesla Motors vs. the Rest, Relecura, 2014
[12] Electric & Hybrid Vehicle Technology, 20 Issue, 2015
[13] Tesla Gigafactory, 2016.
[14] Toyota RAV4 EV Specifications, 2016.
[15] 2016 Toyota Prius – Features & Specs.
[16] Sato Y., S. Ishikawa et al., Development of high response motor and inverter system for Nissan LEAF electric vehicle, SAE World Congress, Detroit, 2011.
[17] Hendershot J., Electric traction choices for hybrid & electric vehicles, Florida International University, 2014.
[18] US 2012/0267977 A1, Electrical drive motor for a vehicle.
[19] BMW i3: Range & Charging, 2016.
[20] BMW i3 Electric Motor Production, 2013.
[21] 2016 Chevrolet Spark EV. Powertrain.
[22] US 2003/0214196 A1, Multi-set rectangular copper hairpin windings for electric machines.
[23] We Build the Chevy Spark EV's AC Permanent-Magnet Motor, 2011.
[24] Nakada T, S. Ishikawa, S. Oki, Development of an electric motor for a newly developed electric vehicle, SAE International, 2014.
[25] Widmer J., R. Martin, M. Kimiabeigi, Electric vehicle motors without rare earth magnets, Sustainable Materials and Technologies 3, 2015.
[26] Renault Zoe – R240 – Technical specifications, 2016.
[27] Renault Group: New electric motor strengthens powertrain expertise, 2015.
[28] Nidec SR drive motors power new Land Rover, 2016.
[29] Dilov D., E. Sokolov, Electric car propulsion with induction motor, Proceedings of ELMA 2015.

Автор: Емил Соколов, проф. дтн, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет – София, E-mail address: *ersokolov@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. д-р Владимир Лазаров

ПРИЛОЖЕНИЕ НА НЕВРОННИТЕ МРЕЖИ ЗА АНАЛИЗ НА НОРМАЛНИ И АВАРИЙНИ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ ОБЕКТИ

Десислав Тодоров

Резюме: *В настоящата статия е представен литературен обзор, за периода 1986-2013, на разработките отнасящи се до анализ на нормални и аварийни режими в електроенергийни обекти. Информацията е представена хронологично. В края на публикацията е извършен кратък статистически анализ на публикациите по тематиката.*
Ключови думи: *невронни мрежи, изкуствен интелект, анализ на аварии*

REVIEW OF NEURAL NETWORKS MODELS FOR FAULT SECTION ESTIMATION IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Desislav Todorov

Abstract: *In this work is represented a review of articles for fault section estimation in electric power systems with neural networks. Period of review is from 1986 to 2013. All information is ordered chronologically. Statistical analysis of information is included at the end of review.*
Keywords: *neural networks, artificial intelligence, fault section estimation*

Модерните електроенергийни обекти се характеризират с комплексност и висока степен на автоматизация. Една от задачите на оперативният персонал е изпълнение на технологични инструкции, съответстващи на определен следавариен режим. При възникване на комплексна авария и отказ на прекъсвач или релейна защита, анализът на информацията е процес, чиято продължителност се определя основно от нивото на техническа подготовка и опитността на операторите. В повечето случаи времето за взимане на правилно решение е недостатъчно.

Разработването на системи за анализ и определяне на повредени участъци от електроенергийни обекти е предмет на дейност на учените от десетилетия. В исторически план първата експертна система е разработена през 1986 г. от Фукуи [1], с езика Пролог, за подпомагане на диспечерите при възстановяване на нормалната работа на електроенергийната система.

През 1989 г. Чан [2] предлага използването на невронни мрежи за анализиране на събития в електроенергийни обекти на базата на аварийни и предупредителни сигнали, получени от системата за управление.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

През януари 1994 г. в том 9 на “Transactions and power delivery” Йанг [3] предлага за първи път използване на невронни мрежи за анализ на данни от релейни защити и прекъсвачи и откриване на повредени участъци от електроенергийна система. Като причини за предлагане на новият подход са недостатъците, при прилагане на експертни системи, свързани с голям брой правила, описващи сложна електроенергийна система, времеемкост на регулярната поддръжка на софтуера, невъзможност за самообучение, ниска изчислителна скорост на алгоритъма. Йанг предлага три невронни мрежи, които се използват съответно за определяне на типа повреда, авариралия участък и неизправния прекъсвач или релейна защита. И трите невронни мрежи са линейни, с обратно разпространяване на грешката. Използвана е стандартна сигмоидална активационна функция. С предлаганите алгоритми е моделирана част от електроенергийна система, състояща се от 4 подстанции с двойна шинна система, 29 прекъсвача, 64 релейни защити, разделени на основни и резервни, 24 възможни повредени участъка и 3 аварийни ситуации.

Декември 1994 г. Лай [4] предлага използване на генетичен алгоритъм за намаляване на времето за обучение на невронна мрежа, откриваща повреден участък.

Януари 1995 г. Йанг [5] предлага използване на дърво на решенията за създаване на мрежа, състояща се от И и ИЛИ невронни възли. Като причина за изследването е посочена голямата продължителност на обучението на невронни мрежи с обратно разпространение на грешката. Предлаганата невронна мрежа е трислойна. Първият слой съдържа неврони, определящи състоянието на комутационната апаратура и релейните защити. Вторият слой се състои от невронни възли „И“, които свързват последователността от събития водещи до възможно аварийно събитие. Третият изходен слой съдържа невронни възли „ИЛИ“, които класифицират повредата и свързват разклонения на последователности от събития, водещи до повече от едно възможно решение. Невроните са със стандартна линейна активационна функция. Алгоритмът е приложен при моделиране на част от електроенергийна система, състояща се от една електрическа централа и пет електрически подстанции. Броят на възлите в електрическата централа е 54360. Броят на възлите за всяка от електрическите подстанции е между 11346 и 13800. Средното времето за диагностика на аварията е 0.427 сек.

Юни 1995 г. Среедхар [6] предлага използване на невронни мрежи за определяне на повредени участъци в термична електроцентрала.

Април 1999 г. Айген [7] публикува резултати от изследване за разработване на невронна мрежа, откриваща повреда в система състояща се от блок линия трансформатор.

Май 1999 г. Джианг [8] предлага използване на невронни мрежи с асоциативна памет при анализ на повреди по електропровод за високо напрежение. Причина за изследването е необходимостта от експертна система, която е устойчива на смущения и запазва способността си да предлага решение в рамките на 1 секунда. Архитектурата на невронната мрежа се състои от стандартна линейна невронна мрежа с обратно разпространение на грешката и рекурентна невронна мрежа. Линейната мрежа е трислойна. Рекурентнана мрежа е еднослойна двупо-

сочна хетеро - асоциативна невронна мрежа базирана на невронната мрежа на Хопфийлд. Активационна (предавателна) функция на линейната мрежа е стандартна линейна функция, а за рекурентната мрежа – линейна функция с насищане. За обучение на рекурентната мрежа се използва правилото на Хеб и фалшив обратен алгоритъм.

През 2000 г. Патън [9] прави първото обобщение на алгоритмите за откриване на повредени участъци чрез алгоритми за изкуствен интелект.

2001 г. Би [10], [11] предлага използване на невронна мрежа с радиална базисна функция. Като причина за изследването е посочена необходимостта от експертна система, която предлага решение в рамките на 1 секунда. В публикацията са представени сравнителни резултати от работата на два алгоритъма – класическа линейна невронна мрежа с обратно разпространение на грешката и невронна мрежа с радиална базисна функция. Двете невронни мрежи са трислойни. Активационната функция за линейната мрежа е стандартна линейна функция. Предавателните функции, за мрежата с радиална базисна функция, са: прагова за първия слой, гаусова за втория слой, линейна комбинация за третия слой. За обучение на невронната мрежа с радиална базисна функция се използва методът на ортогоналните най-малки квадрати. Моделът е приложен при анализ на 40 възможни сценарии в четири подстанции.

Януари 2002 г. Би представя частични резултати от своята дисертация [12] и извършва моделиране на електроенергийна система чрез разлагане на сложен граф до дървовидна структура и прилагане на невронна мрежа с радиална базисна функция за изследване на повредените участъци [13]. Като основна причина за изследването Би определя необходимостта от експертна система, която предлага решение в рамките на 1 секунда. Архитектурата на невронната мрежа и активационната функция са идентични с публикации [10] и [11]. Новост в статията е използване на помощна размита система при класификация на авариите. В резултат на изследването е доказано значително намаляване на времето за обучение на размитата невронна мрежа с радиална базисна функция.

Същата година Би [14] публикува статия в IEEE, в която е приложен алгоритмът разгледан в [13]. Обект на изследването е стандартна електроенергийна система със 118 възела.

В периода февруари 2002 г. юни 2003 г. Би представя резултати от дисертацията си [12] в поредица от статии [15], [16], [17] на различни научни форуми.

Септември 2003 г. Павловски и Неглевитски [18] предлага използване на самоорганизиращи се мрежи на Кохонен при откриване на отказали релейни защити и прекъсвачи в 110 kV електроенергийна система. Основна причина за изследването е опит за реализация на модел, който може да работи при съществена загуба на информация. За създаване на модела е използвана невронна мрежа на Кохонен с 50 неврона. Във фаза на обучение и класификатор на клъстери се изчислява дистанцията на Хаминг. Моделът е приложен при симулация с 1268 случая с непълна информация, като алгоритмът успешно класифицира 1210 от тях.

2004 г. Кардосо [19] предлага използване на обобщени регресионни невронни мрежи и линейна невронна мрежа с обратно разпространяване на грешката за идентификация на повреден участък от електроенергиен обект. Причина за изследването е необходимостта от разработване на точен модел на система за релейна защита. Обобщената регресионна мрежа е с радиална базисна активационна функция, комбинирана със специална линейна функция. Предложеният алгоритъм се използва при симулация на аварии в 230 kV тестова система.

2004 г. Василич защитава дисертация свързана с класификация на събития чрез самоорганизираща се невронна мрежа на базата на адаптивна резонансна теория, размити алгоритми за взимане на решение и определяне на клъстери от информация с алгоритъм за най близкия "K" съсед [20]

През 2005 г. Тукарам [21] предлага реализиране на компютърен модел на електроенергиен обект с невронна мрежа и машина с поддържащи вектори. Като причина за изследването е посочено разработване на локатор на повреди в радиална разклонена разпределителна мрежа. Алгоритмът за симулация е изграден от стандартна линейна невронна мрежа за локализиране на аварии и машина с поддържащи вектори за класификация на съответна авария. Активационните функции за невронната мрежа са стандартни – сигмоидална за скрития слой и линейна за изходния слой. Във фазата на обучение на невронната мрежа е приложен алгоритъм на Левенберг Маркуардт. Разработеният модел е използван за симулация на аварии в отворена разклонена разпределителна мрежа с три извода от подстанция.

Същата година Тукарам г. [22] публикува изследване на стандартни IEEE модели на разпределителна мрежа с 34 и 69 възела. Целта на изследването е да се разработи локатор на повреди в радиална разклонена разпределителна мрежа. За определяне на мястото на повредата се използва стандартна трислойна линейна невронна мрежа с нелинейна активационна функция на скрития слой неврони. За определяне на типа повреда се използва вероятностна невронна мрежа с радиална базисна функция, с гаусова активационна функция в скрития слой и Бейс предавателна функция за изходния слой. За обучение на линейната невронна мрежа е използван алгоритъм на Левенберг Маркуардт, а за обучение на мрежата, определяща типа авария - радиална базисна функция.

През 2005 г. Василич публикува резултати от дисертацията си [20] и предлага разработване на невронна мрежа с класификатор, базиран на математически модели от адаптивната резонансна теория [23]. Цел на изследването е да се провери работата на невронна мрежа с класификатор на базата на адаптивна резонансна теория. Обучението на невронната мрежа се извършва на два етапа. Първата фаза използва ISODATA клъстеризиращ алгоритъм за самоорганизация на данните в клъстери. Втората фаза на обучение е супервайзорно, с организация на данните в хомогенни клъстери и тяхното асоцииране със съответен еталон. Алгоритъмът е приложен при симулация на аварии в 345 kV пръстеновидна електропреносна мрежа.

2005 г. Би [24] предлага използване на невронна мрежа с радиална базисна функция и размита логика на обучение

Април 2006 г. Жанг и Кезунович [25] предлагат използване на данни от фазоизмерващи устройства, данни за работата на релейните защити данни от симулатор на електроенергийна система за анализ на работата на релейните защити в реално време. Статията представя приложната част на разработената от Василич [23] дисертация.

През 2007 г. Ченг [26] предлага подобряване на алгоритъма за обучение на невронна мрежа чрез включване на скоростта на затихване на грешката в обучителния процес.

През 2007 г. Сисоко [27] предлага използване на невронна мрежа с радиална базисна функция като локатор на аварии в електропреносни системи. Използваният математически модел е представен детайлно от Би в [17]. За изследването е използвана стандартна IEEE електроенергийна система с 11 възела.

2007 г. Жанг и Кезунович [28] публикуват статия предлагаща математически модел, комбиниращ непрекъснато и дискретно Уейвлет преобразуване и невронна мрежа базирана на адаптивна резонансна теория при откриване на повреден участък от електропреносна мрежа. Моделът на невронната мрежа е съгласно публикацията на Василич и Кезунович [23].

2007 г. Кезунович [29] обобщава резулатите от поредица публикации [23], [25], [28]. В статията се предлага използване на дърво на събитията за определяне на коректността на работа на релейните защити.

2007 г. Кезунович и Кнежев [30] предлагат използване на информацията от аварийните регистратори в релейните защити за класифициране на аварии чрез невронна мрежа предложена от Василич [23].

2008 г. Менг [31] предлага подобрение на алгоритъма на Би [17], за размита невронна мрежа с радиална базисна функция, чрез прилагане на алгоритъм на обучение на базата на теорията на хаоса. Предлаганата невронна мрежа е четирислойна, като последния слой се използва за деразмиване. Във фазата за обучение е използван класически алгоритъм с обратно разпространение на грешката и добавяне на хаотичен шум. В работата е моделирана електроенергийна система с два паралелни електропровода, две шинни системи и четири трансформатора.

2008 г. Кардосо [32] предлага подобрение на своя алгоритъм за откриване на повреден участък с невронна мрежа с обобщена регресионна функция [19]. Новост в статията е разработване на правила за организиране и подаване на информация на входа на невронната мрежа при промяна на конфигурацията на сложна пръстеновидна електропреносна система

2008 г. Негневитски [33] обобщава приложението на изкуствен интелект при аварийни режими на работа на електроенергийни системи. В частта откриване на повреден участък основно внимание се обръща на прилагането на невронни мрежи по представен в [18] алгоритъм.

2009 г. Бедекар [34] предлага прилагане невронна мрежа и генетичен алгоритъм за откриване на повреден участък. Цел на изследването е генериране на целева функция, необходима за решаване на оптимизационна задача с генетичен алгоритъм. Използваната невронна мрежа е двуслойна, със сигмоидална предавателна функция. Във фазата на обучение се използва линейна апроксимация на базата на закона на Хеб. С алгоритъма е моделирана електроенергийна система с два паралелни електропровода , две шинни системи и четири трансформатора.

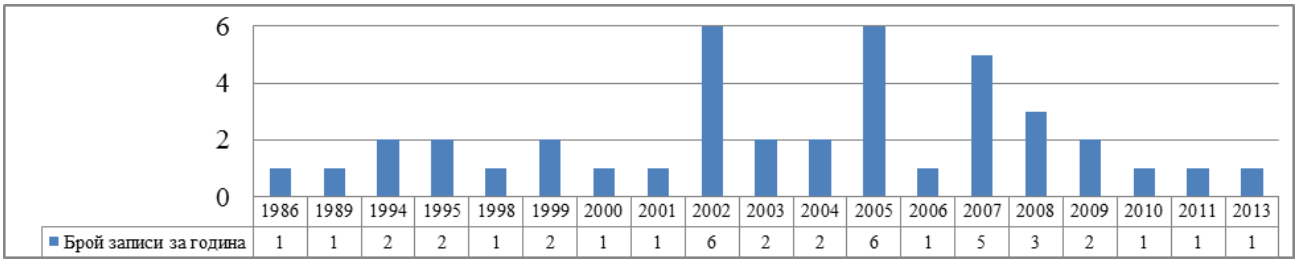
През 2009 г. Хе [35] предлага използване на груби множества и квантова невронна мрежа при откриване на повреден участък в елекроенергиен обект. В статията е извършено сравнение между следните видове невронни мрежи - груби невронни мрежи, размити невронни мрежи, вероятностни невронни мрежи, невронни мрежи с радиална базисна функция. Съгласно публикацията квантовата невронна мрежа е с най-малък процент грешка при класифициране на аварийни събития.

През 2010 г. Газана [36] предлага използване на експертна система съставена от размит класификатор и линейна трислойна невронна мрежа, работещи съвместно. Активационната функция на невронната мреже е сигмоидална, а обучението се извършва по закона на Левенберг-Маркуардт със среднoквадратична нормализирана грешка. С представеният алгоритъм се изследват повреди в разпределителна уредба с 1,5 прекъсвача на присъединение.

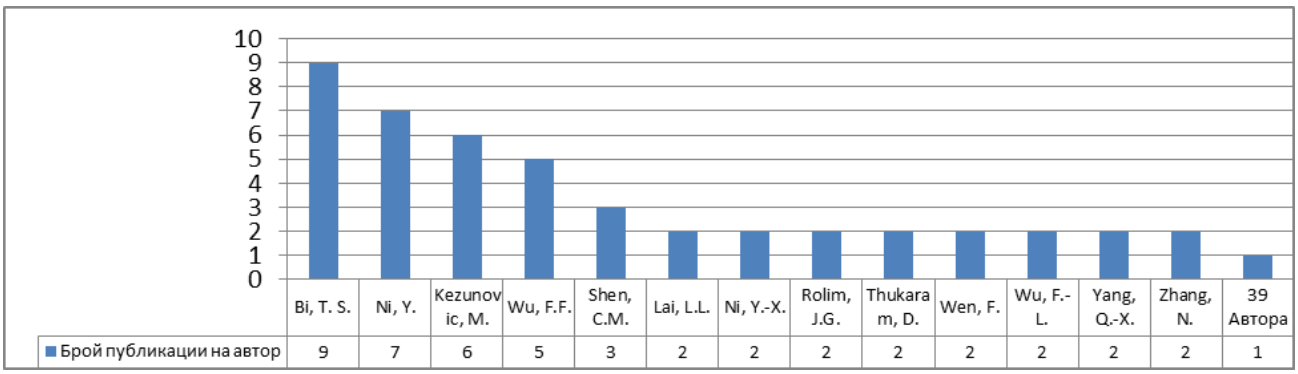
2011 г. Харлей [37] разглежда приложението на изкуствения интелект в интелигентните мрежи и предлага невронните мрежи да бъдат използвани за откриване на повредени участъци.

2013 г. Дос Сантос [38] предлага преобразуване на информацията от дискретни стойности 1 и 0 в процентна стойност. Според публикацията подобна методика позволява броят на входовете в невронната мрежа да не зависи от броя на алармените събития.

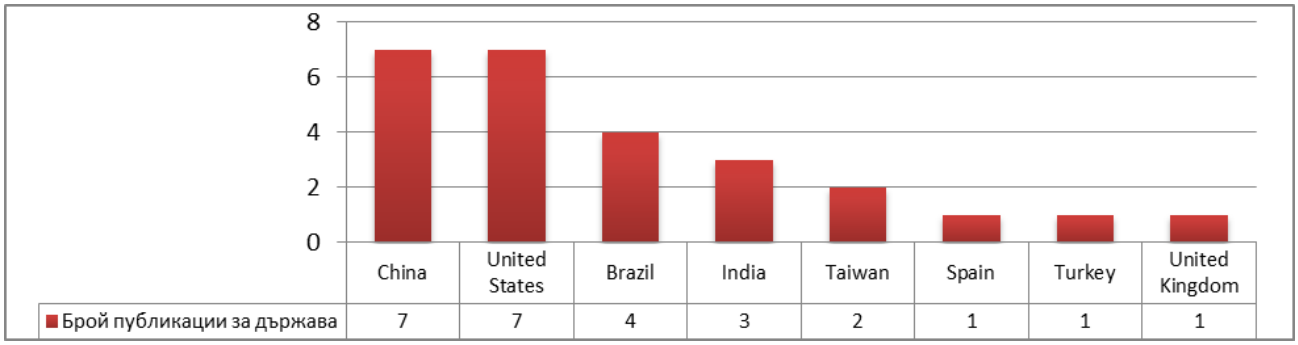
На фиг.1-фиг.5 са представени статистически данни за публикации за прилагане на невронни мрежи при откриване на повреден участък от електроенергийна система. Лидери по брой публикации са Би, Ни и Кезунович. Основният брой статии на Би е свързан с оповестяване на резултати от изследвания включени в нейната дисертация. От своя страна статиите, чийто автор е Кезунович, са относително равномерно разпределени в годините, което говори за систематична работа и изграждане на школа в това направление.



Фиг.1. Публикации по години.

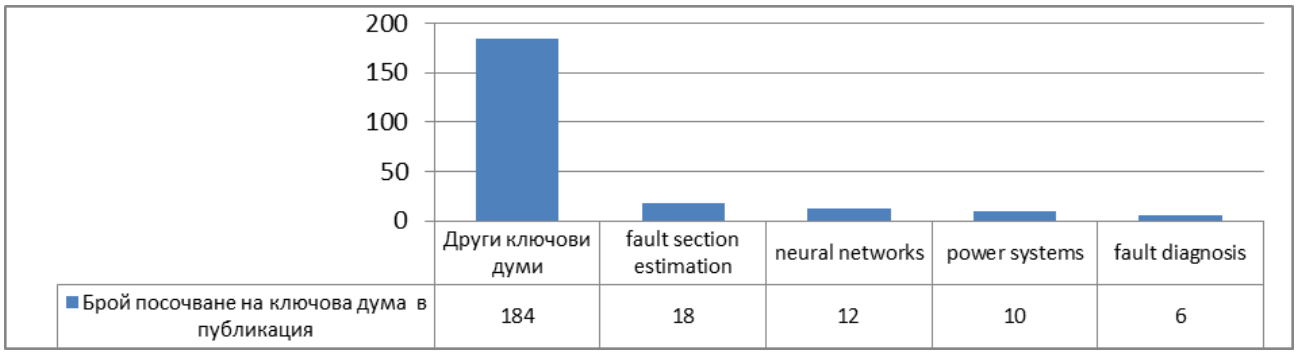


Фиг.2. Брой публикации по държави.



Фиг.3. Брой публикации по държави.

Фиг.4. Видове публикации.



Фиг.5. Ключови думи, посочени от авторите.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Fukui, Chihiro, Kawakami, Junzo, „Expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers“, *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 1 от 2PWRD-1, № 4, pp. 83-90, 1986

[2] Chan, E. H. P., „Application of neural-network computing in intelligent alarm processing (power systems)“ в *Power Industry Computer Application Conference, 1989. PICA '89, Conference Papers*, 1989

[3] Yang, Hong-Tzer, Chang, Wen-Yeau, Huang, Ching-Lien, „New Neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 9, № 1, pp. 220-230, 1994

[4] Yang, Hong-Tzer, Chang, Wen-Yeau, Huang, Ching-Lien, „Design neural networks with genetic algorithms for fault section estimation,“ *Conference of Proceedings of the 29th Universities Power Engineering Conference.*, V. 2, pp. 596-599, 1994

[5] Yang, Hong-Tzer, Chang, Wen-Yeau, Huang, Ching-Lien, „Power system distributed on-line fault section estimation using decision tree based neural nets approach,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 10, № 1, pp. 540-546, 1995

[6] Sreedhar, Rajiv, Fernandez, Benito, Masada, Glenn Y., „Neural network based adaptive fault detection scheme,“ в *Conference of Proceedings of the 1995 American Control Conference*, Seattle, 1995

[7] Aygen, Z.E., Seker, S., Bagriyanik, M., Bagriyanik, F.G., Ayaz, E., „Fault section estimation in electrical power systems using artificial neural network approach“ в *Conference of Proceedings of the 1999 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference - A Vision Into the 21st Century;*, New Orleans, LA, USA, 1999

[8] Jiang Huilan, Sun Yaming, „Application of associative memory neural network in high voltage transmissionline fault diagnosis“ *Transactions of Tianjin University*, V. 01, pp. 36-41, 1999

[9] Patton, R. J., Uppal, F. J., Lopez-Toribio, C. J., „Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems: a survey“ *Proceedings of the 4 th IFAC Symposium SAFEPROCESS 2000*, V. 1, 2-, pp. 1-14, 2000

[10] Bi, T.S., Ni, Y.X., Shen, C.M., Wu, F.F., Yang, Q.X., „A novel radial basis function neural network for fault section estimation in transmission network,“ в *Conference of 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, Tsimshatsui, 2001

[11] Bi, T;Ni, Y;Wu, FF;Yang, Q, „A novel neural network approach for fault section estimation“ *Proceedings of the CSEE*, V. 22, pp. 73-78, 2002

[12] Bi, Tianshu;, „Distributed intelligent system for on-line fault section estimation of large-scale power networks“ 2002

[13] T. N. Y. S. C. M. W. F. F. Bi, „An on-line distributed intelligent fault section estimation system for large-scale power networks“, *Electric Power Systems Research*, V. 62, № 3, pp. 173-182, 2002

[14] T. N. Y. W. F. F. Bi, „Distributed adaptive fault section estimation system for large-scale power networks“, *Conference of 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New, 2002

[15] Bi, T.-S., Ni, Y.-X., Wu, F.-L., Yang, Q.-X., „Novel neural network approach for fault section estimation“ *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering,* V. 22, № 2, pp. 73-78, 2002

[16] Bi, T., Yan, Z., Wen, F., Ni, Y., Shen, C.M., Wu, F.F., Yang, Q.b, „On-line fault section estimation in power systems with radial basis function neural network“ *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, V.* 24, № 4, pp. 321-328, 2002

[17] Bi, T., Wen, F., Ni, Y., Wu, F.F., „Distributed fault section estimation system using radial basis function neural network and its companion fuzzy system“ *International Journal of Electrical Power and Energy System,* V. 25, № 5, pp. 377-386, 2003

[18] Pavlovsky, V., Negnevitsky, M., „Recognition and visualisation of complex emergencies using artificial neural networks“ *European Power and Energy Systems,Marbella, Spain,* V. 409, pp. 301-306, 2003

[19] Cardoso Jr., G.a , Rolim, J.G.b , Zürn, H.H.b, „Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation,“ *IEEE Transactions on Power Delivery,* V. 19, № 3, pp. 1034-1041, 2004.

[20] Vasilic, S., „Fuzzy neural network pattern recognition algorithm for classification of the events in power system networks,“ 2004

[21] Thukaram, D., Khincha, H.P., Vijaynarasimha, H.P., „Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems,“ *IEEE Transactions on Power Delivery,* V. 20, № 2 I, pp. 710-721, 2005

[22] Thukaram, D., Shenoy, U.J., Ashageetha, H., „Neural network approach for fault location in unbalanced distribution networks with limited measurements,“ в *Conference of 2006 IEEE Power India Conference,* New, 2005

[23] Vasilic, S., Kezunovic, M., „Fuzzy ART neural network algorithm for classifying the power system faults“ *IEEE Transactions on Power Delivery,* V. 20, № 2 II, pp. 1306-1314, 2005

[24] Bi, T.-S.a , Ni, Y.-X.b , Wu, F.-L.b , Yang, Q.-X.a, „Hybrid fault section estimation system with radial basis function neural network and fuzzy system“, *Proceedings of the CSEE,* 2005

[25] Zhang, N., Kezunovic, M., „A real time fault analysis tool for monitoring operation of transmission line protective relay“ *Electric Power Systems Research,* V. 77, № 3-4, pp. 361-370, 2006

[26] Cheng Peng-bo,Yuan Fu-ke, Liu Can-ping,Liang Xiao-jian,Guo Zhuang-zhi, „Application of an improved BP network calculation to the fault diagnosis of distribution network“ *Relay,* V. 12, pp. 27-31,40, 2007

[27] Sissoko, S.B., Abdalla, A.N., Zhang, J., Cheng, S.J., „Graph partitioning applied to fault location in power transmission lines“ *Journal of Applied Sciences,* V. 7, № 16, pp. 2327-2332, 2007

[28] Zhang, N., Kezunovic, M., „Transmission line boundary protection using wavelet transform and neural network“ *IEEE Transactions on Power Delivery,* V. 22, № 2, pp. 859-869, 2007

[29] Kezunovic, M., „Use of intelligent techniques for analysis of faults and protective relay operations“ в *Conference of 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, 2007

[30] Kezunovic, M., Knezev, M., „Fault location using sparse IED recordings“ в *2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, ISA,* 2007

[31] Jian-Liang, M., Wan-Qing, G., Hui-Jing, P., Wei-Hua, N., „Fault diagnosis of distribution system based on distributed chaotic fuzzy RBF neural networks“ в *Conference of 2008 4th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multiedia Signal Processing, IIH-MSP 2008*, Harb, 2008

[32] Cardoso Jr., G., Rolim, J.G., Zurn, H.H., „Identifying the primary fault section after contingencies in bulk power systems,“ *IEEE Transactions on Power Delivery,* V. 23, № 3, pp. 1335-1342, 2008

[33] Negnevitsky, M., „Computational Intelligence Applications to Crisis Management in Power Systems“ *International Journal of Automation and Control,* V. 2, № 2 - 3, pp. 247-273, 2008

[34] Bedekar, P.P., Bhide, S.R., Kale, V.S., „Fault section estimation in power system using neuro-genetic approach“ в *Conference of 2009 International Conference on Power Systems, ICPS '09;*, Kharagp, 2009

[35] He, Z., Zhao, J., Yang, J., Gao, W., „A new power system fault diagnosis method based on rough set theory and quantum neural network“ в *Conference of 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2009*, Wuh, 2009

[36] Gazzana, D.D.S., Oliveira, M.O., Bretas, A.S., Lerm, A., Bettiol, A., Da S Gonalves, M.A., „A hybrid expert system based on neural networks and fuzzy logic for fault identification in electric power substations“ в *Conference of International Conference on Neural Computation, ICNC 2010 and of the International Conference on Fuzzy Computation, ICFC 2010*, Valenc, 2010

[37] Ronald G. Harley, Jiaqi Liang, „Computational Intelligence in Smart Grids,“ *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI),* V.1, pp. 1-8, 2011

[38] Dos Santos Fonseca, W.A., Bezerra, U.H., Nunes, M.V.A., Barros, F.G.N., Moutinho, J.A.P., „Simultaneous fault section estimation and protective device failure detection using percentage values of the protective devices alarms,“ *IEEE Transactions on Power Systems,* V. 28, № 1, pp. 170-180, 2013

Автор: Десислав Тодоров, асистент, Катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *desislav_todorov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Рад Станев

ПРИЛАГАНЕ НА МОДЕЛИ НА НАДЕЖДНОСТ И НЕВРОННИ МРЕЖИ ПРИ АНАЛИЗ НА НОРМАЛНИ И АВАРИЙНИ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЕН ОБЕКТ

Десислав Тодоров

Резюме: *В работата е извършено разработване на модел на надеждност на електроенергиен обект с дърво на отказите. Извършено е абстрактно дефиниране на задачата за определяне на повреден участък, чрез теорията на множествата. Предложен е метод за използване на минималните пътища и минималните сечения при обучение на линейна невронна мрежа с обратно разпространение на грешката.*
Ключови думи: *дърво на отказите, невронна мрежа, теория на множествата*

IMPLEMENTATION OF RELIABILITY ANALYSIS MODELS AND NEURAL NETWORKS IN FAULT SECTION ESTIMATION

Desislav Todorov

Abstract: *In the work reliability modeling with fault trees is implemented in fault section estimation. Finding faulted sections and faulted elements are defined as mathematical abstractions from set theory point of view. Minimal paths and minimal cuts are used as patterns in learning process of neural network with back propagation of error.*
Keywords: *fault section estimation, neural network, reliability, fault trees, minimal paths, minimal cuts, set theory*

ВЪВЕДЕНИЕ

Един от методите за осигуряването на надеждност на електрозахранването е чрез бързо възстановяване на електрическите връзки към потребителите в следавариен режим на работа на електроенергийните обекти. Като първа стъпка от този процес е необходимо бързо и точно определяне на повреденият участък и съответният повреден елемент. Понякога, при късо или земно съединение в елемент от електроенергийната система и отказ на съответни прекъсвачи и/или релейни защити, аварията прераства в комплексна. Прилагането на експертни системи значително би улеснило анализа на подобни събития и бързия избор на съответни оперативни инструкции за реакция в следавариен режим.

Първата експертна система, разработена с езика Пролог, е представена от Фукуи [1] през 1986 г. През 1989 г. Чан [2] за първи път предлага използване на невронни мрежи при анализа на данни от системата за сигнализация на електроенергиен обект. Решение на задачата, за откриване на повреден участък с изпол-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

зване на данни от релейни защити и прекъсвачи, е представено за първи път от Йанг [3] през 1994 г.. Януари 1995 г. Йанг [4] използва дърво на решенията като първа стъпка при изграждане на невронна мрежа, базирана на логически функции. В [5] и [6] Кезунович и Жанг предлагат използване на дърво на събитията при анализа на работата на дистанционни защити в двустранно захранена електроенергийна система, изградена от двойки паралелни електропроводи.

Във всички представени дотук публикации разработването на еталони, с които се извършва обучение на невронните мрежи, се извършва ръчно, на база експертна оценка. В настоящата публикация ще се представи и аргументира използването на дървета на отказите, за автоматизирано генериране на еталони за обучение на невронна мрежа. Статията е разделена на три основни части. В първата се разглежда и доказва приложението на минималните пътища и минималните сечения за формиране на тестови еталони в експертна система. Във втората част е представен модел на надеждност на електроенергиен обект и са извършени анализи на резултатите, генерирани от програмата “Saphire”. В третата част е представен математически модел на невронна мрежа и резултати от извършени изследвания.

Надеждността на много системи може да се изчисли чрез логически схеми за надеждност. Една система може да се опише с логически схеми и нейната надеждност да се моделира с мрежови метод, ако е монотонна и изпълнява следните условия [7], [8]:

- Всеки елемент може да се намира в едно от две възможни състояния – работа или авария;
- Моделираната система може да се намира в едно от две възможни състояния – работа или авария;
- Ако всички елементи работят, то и системата работи;
- Авария на елемент в аварирала система не може да възстанови нейната работоспособност и ремонтиран елемент в работеща система не може да предизвика авария.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА МИНИМАЛНИТЕ ПЪТИЩА И МИНИМАЛНИТЕ СЕЧЕНИЯ

В [7] и [8] се дефинира понятието път V като множество от елементи, които осигуряват връзка между вход и изход на една система, като под минимален път T се разбира това множество от елементи, в което изваждането на който и да е елемент води до прекъсване на връзката между вход и изход на изследваната система. Сечение K [7], [8] се нарича всяко множество от елементи, аварията на които води до авария на цялата система и нарушаване на връзката между вход и изход, а минимално сечение C е това, при което изваждането на който и да е елемент води до авария в цялата система.

При моделиране на сложни обекти броят на пътищата и сеченията е значителен, като само част от тях са минимални. Нека $A = \{x_1, \dots, x_n\}$ е множество от n на брой елемента и секции, изграждащи моделираната система. Нека $B = \{V_1, \dots, V_m\}$ е множество от m пътя V, като всеки път е изграден от елементи на множеството A:

$$V_m = \{x_i : 1 \le i \le n, x \in A\} \quad (1)$$

Нека $D = \{T_1, \dots, T_l\}$ е множество от минималните пътища T, където:

$$T_l = \{x_j : 1 \le j \le n, x \in A\} \quad (2)$$

Нека $E = \{K_1, \dots, K_t\}$ е множеството от сечения, а $F = \{C_1, \dots, C_p\}$ е множеството от минимални сечения, където:

$$K_t = \{x_k : 1 \le k \le n, x \in A\} \quad (3)$$

$$C_p = \{x_l : 1 \le l \le n, x \in A\} \quad (4)$$

Нека $G = \{M_1, \dots, M_l\}$ е допълнение на множеството D до множеството B изградено от множество от неминимални пътища M:

$$G = B \backslash D = \{M : (M \in B) \wedge (M \notin D)\} \quad (5)$$

Съгласно [7], [8], [9]и [10] за всеки неминимален път M съществува минимален път T, който се явява подмножество на M, т.е:

$$\forall M \supseteq \exists T \Leftrightarrow (M \in E) \wedge (T \in D) \quad (6)$$

Аналогично можем да дефинираме множество $H = \{N_1, \dots, N_s\}$ от неминимални сечения, като допълнение на множеството F до множеството E:

$$H = E \backslash F = \{N : (N \in E) \wedge (N \notin F)\} \quad (7)$$

В [7], [8] и [9] математически е доказано, че за всяко неминимално сечение N съществува минимално сечение C, което се явява подмножество на N:

$$\forall N \supseteq \exists C \Leftrightarrow (N \in H) \wedge (C \in F) \quad (8)$$

Процесът на определяне на повреден участък в електроенергиен обект се разделя на две основни задачи – откриване на повредения участък и откриване на съответен повреден елемент. На база на представените дотук съждения може да се твърди, че метода „Дърво на отказите“ е допустим, а множествата на минималните сечения и минималните пътища са необходимо и достатъчно условие за описание на всички възможни сценарии на отпадане на участък, в съответствие с елементарните събития, въведени в модела на надеждност.

За демонстриране на предложеният подход е извършено моделиране на електрическата разпределителна уредба на електроенергиен обект. Характерно за обекта е, че захранването на потребителите може да се осъществи от три независими източника. Разпределителната уредба е съставена от 6 секции, като първа и втора се захранват от трансформатор T1, трета и четвърта от трансформатор T2, пета и шеста от трансформатор T3. Между всички четни и всички нечетни секции са изградени напречни секционни връзки, както следва – между първа трета и пета секция и между втора, четвърта и шеста секция. За опростяване на модела всяка секция захранва два консуматора.

МОДЕЛ НА НАДЕЖДНОСТ

В програмна среда SAPHIRE е разработен модел на електрическата схема въз основа на публикувани в [7] и [8] дървета на отказите. Съгласно моделите в [7](стр. 255-256) и [8](стр. 138-139) дървото на отказите е разделено на три клона:

A. Авария в клонове, намиращи се между захранващия източник и съответния товаров възел;

B. Авария в клон, който се намира в по – отдалечена зона, отколкото зоната, в която се намира товаровия възел, а самият възел се намира на пътя между захранващия източник и авариралия клон;
C. Авария в клон от мрежата, при който пътя на захранване на авариралия клон, с отказал елемент, и разглеждания товаров възел имат общи клонове, по които те се захранват.

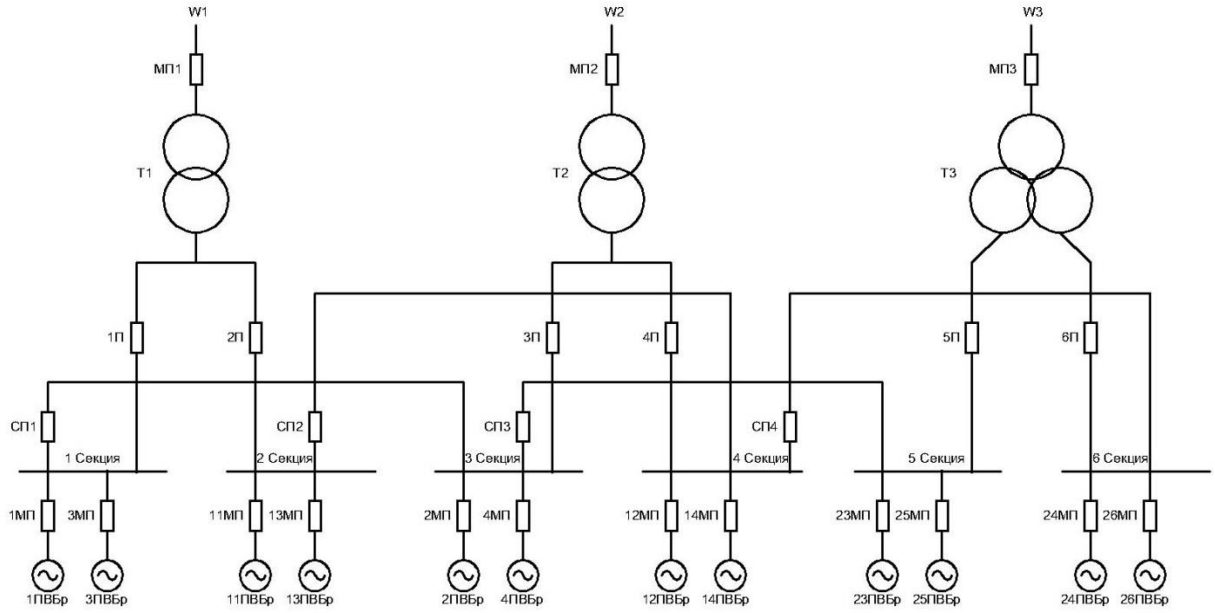
Елементарните събития, изграждащи дървото на отказите, са дефинирани като състояния на прекъсвачи и релейни защити. В дървото на отказите, като елементарни събития, са въведени и състоянията на потребителите, секциите и трансформаторите.

В настоящата публикация ще се разгледа модел на дървото на отказите свързан с отпадане на захранването на потребител 1ПВБр. В зависимост от трансформатора, захранващ на потребителя групите елементи от тип A, B и C са различни.

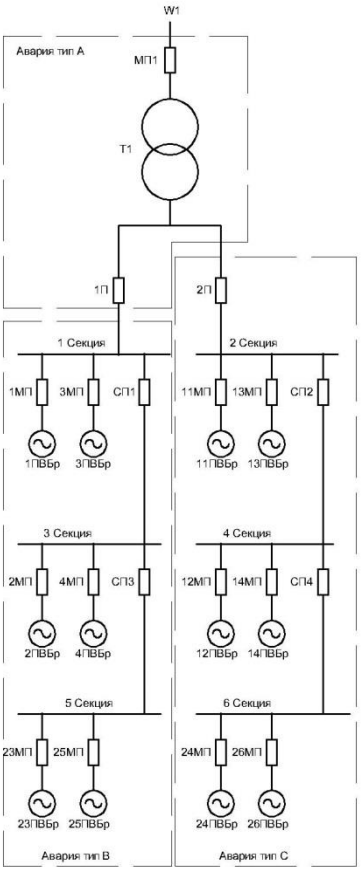
Програмният продукт SAPHIRE генерира автоматично множеството F от минимални сечения C. Множеството D от минимални пътища T също се получава автоматично, като в дървото на отказите всеки елемент „И“ се замени с „ИЛИ“ и всеки елемент „ИЛИ“ се замени с „И“ [9]. В табл.1 е представен произволно избран минимален път (№ 2834) при захранване на системата от трансформатор Т2.

Минимален път № 2834, захранване от Т2 **Таблица 1**

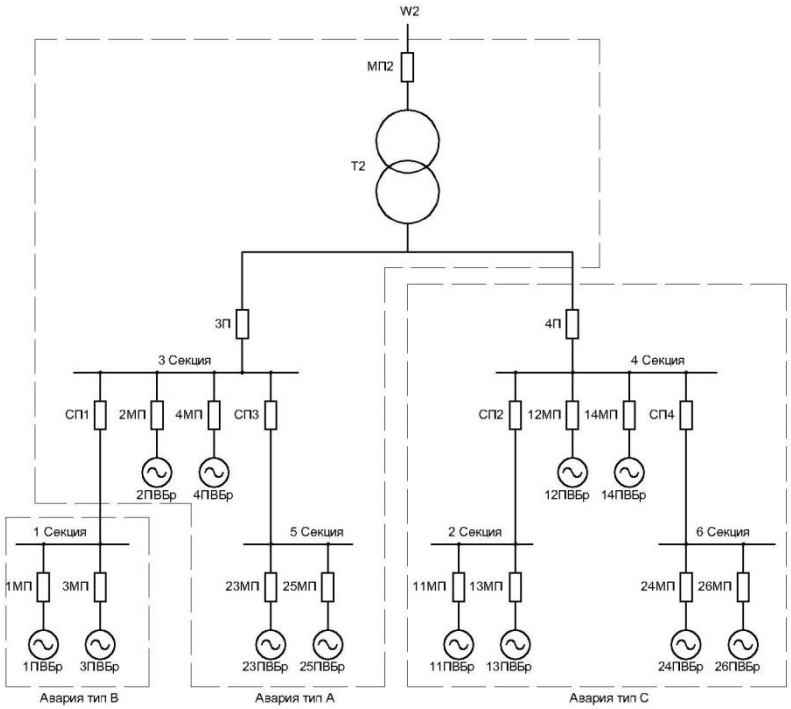
Минимален път	Заработили елементи		Участъци
	Прекъсвачи	Релейни защити	
12ПВБр, 23ПВБр, 4ПВБр, 25ПВБр, 26ПВБр, 2Т, 3ПВБр, 4ПВБр, П-14ПВБр, П-1ПВБр, П-2ПВБр, СП-2, РЗ-14ПВБр, РЗ-1ПВБр, РЗ-2ПВБр, РЗ-СП-2, СЕКЦИЯ-1, СЕКЦИЯ-3, СЕКЦИЯ-4, СЕКЦИЯ-5, СЕКЦИЯ-6, W2	П-1ПВБр	РЗ-1ПВБр	W2
	П-2ПВБр	РЗ-2ПВБр	Т2
	П-14ПВБр	РЗ-14ПВБр	3ПВБр
	СП-2	РЗ-СП-2	4ПВБр
			12ПВБр
			23ПВБр
			24ПВБр
			25ПВБр
			26ПВБр
			СЕКЦИЯ-1
			СЕКЦИЯ-3
			СЕКЦИЯ-4
			СЕКЦИЯ-5
			СЕКЦИЯ-6



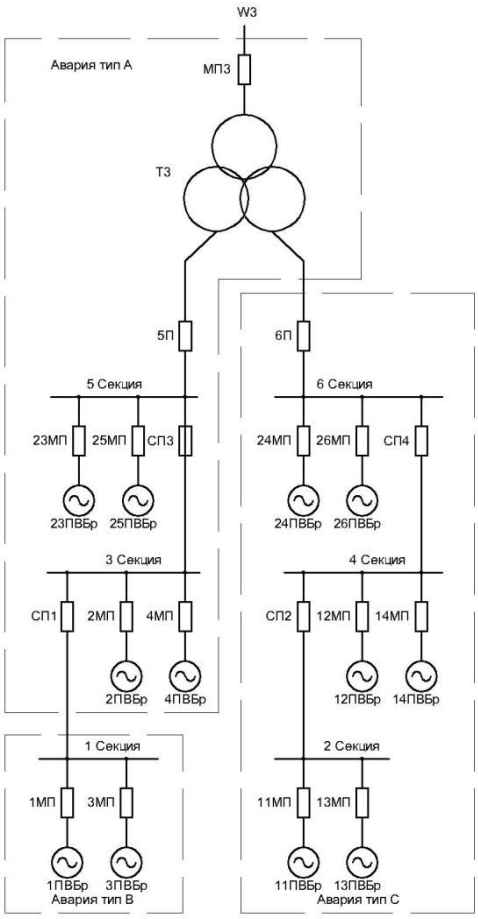
Фиг.1: Структурна схема на електроенергиен обект



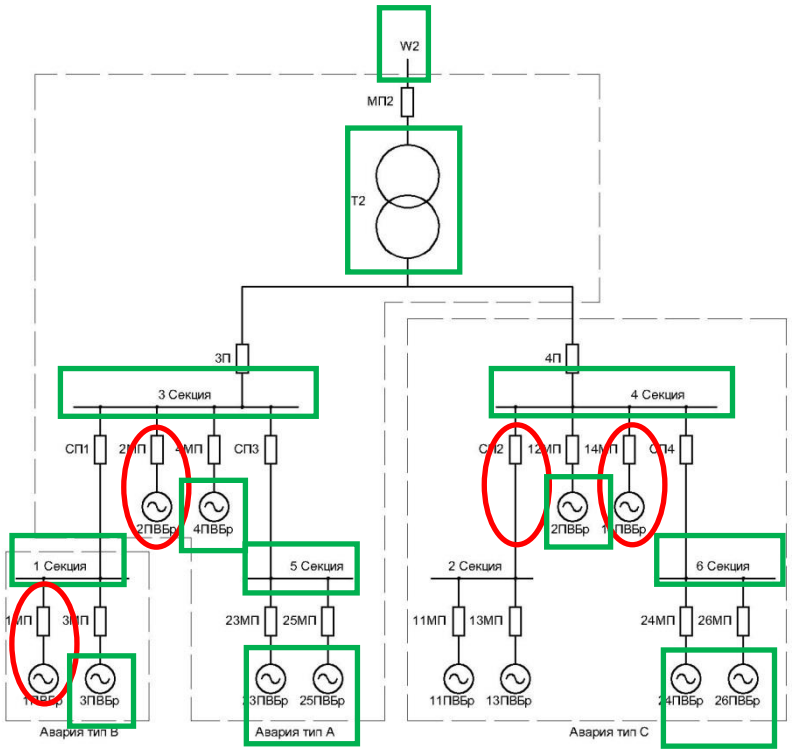
Фиг.2: Структурна схема при захранване от Т1



Фиг.3: Структурна схема при захранване от Т2



Фиг.4: Структурна схема при захранване от Т3



Фиг.5: Структурна схема при захранване от Т2 и представяне на информацията за минимален път № 2834. С правоъгълници са означени здравите участъци. С елипси са означени заработилите прекъсвачи и съответни релейни защити

На фиг.5 е показана графичната интерпретация на разглеждания минимален път. Ако допуснем, че елементарните събития, описващи състоянието на участъците, представят тяхното изправно състояние, то предвид фиг.5 може да се твърди, че заработилите двойки прекъсвачи и релейни защити разделят електрическата схема на потенциални повредени участъци и здрави участъци, представени в табл.2.

Категоризация на участъците на разглежданият електроенергиен обект **Таблица 2**

Здрави участъци	Потенциални повредени участъци		
	Участъци без отказал елемент или заработила система за близко резервиране	Участъци с отказал елемент и заработила система за далечно резервиране	Участъци, чието състояние не може да бъде дефинирано
W2	1ПВБр	11ПВБр	
Т2	2ПВБр	13ПВБр	
3ПВБр	14ПВБр		
4ПВБр	СЕКЦИЯ-2		
12ПВБр			

23ПВБр			
24ПВБр			
25ПВБр			
26ПВБр			
СЕКЦИЯ-1			
СЕКЦИЯ-3			
СЕКЦИЯ-4			
СЕКЦИЯ-5			
СЕКЦИЯ-6			

Нека дефинираме следните множества:

- Множество от участъци $I\{x_0, \dots, x_l\}$, където „x“ е съответен участък от електрическа верига.
- Множество от ненаредени двойки елементи - релейни защити и прекъсвачи - $J\{\{c_0, r_0\}, \dots, \{c_m, r_m\}\}$

Тогава може да се твърди, че всеки минимален път е изграден от следните подмножества:

- Множество от здрави участъци $\mathrm{K}\{\mathrm{y}_0, \dots, \mathrm{y}_\mathrm{n}\}$, което се явява подмножество на I:

$$\mathrm{K} \subset \mathrm{I} \because \{(\mathrm{y} \in \mathrm{K}) \wedge (\mathrm{y} \in \mathrm{I})\} \quad (9)$$

- Множество от изправни релейни защити и прекъсвачи $\mathrm{L}\left\{\{\mathrm{c}_0, \mathrm{r}_0\}, \dots, \{\mathrm{c}_\mathrm{p}, \mathrm{r}_\mathrm{p}\}\right\}$, което се явява подмножество на J:

$$\mathrm{L} \subset \mathrm{J} \because \{\{\{\mathrm{c}_\mathrm{p}, \mathrm{r}_\mathrm{p}\} \in \mathrm{L}\} \wedge \{\{\mathrm{c}_\mathrm{p}, \mathrm{r}_\mathrm{p}\} \in \mathrm{J}\}\} \quad (10)$$

Ако от множеството участъци I извадим множеството от определени в съответния минимален път здрави участъци K, то получаваме множеството $S = \{z_0, \dots, z_r\}$ от потенциални повредени участъци:

$$I \backslash K = S\{z: (z \in \mathrm{I}) \wedge (\mathrm{z} \notin \mathrm{K})\} \quad (11)$$

Тогава, задачата за определяне на повреден участък може да се дефинира като определяне на сюръективното изображение на множеството J, определено с подмножества L, в множеството I, съставено от подмножества S:

$$f(J) = Im\, J = \{S: S = f(L), L \in J\} \subseteq I \quad (12)$$

В табл.3 е представено минимално сечение № 207 при захранване на изследваната система от трансформатор T1. На фиг.6 е представена графичната интерпретация на разглежданото минимално сечение. Нека предположим, че всички елементи в минималното сечение са напълно аварирали. Всяко минимално сечение е изградено от:

- Множество от ненаредени двойки прекъсвачи и релейни защити $\mathrm{T}\{\{\mathrm{c}_0, \mathrm{r}_0\}, \dots, \{\mathrm{c}_r, \mathrm{r}_\mathrm{r}\}\}$, при които единият елемент от ненаредените двойки е отказал, което се явява подмножество на J:

$$\mathrm{T} \subset \mathrm{J} \because \{\{\{\mathrm{c}_\mathrm{r}, \mathrm{r}_\mathrm{r}\} \in \mathrm{T}\} \wedge \{\{\mathrm{c}_\mathrm{r}, \mathrm{r}_\mathrm{r}\} \in \mathrm{J}\}\} \quad (13)$$

- Един повреден участък, инициирал разрастващата се авария;

Нека отново разгледаме множеството S от потенциални повредени участъци. То може да се разглежда като обединение на следните три множества:

- Множество от повредени участъци U, за които имаме правилно заработване на прилежащите ненаредени двойки прекъсвачи и релейни защити или заработване на системите за близко резервиране на основните релейни защити

$$U \subset J \because \{(k \in U) \wedge (k \in S) \wedge (k \in I)\} \quad (14)$$

- Множество W от повредени участъци, при които ненаредени двойки прекъсвачи и релейни защити представляват системата за далечно резервиране на релейните защити
- Множество от участъци X, които не са дефинирани.

$$S\backslash\{U \wedge W\} = X\{l: (l \in S) \wedge (l \notin U) \wedge (l \notin W)\} \quad (15)$$

Минимално сечение №207, захранване от Т1 **Таблица 3**

Минимално сечение	Отказали елементи		Повредени участъци
	Прекъсвачи	Релейни защити	
23ПВБр-Авария, СП-1, 1П-1Т, РЗ-23ПВБр, РЗ-МП-1-1Т, РЗ-СП-3		РЗ-23ПВБр	23ПВБр-Авария
		РЗ-СП-3	
	СП-1		
	1П-1Т		
		РЗ-МП-1-1Т	

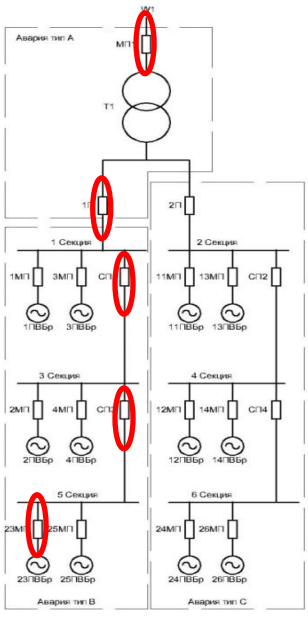
Тогава:

- Задачата за определяне на множеството от повредени участъци U може да се дефинира като определяне на сюрективното изображение на множеството J, определено с подмножества L, в множеството S, съставено от подмножества U:

$$f(J) = Im\,J = \{U: U = f(L), L \in J\} \subseteq S \quad (16)$$

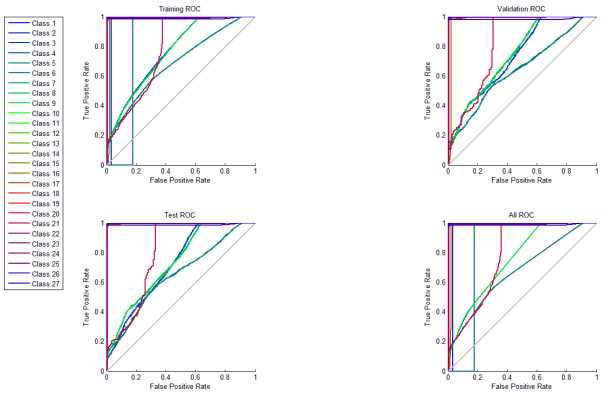
- Задачата за определяне на множеството W от повредени участъци и отказ на прекъсвачи или релейни защити се свежда до намиране на сюрективното изображение на множеството T в множеството S:

$$f(J) = Im\,J = \{W: W = f(T), T \in J\} \subseteq S \quad (17)$$

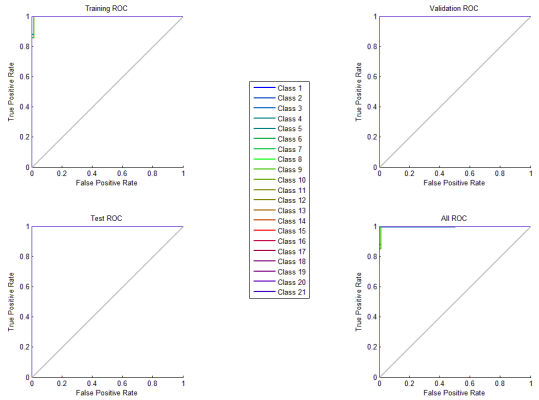


Фиг.6: Структурна схема при захранване от Т1. С елипси са означени повредените

Представеният подход за определяне на еталонни входове и изходи, за обучение на невронна мрежа, използва единствено данни от регистратора на събития. За определяне на състоянието на множеството от участъци X се изпраща съответна заявка към базата от данни на обекта.



Фиг.7: ROC характеристики при множество от еталони T1, T2 и T3



Фиг.8: ROC характеристики при множество от еталони за T1

МОДЕЛ НА НЕВРОННА МРЕЖА

Проверка за правилното определяне на еталонните входове и изходи се извърши с линейна невронна мрежа, с обратно разпространение на грешката, която се явява стандартно приложение в среда Matlab. Първият експеримент се извърши с въвеждане на цялото множество от 24 653 еталона. Стандартното приложение на Matlab допуска използване на двуслойна мрежа, като броят на входовете е 50, а броят на изходите 27. Броят на невроните в скрития слой е 50. Предавателната функция е сигмоидална. Обучението се извърши със стандартен алгоритъм с обратно разпространене на грешката, като завърши след 3 мин. и 46 сек и 166 епоха. На фиг.7 са представени ROC (received operating characteristics) характеристиките на невронната мрежа. Поради неоднозначното дефиниране на някои от изходите (аварии в секции) подходът се счете за неуспешен. Следващият експеримент въведе в невронната мрежа 7228 еталона, при захранване от T1. Броят на входовете и изходите бе намален съответно до 38 и 21, а броят на невроните в скрития слой бе редуциран до 40. В резултат на направените изменения невронната мрежа бе обучена за 84 епоха, продължили 31 секунди, а средноквадратичната грешка достигна 0.109×10^{-3}. ROC-характеристиките са представени на фиг.8 и са близки до идеалните. С направеният експеримент се доказа, че използването на минималните пътища и минималните сечения, за генериране на множество от еталонни входове и изходи, дава изключително добри резултати.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение може да се твърди, че теорията на множествата дава възможност за абстрактна дефиниция на задачите за определяне на повредени участъци, релейни защити или прекъсвачи. Експерименталното прилагането на минималните пътища и минималните сечения, като еталони за обучение на невронна мрежа, се оказа сполучливо. Предложеният метод решава проблема, свързан със зависимостта на качеството на обучение на невронната мрежа от броя на въведените еталони. Използваните входните данни са от регистратора на събития, като е представен подход за автоматизирано определяне на заявки към бази от данни или към IED устройства. Така предложеният алгоритъм би могъл да се прилага върху всяка система, чиято работа може да се моделира чрез дървовидна структура.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Fukui, Ch., K. J., "Expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vols. PWRD-1, no. 4, pp. 83-90, 1986

[2] Chan, E. H. P., "Application of neural-network computing in intelligent alarm processing (power systems)", Power Industry Computer Application Conference, 1989. PICA '89, Conference Papers, 1989

[3] Yang Hong-Tzer, C. W.-Y. H. C.-L., "New Neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 220-230, 1994

[4] Yang, Hong-Tzer, C. W.-Y. H. C.-L., "Power system distributed on-line fault section estimation using decision tree based neural nets approach", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 1, pp. 540-546, 1995

[5] Zhang N., K. M., "Verifying the Protection System Operation Using an Advanced Fault Analysis Tool Combined with the Event Tree Analysis", 2004. [Online]. Available: http://pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/2004_general_publications/md-000538.pdf

[6] Kezunovic, M. B., "Use of intelligent techniques for analysis of faults and protective relay operations", Conference of 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007

[7] Endrenyi, J., “Reliability modeling in electric power systems”, New York: Wiley, 1979

[8] Малчев, К., “Надеждност в електоренергетиката”, София: ТУ-София, 2008

[9] Limnios, N., “Fault trees”, France: Hermès Science/Lavoisier, 2005

[10] Пеева, К., “Линейна алгебра”, София: ТУ - София, 2010

Автор: Десислав Тодоров, асистент, катедра „Електроенергетика“, Електротехнически Факултет, ТУ-София, E-mail address: *desislav_todorov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Рад Станев

ПРЕХОДЕН ТОПЛИНЕН АНАЛИЗ НА МАСЛЕН РАЗПРЕДЕЛИТЕЛЕН ТРАНСФОРМАТОР С МКЕ

Райна Ценева, Янко Славчев, Емил Мечков, Валентин Матеев

Резюме: *Разпределението на температурата във вътрешността на трансформатора е важен показател, определящ характеристиките му. Тази статия представя моделиране на процеса на загряване на маслен разпределителен трансформатор 160kVA. За прилагане на преходния топлинен анализ са използвани метода с крайни елементи и програмата Ansys. Получено е разпределение на топлинното поле със стойности на температурата и са построени кривите на загряване на намотките и магнитопровода на трансформатора.*
Ключови думи: *метод с крайни елементи* (*МКЕ*), *преходен топлинен анализ, маслен трансформатор*

TRANSIENT THERMAL ANALYSIS OF OIL-IMMERSED DISTRIBUTION TRANSFORMER WITH FEM

Raina Tzeneva, Yanko Slavtchev, Emil Mechkov, Valentin Mateev

Abstract: *The temperature distribution in the transformer interior is a significant parameter governing a transformer's performance. This paper presents the process of heating modeling of oil-immersed distribution transformer 160kVA. Finite element method and ANSYS program have been employed for transient thermal analysis implementation. The thermal field distribution with values of temperature has been obtained and heating curves of windings and core of transformer has been built.*
Keywords: *finite element method* (*FEM*)*; transient thermal analysis; oil-immersed transformer*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

От съществено значение е да се определи разпределението на температурата и особено прегряванията в трансформатора по време на работа. Въпреки, че повишаването на температурата във вътрешността на трансформатора само по себе си не може да има незабавен ефект, то предизвиква други нежелани последици като прекомерно влошаване на изолацията, което в дългосрочен план ще намали живота на трансформатора, отразявайки се на икономиката на електроенергийната система. Поради това е необходимо да бъде определено допустимото максимално прегряване в трансформатора за определен вид натоварване, така че да сме е в състояние както да вземем решение за работните условия, така и да определим остатъчния живот на трансформатора. От гледна точка на потребителя, температурите в трансформатора са важни за определяне на коли-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

чеството и продължителността на претоварването, което той може да издържи, както и да се оцени въздействието върху живота на трансформатора от експлоатация при различни температури. За конструктора, предвиждането на температурите в различни точки е необходимо за определянето на количеството на медта (алуминия) в намотките, изводите, типа на охлаждането и позицията на каналите, класа на изолацията и проектиране и настройка на оборудването за охлаждане. Освен това, повишената конкуренция на пазара изисква точно определяне на топлинния профил на трансформатора, което може да доведе до по-икономично и ефективно производство [1].

Много научни статии са посветени на топлинния анализ на трансформатори. Така например, в [2] енергийните уравнения и уравненията на Навие-Стокс са решени с помощта на числения метод с крайни разлики. В [3] е използвана сместа задача топлинно поле – динамика на флуидите – електромагнитно поле, за да се определят загубите в намотките и магнитопровода. Авторите в [4] и [5] са изследвали различни подходи към топлинното моделиране на трансформатори. За тази цел са създали три различни модела – 2D модел, чиито резултати се базират на изчисления чрез метода с крайни елементи на топлинното поле на двуизмерен модел; термо-хидравличен модел, разработен за да предостави важна информация за състоянието на трансформатора, представящ топлинното поведение на магнитопровода, намотките и маслото, за преходен и установен режим; топлинен модел на трансформатора под формата на заместваща схема, основан на основната теория за топлопренасяне. Друга публикация [6] описва в подробности цифровото определяне на разпределението на температурата в силови трансформатори чрез използването на програмата Ansys. Основните начини за пренос на топлина: топлопроводност, конвекция и лъчене са използвани в [7], за да се получи разпределението на температурата в трансформатора в установен режим. В настоящата статия е използван метода с крайни елементи за числено решаване на поставената задача.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

2.1. Обект на изследването

Обект на изследването е маслен разпределителен трансформатор с основни параметри, специфицирани в табл.1 и данни за размерите на основните компоненти (намотки, магнитопровод, казан) – в табл.2. Характеристиките на материалите, от които са изработени тези компоненти са посочени в табл.3.

2.2. Математичен модел на преходен топлинен процес в трансформатор

При триизмерния преходен топлинен анализ, топлинното поле се описва със зависимостта:

$$\nabla^2 T - \frac{\rho c}{\lambda}\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{q}{\lambda} \qquad (1)$$

където λ е коефициент на топлопроводимост, W/mK; ρ – плътност на материала, kg/m^3; c – специфична топлина, J/(kgK); q – обемна плътност на източниците на топлина, W/m^3. Източниците на топлина са получени чрез загубите в магнитопровода (загуби на празен ход) и намотките (загуби при товар) на трансформа-

тора, посредством линеен хармоничен [8] и нелинеен преходен анализ [9] на електромагнитното поле на активната част на трансформатора. Прието е тези загуби да бъдат равномерно разсеяни в обема на магнитопровода и намотките на трансформатора, респективно е получена плътността на загубите, използвана за изчисляването на източника на топлина.

Основни параметри на изследвания трансформатор **Таблица 1**

Параметър	**Стойност**
Производител	"Елпром Трафо СН" АД, България, Кюстендил
Тип	ТМХ 160/10
Номинална мощност	160 kVA
Номинално напрежение на първичната намотка	10 kV
Номинално напрежение на вторичната намотка	0,4 kV
Група на свързване	Yyn0
Честота	50 Hz
Загуби на празен ход	300 W
Загуби при товар	2350 W
Импеданс на к. с.	4 %
Дължина	1050 mm
Ширина	775 mm
Височина	1195 mm

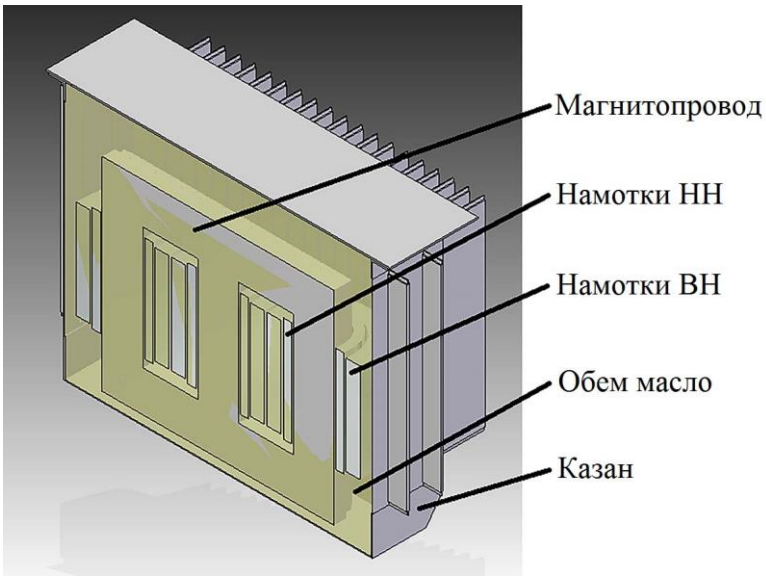
Данни за размерите на компонентите на изследвания трансформатор **Таблица 2**

Параметър	**Стойност**
Височина на прозореца на магнитопровода	360 mm
Лице на напречното активно сечение на ядрата и ярема	1,628 dm^2
Височина на магнитопровода	600 mm
Дължина на магнитопровода	684 mm
Дебелина на намотка НН	24,5 mm
Дебелина на намотка ВН	41 mm
Вътрешни диаметри на намотка НН (овална)	130 / 182,9 mm
Вътрешни диаметри на намотка ВН (овална)	192 / 244,9 mm
Височина на намотките	300 mm
Вътрешни размери на казана (Ш х Д х В)	910 x 415 x 755 mm
Брой ребра / дълбочина на дългите страни	19 бр. / 170 mm
Брой ребра / дълбочина на късите страни	4 бр. / 55 mm

2.3. Модел, базиран на МКЕ

За създаване на триизмерната геометрия на гореспоменатия трансформатор е използван 3D CAD софтуера Solid Edge ST1 [10]. Структурата на компонентите на трансформатора е доста сложна, поради което след направени допускания, може да бъде прието, че той е съставен от пет главни компонента:

магнитопровод, намотка НН, намотка ВН, обем на маслото и казан. Геометрията на тези компоненти, създадени за модела съвпада напълно с реалната геометрия. Фиг.1 представя геометрията на трансформатора. Численото решение на преходния топлинен процес е извършено със софтуера ANSYS 12.0 [11].



Фиг.1. Геометрия на трансформатора.

Характеристики на материалите **Таблица 3**

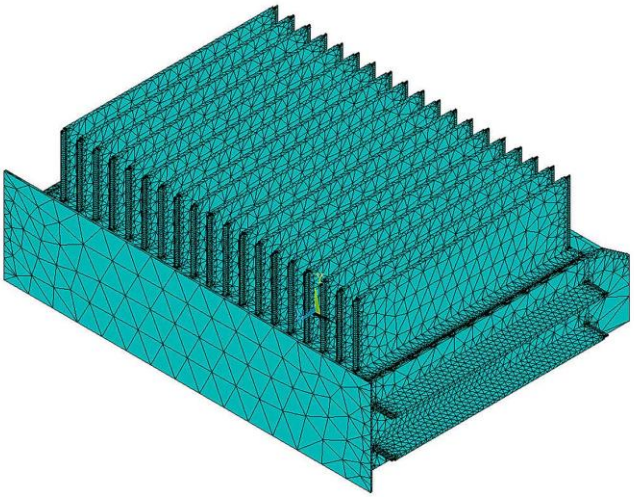
Материал	**Изотропна топлинна проводимост [W/(m.K)]**	**Плътност [kg/m^3]**	**Специфична топлина [J/(K.kg)]**
Алуминий	203	2700	904
Електротехническа стомана	26	7650	812
Трансформаторно масло	0,12	890	2060

За генериране на мрежата от крайни елементи е използван елемента SOLID 98. Този елемент е тетраедър с 10 възела. Изключително подходящ е за моделиране на мрежа в обеми с неправилна форма, създадени в CAD/CAM системи. Моделът с мрежата от крайни елементи е показан на фиг.2. За улеснение при представяне на резултатите са възприети условни означения за някои от компонентите на трансформатора: A – намотка ВН, фаза А; B – намотка ВН, фаза В; C – намотка ВН, фаза С; D – намотка НН, фаза А; E – намотка НН, фаза В; F – намотка НН, фаза С (фиг.3).

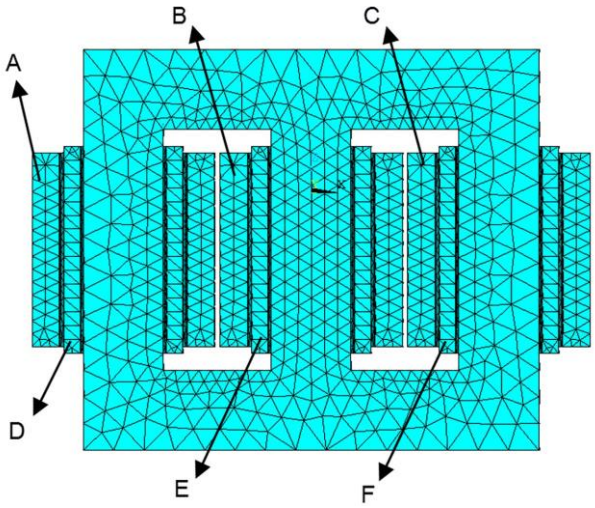
Изследваният трансформатор използва метод на охлаждане ONAN, дефиниран от стандарта БДС EN 60076-2:2011 Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори, потопени в течност. Зададени са три типа естествени конвективни гранични условия: по външната повърхност на казана, в маслото и между намотките и магнитопровода. Граничните условия, зададени по тези повърхности се изразяват чрез зависимостта (2):

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_0) \qquad (2)$$

където h (W/m^{2}K) е коефициентът на топлоотдаване чрез конвекция, а T_0 е температурата на околната среда.



Фиг. 2 Мрежа от крайни елементи



Фиг. 3 Условни означения

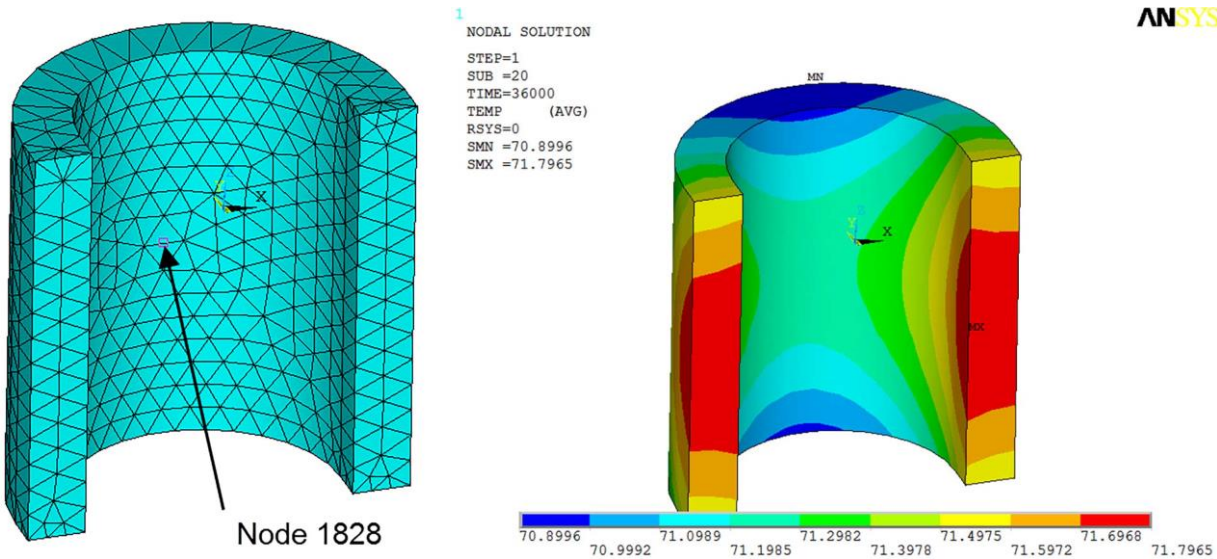
При дефиниране на модела са направени следните допускания: зададените материални характеристики са константи спрямо температурата; зададена е начална температура от 20°C на целия трансформатор.

Първоначално задачата е решена при задаване на 15 часа за преходния режим с отчитане на стойностите на температурата през 1 час. От резултатите се вижда, че установен режим се достига в края на 8 час. Поради тази причина задачата е решена повторно за 8 часа през 15 минути.

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

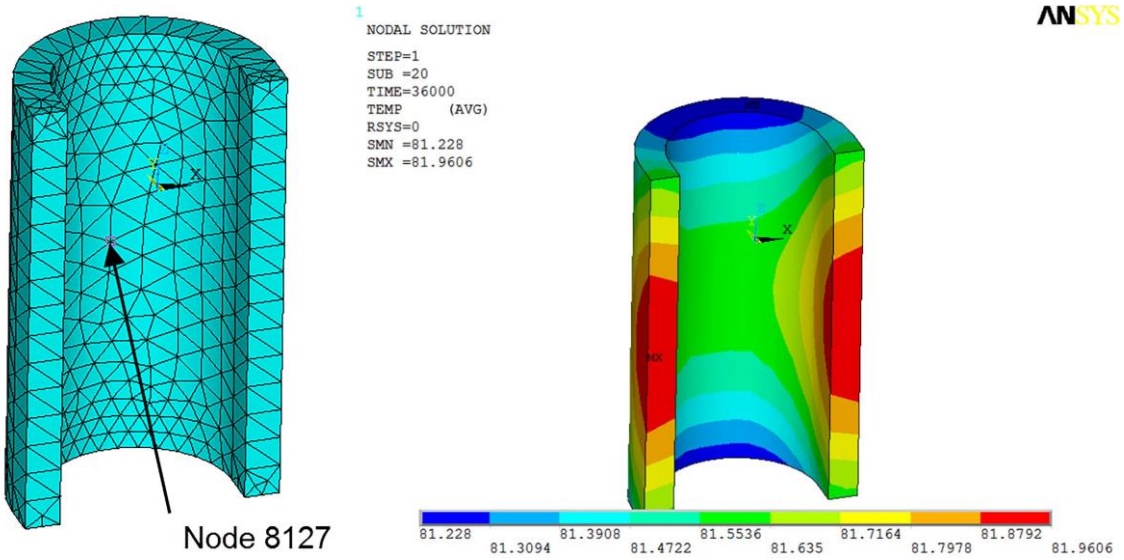
Получени са следните резултати:

- Отчетена е температурата във възел № 1828 от компонент B. Температурата във възлите от обема на B варира в границите 0,5÷1°C (фиг.4);



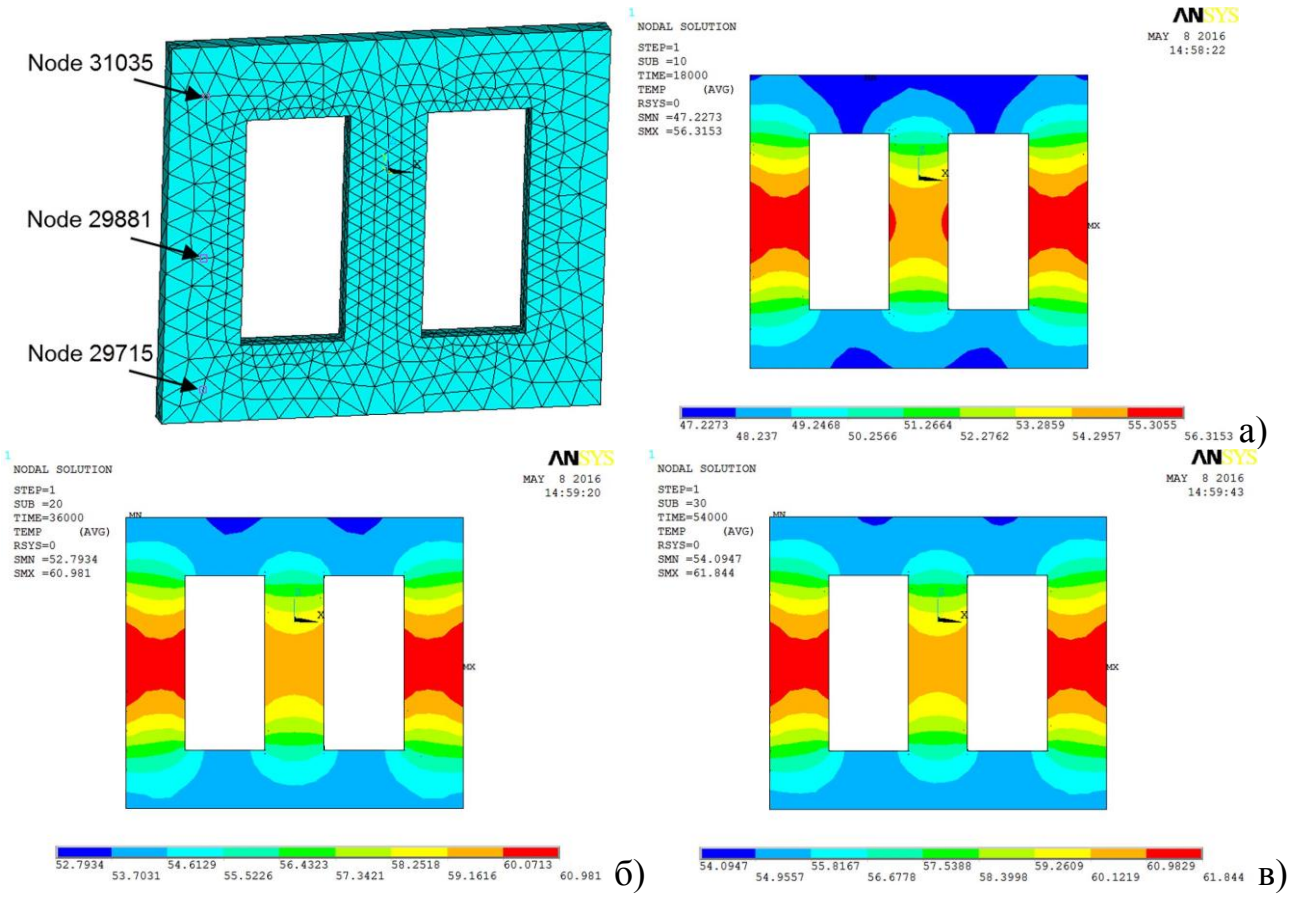
Фиг.4. Разпределение на температурата в компонент B след 10 часа.

- Отчетена е температурата във възел № 8127 от компонент Е. Температурата във възлите от обема на Е варира в границите 0,5÷1°C (фиг. 5);



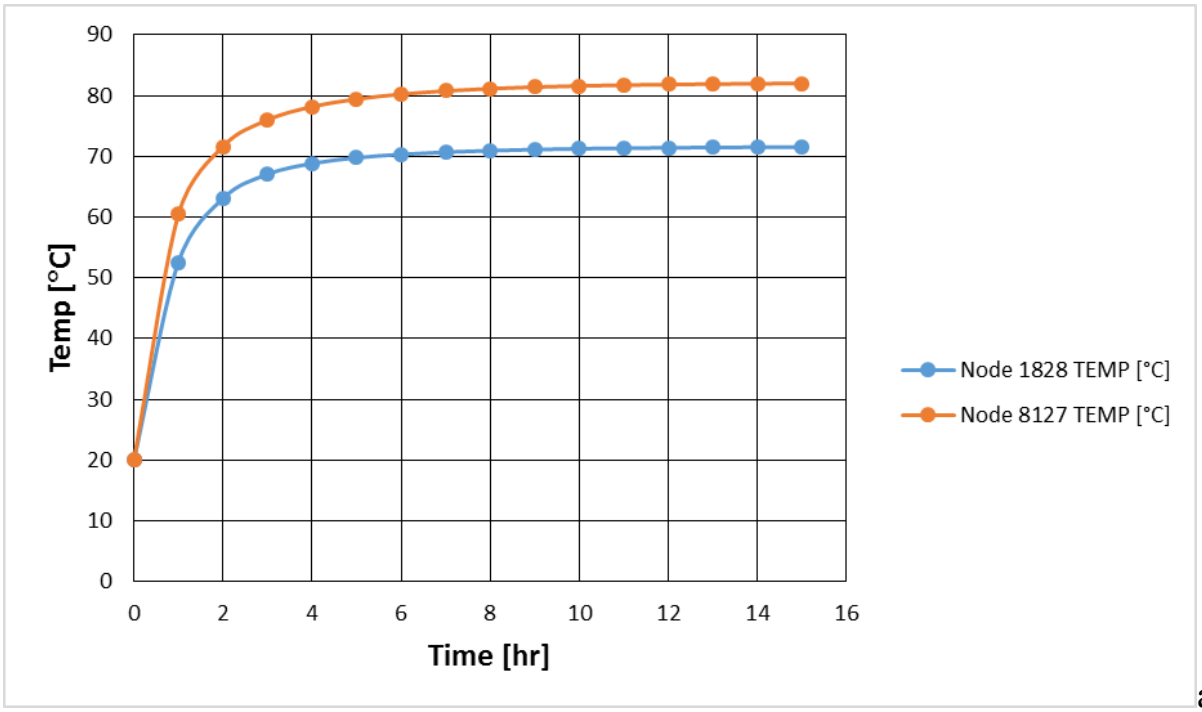
Фиг.5. Разпределение на температурата в компонент Е след 10 часа.

- Отчетена е температурата във възли №№ 29715, 29881 и 31035 от обема на магнитопровода. Температурата тук варира в широки граници (фиг.6);

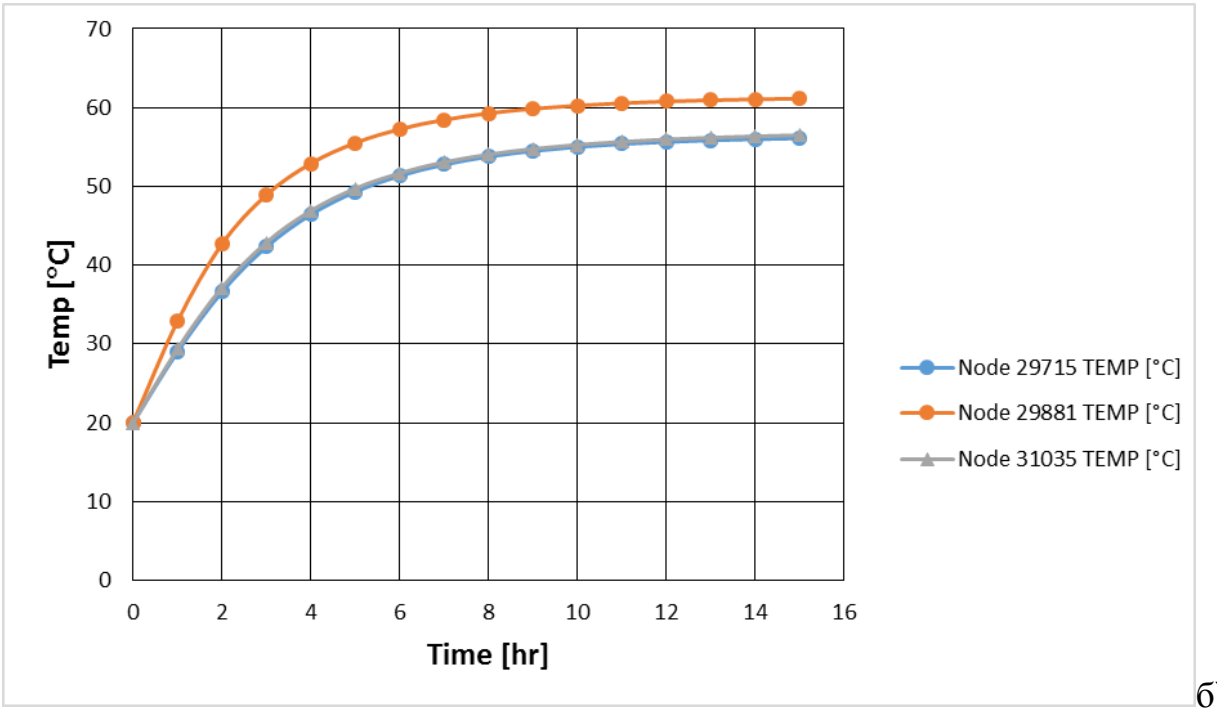


Фиг.6. Разпределение на температурата в обема на магнитопровода след 5 часа (а), след 10 часа (б) и след 15 часа (в).

- Построени са кривите на загряване на намотките и магнитопровода на трансформатора при 15 часа за преходния режим през 1 час (фиг.7) и при 8 часа през 15 минути (фиг. 8), които представляват нарастването на температурата във времето по експоненциален закон;

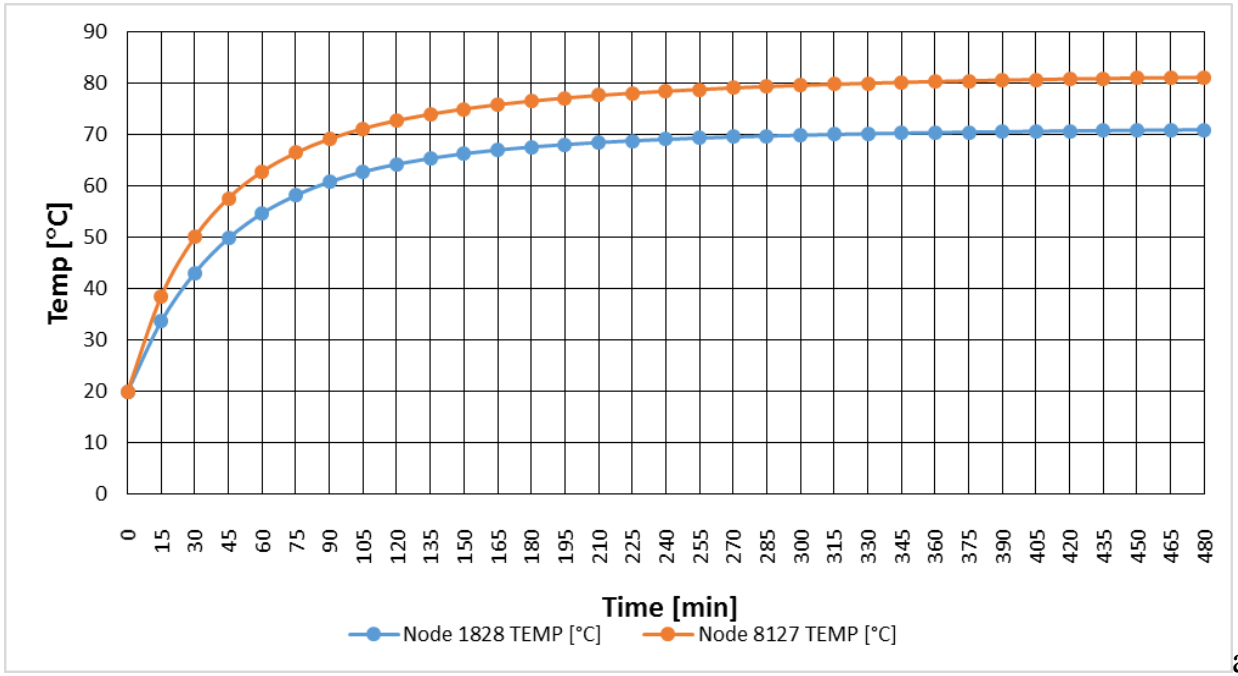


а)

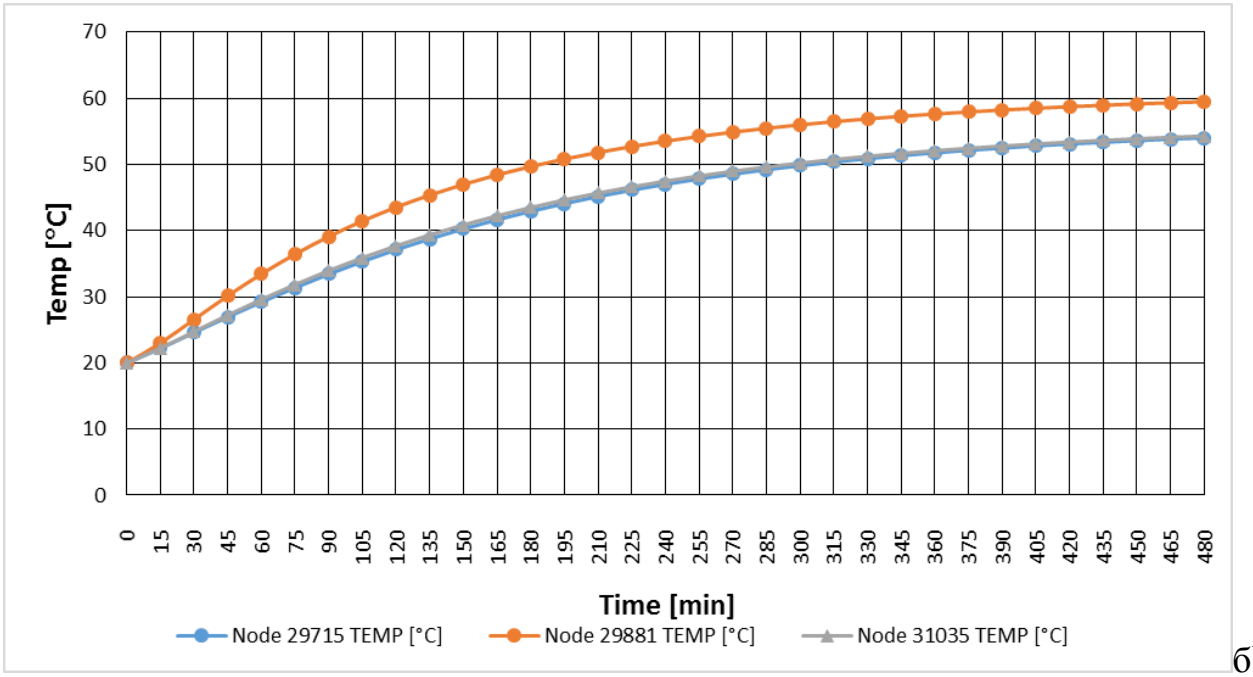


б)

Фиг.7. Криви на загряване на намотките (а) и магнитопровода (б) при 15 часа за преходния режим през 1 час.



а)



б)

Фиг.8. Криви на загряване на намотките (а) и магнитопровода (б) при 8 часа за преходния режим през 15 минути.

- Отчетени са времеконстантите на намотките и магнитопровода при 8 часа за преходния режим през 15 минути. Според [1] времеконстантата на загряване е равна на времето, при което се достига 63.2% от установената температура. Времеконстантата на загряване за намотка НН е 30 min, за намотка ВН – 35 min, а за магнитопровода – 82 min.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От проведеното числено моделиране на топлинното поле на маслен трансформатор 160kVA са получени резултати за температурите на компонентите в характерни точки от конструкцията. Изследването е проведено в преходен топлинен режим.

Определени са топлинните времеконстанти на намотките и магнитопровода. Установените прегрявания на намотките и магнитопровода отговарят на изискванията на БДС EN 60076-2:2011 Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори, потопени в течност.

Предложената методика може да бъде приложена при изследването и проектирането и на други конструкции маслени разпределителни трансформатори.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Haritha V V S S., ***Thermal modeling of electrical utility transformer"***, Dissertation, International Institute of Information Technology, India, 2011

[2] Taghikhani M., ***ONAN power transformer heat transfer modeling***, International Journal of Energy Science, vol.1, no.3, 2011, pp. 176-179

[3] Smolka J., Nowak A., ***Experimental validation of the coupled fluid flow, heat transfer and electromagnetic numerical model of the medium-power dry-type electrical transformer,*** International Journal of Thermal Sciences, 47, 2008, pp. 1393-1410

[4] Kapetanović I., Tešanović M., Kasumović M., ***Different approaches to power transformer thermal modelling,*** 11th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2007, Hammamet, Tunisia, 05-09 September, 2007, pp. 1107-1110

[5] Madžarević V., Kapetanović I., Tešanović M., Kasumović M., ***Different approach to thermal modeling of transformers-a comparison of methods,*** International Journal of Energy and Environment, Issue 5, vol. 5, 2011, pp. 610-617

[6] Najdenkoski K., Manov D., ***Numerical determination of temperatures distribution in energy transformers,*** Mako CIGRE 2004, Ohrid, 26-29 September 2004, pp. A2-02 1-A2-02 9. (in Macedonian)

[7] Eteiba M., Alzahab E., Shaker Y., ***Steady state temperature distribution of cast-resin dry type transformer based on new thermal model using finite element method,*** International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, vol. 4, No. 2, 2010, pp. 361-365

[8] Mechkov E., Tzeneva R., Mateev V., Yatchev I., ***Electromagnetic field modelling using FEM of the active part of oil-immersed transformers,*** Materials Science Forum, Trans Tech Publications, Switzerland, 2016, pp 184-189

[9] Матеев В., Ценева Р., Мечков Е., Ячев И., ***Моделиране на електромагнитното поле на активната част на маслен трансформатор с МКЕ,*** Годишник на Технически Университет – София, ISSN 1311-0829, т. 66, кн. 1, 2016, стр. 527-532

[10] Solid Edge documentation, Version ST1, 2008

[11] ANSYS 12 documentation. Ansys, Inc., 2009

Автори: Райна Ценева, проф. д-р инж., катедра „Електрически апарати”, Електротехнически факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *tzeneva@tu-sofia.bg;* Янко Славчев, доц. д-р инж., катедра „Инженерна логистика, подемно-транспортна и строителна техника”, Машиностроителен факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *blamail@abv.bg;* Емил Мечков, маг. инж., докторант, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *emil_pm@abv.bg;* Валентин Матеев, доц. д-р инж., катедра „Електрически апарати”, Електротехнически факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vmateev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. дтн Илиана Маринова

СЪСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ НА СЪВРЕМЕННИТЕ ВЕТРОЕНЕРГИЙНИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛНИ СИСТЕМИ - част I

**Захари Зарков, Борис Демирков, Людмил Стоянов,
Иван Бачев, Владимир Лазаров**

Резюме: *Статията представлява обзор на съвременното състояние на ветроенергийните преобразувателни системи (ВЕПС) и показва тенденциите на тяхното развитие. Дадени са сведения за дела на произведената енергия от вятърни генератори по света. Разгледани са актуалните конфигурации на ВЕПС. Направена е класификация на генераторите и силовите електронни преобразуватели, използвани в системите. Показани са най-често използваните схеми на преобразуватели, както и перспективни такива. Засегнати са възможностите за приложение на нови видове генератори като безчетков двойнозахранен асинхронен генератор и свръхпроводим генератор. Дадени са базови сведения за управлението на системата.*
Ключови думи: *ветроенергийни преобразувателни системи, вятърни генератори, електронни преобразувателни*

STATE AND DEVELOPMENT OF MODERN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS - part I

**Zahari Zarkov, Boris Demirkov, Ludmil Stoyanov,
Ivan Bachev, Vladimir Lazarov**

Abstract: *This paper is an overview of the current state of wind energy conversion systems (WECS) and represents the trends of their development. Information about the share of energy produced by wind turbines around the world is given. The current configurations of the WECS are presented along with a classification of power electronic converters and generators used in wind turbines. The most commonly applied converter circuits as well as promising ones are shown. Some possibilities for the application of new types of generators as brushless doubly-fed induction generator and superconducting generator are concerned. Basic information about the control of the system is also given.*
Keywords: *wind energy conversion systems, WECS, power electronic converters, wind turbines*

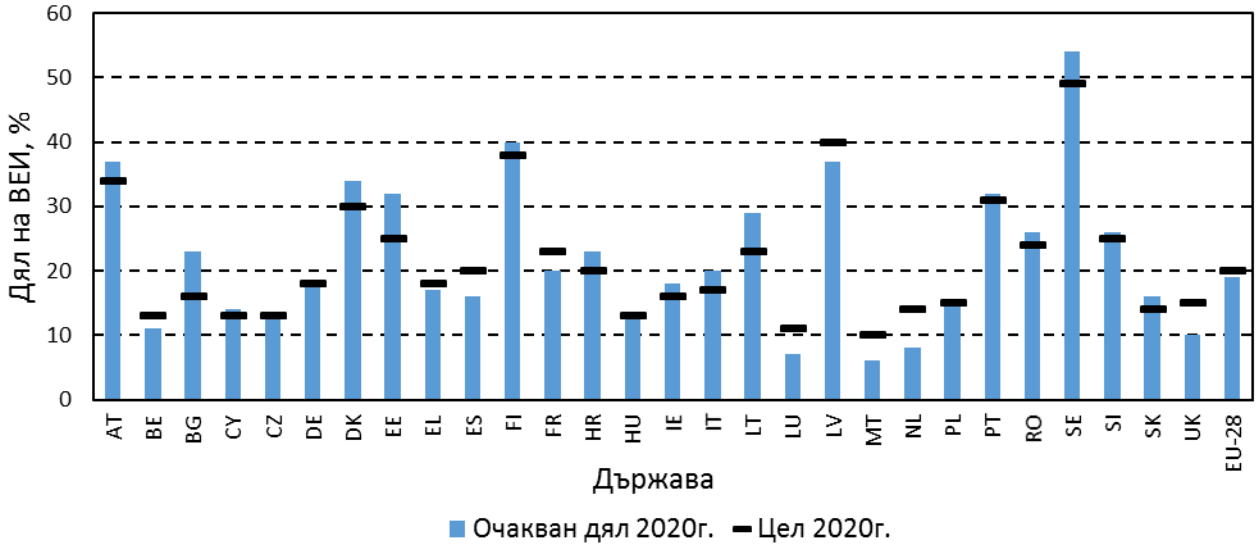
1. УВОД

Заради намаляващото количество на изкопаемите горива и увеличаването на вредите, нанесени от тях, възобновяемите източници на енергия представляват обект на засилен интерес. Енергията на вятъра постепенно се отличава като во-

*© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved*

ISSN 1311-0829

деща сред другите възобновяеми източници и дори конкурентна на конвенционалните [1], [2]. Държавите от Европейския съюз са едни от водещите в света по производство на енергия от възобновяеми източници. Те са си поставили за цел заедно да достигнат дял 20% до 2020г. Целите на отделните държави са показани на фиг.1. Според EWEA се предвижда произведената енергия от възобновяеми източници към 2020г. да е между 12,8% и 17% [3], [4].



Фиг.1. *Цел и очакван дял на ВЕИ за 2020г. за държавите от ЕС [4].*

Инсталираната мощност на вятърните генератори се е увеличила драстично през годините, като от 6100MW през 1996 г. достига 432,9GW през 2015г. Тази година е безпрецедентна за вятърната енергетика. Инсталирани са повече от 60GW нови мощности и са направени инвестиции за 296,6 милиона евро в сектора за зелена енергия [5].

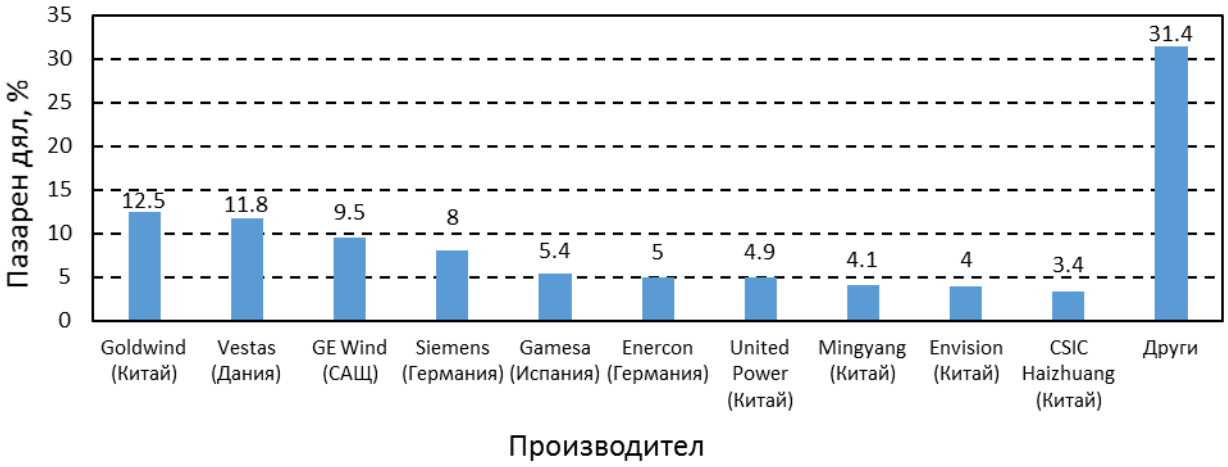
Първите стъпки за преобразуването на вятърната енергия в електрическа са предприети през 1887г. с вятърна турбина, снабдена с 12kW постояннотоков генератор. За да се увеличи производителността, през годините са направени множество подобрения в механичната и електрическата част на ветрогенераторите. Тенденцията е увеличаване на диаметъра на турбината, тъй като от него зависи количеството на „уловената“ енергия. Този факт е довел до нарастването на диаметъра на ротора от 15m през 1980г. до сегашните 164m. Развитие има и в електрическата част. Мощността на ветроенергийните преобразователни системи (ВЕПС) в наши дни достига 8MW [6], [7], [8].

Последните данни показват, че интересът към местата за инсталиране на ВЕПС се променя, като се забелязва тенденция за инсталиране на новите мощности в морето (Off-shore). Това се дължи на по-благоприятния характер на първичния източник. Изследванията показват, че качеството на вятъра в морето е по-високо от гледна точка на достъпност и постоянство. Инсталирането на вятърни генератори в морето води до нови предизвикателства, свързани с трудното монтиране и поддръжка. Макар офшорните ветрогенератори да представляват само

около 3% от глобалната инсталирана вятърна мощност, се наблюдава засилен растеж на този сектор. През 2015 година са пуснати в експлоатация 3,4GW от общо 12GW вятърни мощности в морето [9]. Засилен интерес също представляват и вятърните генератори с малка мощност. Те са особено разпространени в райони, които не са свързани с мрежата, но намират приложение и в градските райони. Към края на 2014г. има 945000 инсталирани малки ветрогенератори, като през 2010г. те са били 656084. Общата мощност на тези машини е оценена на около 830MW [10].

2. ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ГЕНЕРАТОРИ, ИЗПОЛЗВАНИ ВЪВ ВЕПС

На фиг.2 са представени десетте производители на ветрогенератори с най-голям пазарен дял за 2015г. Те представляват почти 70% от 63GW инсталирана мощност през същата година [11].



Фиг.2. Пазарен дял на десетте най-големи производители на ВЕПС за 2015г. [11].

До около 1998 повечето от производителите произвеждат турбини с асинхронни (индукционни) генератори с накъсо съединен ротор, постоянна скорост на въртене, мощност до 1,5 MW и тристепенен мултипликатор [12]. Асинхронните генератори с накъсо съединен (кафезен) ротор (АГКР) са с опростена конструкция, надеждни, евтини и технологията е добре изучена. Устойчивостта на тази машина се дължи на структурата на ротора и липсата на четков апарат. Недостатък е, че генераторът черпи реактивна мощност от мрежата и поради тази причина изисква компенсатори, били те кондензатори или преобразуватели STATCOM. Основен проблем е тесния диапазон от скорости на въртене и ниската производителност. АГНСР са постепенно изместени от двойно захранен асинхронен генератор (ДЗАГ).

В наши дни над 85% от инсталираната мощност на ветрогенераторите е базирана върху ДЗАГ [13]. Тези машини всъщност представляват асинхронен генератор с навит ротор, в който роторните токове се управляват от външни устройства, за да се постигне променлива скорост на въртене. Основното предимство на ДЗАГ е, че честотата на статорните напрежения остава постоянна, неза-

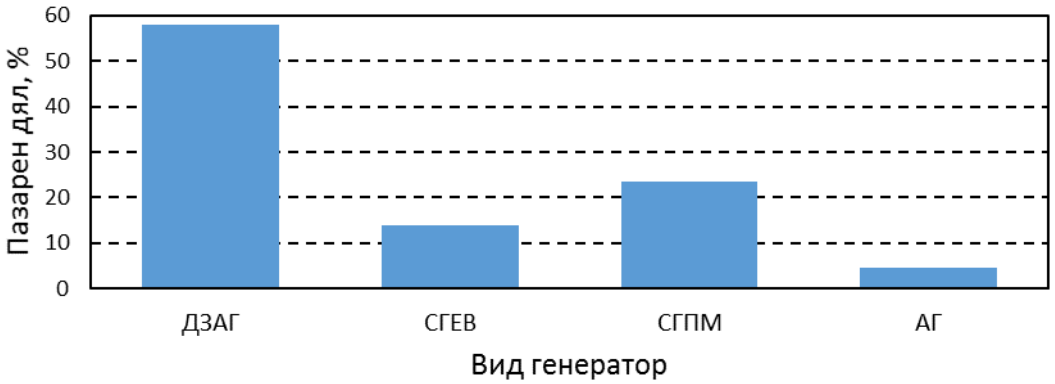
висимо от промените на скоростта на ротора, причинени от флуктуации в механичната мощност, зависеща от първичния източник. Негативни страни са: наличието на мултипликатор, който увеличава цената, теглото и изисква поддръжка; енергията към ротора се предава чрез пръстени и четки [8], [14].

Синхронните генератори увеличават все повече своя дял. Използват се както машини с електромагнитно възбуждане така и с постоянни магнити. При електромагнитното възбуждане предимство е, че реактивната мощност и напрежението могат да бъдат лесно контролирани чрез възбудителния ток. При генераторите с постоянни магнити предимства са премахването на четковия апарат и респективно липсата на поддръжка. Премахването на възбудителна намотка намалява загубите, но затруднява управлението на машината.

Различните видове генератори, използвани във вятърната енергетика, са показани в табл.1. Представени са основните им характеристики. На фиг.3 може да се види пазарният им дял.

Сравнение на различи видове електрически генератори, **Таблица 1**
използвани във ВЕПС [8], [15], [22].

Вид генератор	Двойно захранен асинхронен генератор (ДЗАГ)	Асинхронен генератор с накъсо съединен ротор (АГКР)	Синхронен генератор с електромагнитно възбуждане (СГЕВ)	Синхронен генератор с постоянни магнити (СГПМ)	
Номинално линейно напрежение [V]	690	690	400	700	3000
Номинална мощност [MW]	2	2,3	2,3	2,75	5,32
Номинална честота на напрежението в статора [Hz]	50	50	10,8	12	19,6
Обхват на скоростта [min^{-1}]	900-1900	600-1600	6-21,5	6-18	58,6-146,9
Брой полюси	4	4	72	120	28



Фиг.3. Пазарен дял по видове генератори за 2013г. [16].

Поддръжката на четковия апарат е най-голямото препятствие за разпространението на ДЗАГ в модерните офшорни паркове [26]. Неговото премахване е предмет на много изследвания. Безчетковият ДЗАГ има две статорни намотки, една свързана с мрежата и една управляваща, свързана с преобразувателя. Машината има две магнитни полета, създадени от двете намотки с различен брой полюси, които се наслагват чрез ротора. Роторът може да е накъсо съединен. Така се премахват недостатъците на машината откъм надеждност и поддръжка. Цената е сравнително ниска в сравнение със синхронен генератор поради липсата на магнити и преобразувателя, който не е за пълната мощност на генератора. Новият дизайн е придружен с увеличаване на цената в сравнение с този на ДЗАГ и усложнения при производството, тъй като конструкцията практически представлява две машини в един корпус [17].

Тази машина е предложена за ветрогенератор около 1990г. от университета в Орегон. Като цяло са направени малки машини за експерименти и няколко с по-голяма мощност. Най-мощната е 250kW [18]. Все още не е получила широко разпространение.

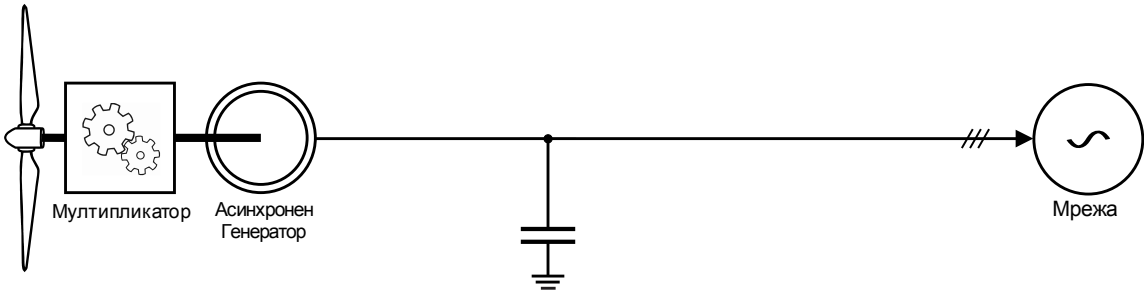
При синхронните генератори потенциален вариант за развитие представлява високотемпературният свръхпроводим генератор [19], [20], [21]. Свръхпроводниците имат почти нулево съпротивление и затова представляват интерес за производството на намотки. С тяхното използване загубите в намотката могат драстично да се намалят, а да се увеличат токовете. Полето на тези машини може да достигне 2 до 3 пъти това на обикновена машина, а размерите им да намалеят. Това ги прави изключително интересни за мегаватови турбини, чиито основен проблем е теглото и обемът на генератора. Макар да има предложения за производство на такъв генератор, съществуват проблеми, свързани със свръхпроводниците. Техните качества се запазват само при работа под определени прагове: критична плътност на тока, критична индукция на магнитното поле и критична температура. Последната варира за различните материали от 18К до 110К [13].

3. ВИДОВЕ КОНФИГУРАЦИИ НА ВЕПС

ВЕПС могат да бъдат класифицирани според работната скорост на турбината и генератора, както следва.

3.1. ВЕПС с фиксирана скорост (±1%)

Това са системи, използващи асинхронни генератори с накъсо съединен ротор, които са свързани директно към мрежата (фиг.4). Това е най-старата концепция, при която генераторът работи с постоянна скорост, за да произвежда напрежение с честота 50Hz или 60Hz. Отклонението на скоростта на въртене на генератора се определя от хлъзгането и е в рамките до 1-2% от синхронната.

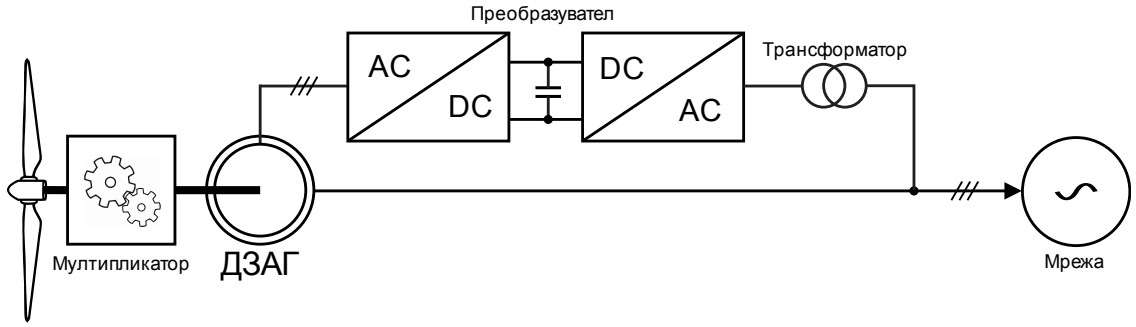


Фиг.4. Конфигурация на ВЕПС с фиксирана скорост [8], [12].

В тези ВЕПС почти винаги се използва мултипликатор, за да се достигне скоростта, нужна на генератора (обикновено 1000 или 1500min^{-1}) [12]. Конфигурацията е опростена, евтина и надеждна. Недостатъци са ниската ефективност на оползотворяване на наличната енергия на вятъра и влиянието на колебанията в скоростта на вятъра, които се отразяват върху мрежата както и директното отражение на неизправностите в мрежата върху системата [22].

3.2. ВЕПС с полупроменлива скорост (±30%)

В този тип вятърни генератори се използват ДЗАГ (фиг.5). Статорът на генератора е свързан директно към електрическата мрежа, а роторът е свързан чрез двупосочен електронен преобразувател, който позволява да се приема или отдава енергия. Електронният преобразувател позволява на индукционната машина да работи в генераторен режим в широк обхват на изменение на скоростта на въртене – около ±30% в подсинхронната и надсинхронната област.



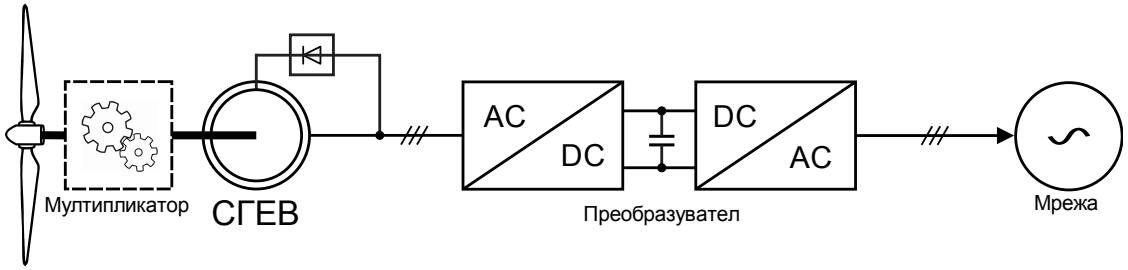
Фиг.5. Конфигурация на ВЕПС с полупроменлива скорост [8], [12].

Едно от най-важните предимства на този тип ВЕПС е, че преобразувателят работи само с 30% от номиналната мощност на генератора. Поради това той се нарича „частичен преобразувател“. За разлика от „пълния” преобразувател, който работи с цялата мощност на генератора. И тук мултипликаторът е необходим, защото генераторите са високоскоростни (1000-1500min^{-1}). Тази конфигурация доминира на пазара, тъй като предлага добра устойчивост към колебания в скоростта на вятъра и увеличена производителност поради променливата скорост на работа на турбината и генератора [23], [24].

3.3. ВЕПС с променлива скорост

Тук могат да бъдат използвани различни генератори: асинхронни, синхронни с електромагнитно възбуждане (СГЕВ) или с постоянни магнити (СГПМ) [25], [26]. Това се дължи на факта, че генераторът е изолиран от мрежата посредст-

вом преобразувател, който позволява изменение на честотата и големината на генерираното напрежение. Все пак най-разпространена е комбинацията със синхронен генератор с електромагнитно възбуждане и мултипликатор, показана на фиг.6. Тя е била обект на изследвания още от зараждането на вятърните турбини.

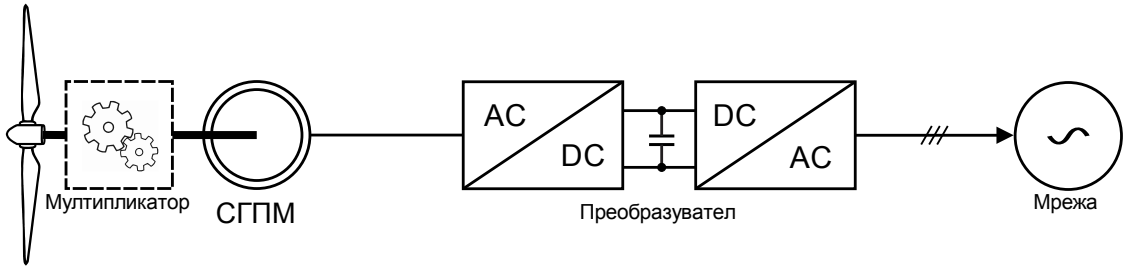


Фиг.6. Конфигурация на ВЕПС с променлива скорост със СГЕВ [8], [12].

Последните разработки са съсредоточени върху използването на концепция, представена на пазара още през 1992 г. Тя използва синхронен генератор с електромагнитно възбуждане, който е директно куплиран към ротора на турбината. В новите конструкции е заложено използването на многополюсни синхронни генератори с постоянни магнити, които получават все по-голямо разпространение поради спада на цената на редкоземните магнити (фиг.7).

Предимствата на директното задвижване без мултипликатор са: по-малка маса на съоръжението; по-висок к.п.д. поради премахване на загубите в мултипликатора; повишена надеждност; по-малки разходи за поддръжка.

Недостатъците са: увеличен диаметър, обем и тегло на генератора, което увеличава цената на машината [27], [28].

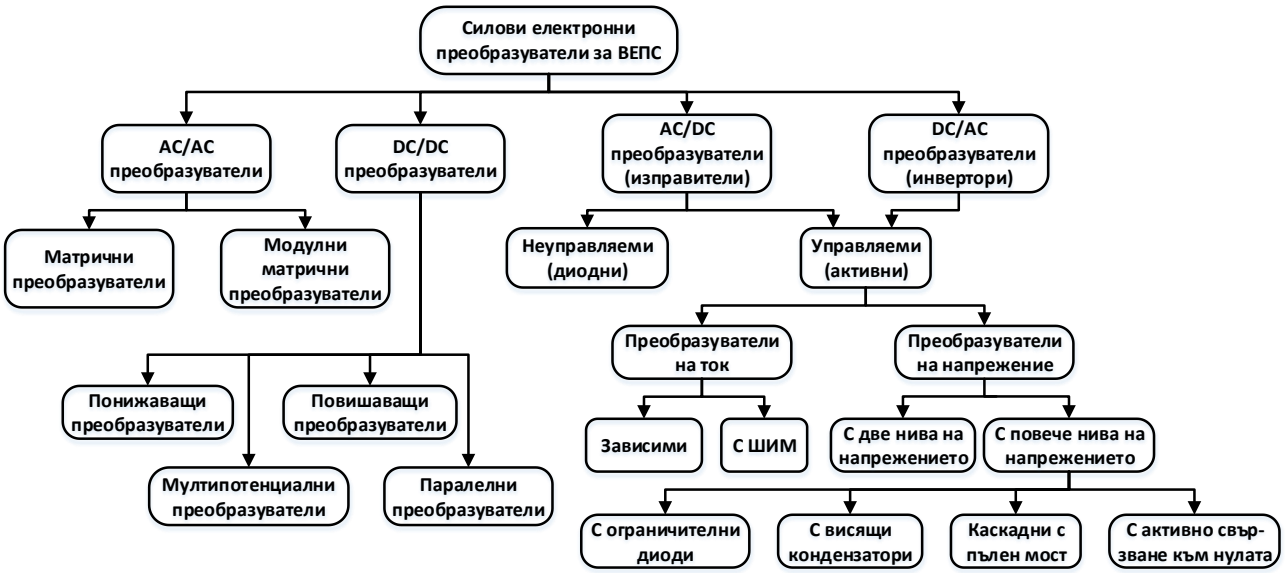


Фиг.7. Конфигурация на ВЕПС с променлива скорост със СГПМ – с или без мултипликатор [8], [12].

4. ЕЛЕКТРОННИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ С ПРИЛОЖЕНИЕ ВЪВ ВЕПС

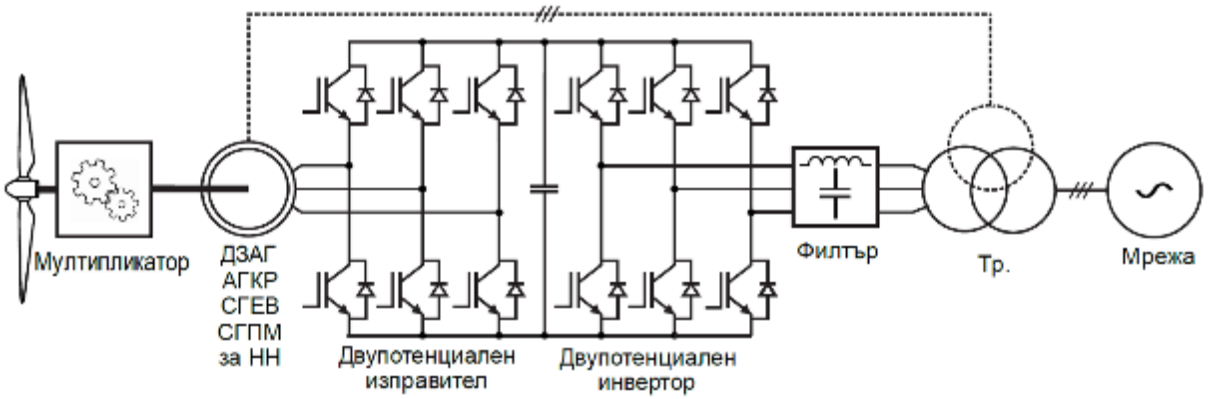
Преобразувателите са неизменна част от модерните ВЕПС. Този факт се дължи на високите изисквания за количеството и качеството на произведената енергия, на които трябва да отговарят системите.

На фиг.8 е показана обща класификация на съвременните силови електронни преобразуватели, използвани във вятърната енергетика.



Фиг.8. Обща класификация на съвременните силови електронни преобразуватели, използвани във вятърната енергетика [8].

В системите с променлива скорост, използващи частичен или пълен преобразувател, най-разпространени са двупосочните (back-to-back) преобразуватели (фиг.9). Те се използват в около 90% от конфигурациите с пълен преобразувател (фиг.6, фиг.7).

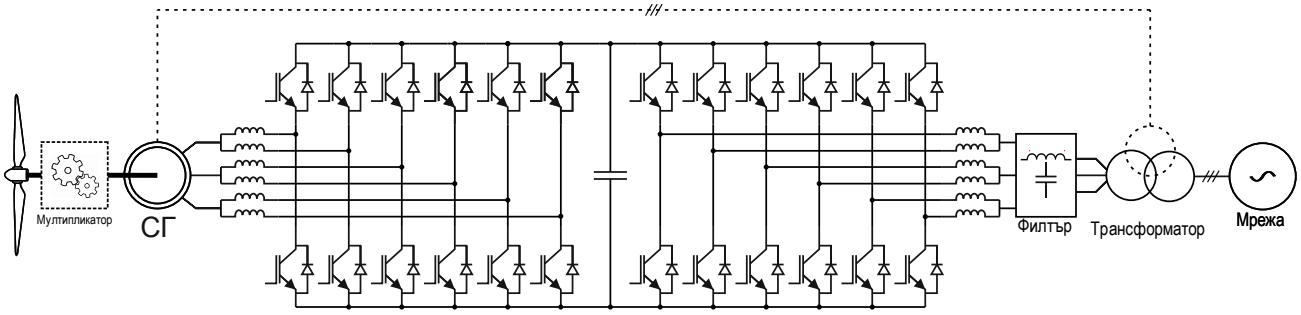


Фиг.9. Структурна схема на ВЕПС с двупотенциален преобразувател back-to-back с IGBT за пълна (АГКР, СГЕВ, СГПМ) или частична мощност – с пунктир (ДЗАГ).

Двупотенциалните преобразуватели back-to-back за ниско напрежение (фиг.9) имат добри технически показатели и са икономически изгодни при турбини с мощност до около 3MW.

С увеличаване на тази мощност се налага паралелно свързване на няколко еднакви модула или на силови елементи в рамките на един преобразувател, както е показано на фиг.10.

Тези преобразуватели обаче са по-сложни и съответно по-скъпи [29].



Фиг.10. Схема на ВЕПС с паралелно свързани двупотенциални преобразуватели с обща постояннотокова връзка (за пълна или за частична мощност) [29].

Във втората част на статията са разгледани силовите електронни преобразуватели, които се използват в съвременните ВЕПС, и тяхното управление. Също там се намират заключението и библиографията.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите благодарят за финансовата подкрепата на договор ДУНК № 01/3 „Университетски научно-изследователски комплекс“.

Автори: Захари Зарков, доцент, д-р, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; Борис Демирков, докторант, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *demirkov@tu-sofia.bg*; Людмил Стоянов, доц. д-р, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *ludiss@tu-sofia.bg*; Иван Бачев, докторант, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *iv.bachev@tu-sofia.bg*; Владимир Лазаров, проф. д-р, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vl_lazarov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Рад Станев

СЪСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ НА СЪВРЕМЕННИТЕ ВЕТРОЕНЕРГИЙНИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛНИ СИСТЕМИ - част II

**Захари Зарков, Борис Демирков, Людмил Стоянов,
Иван Бачев, Владимир Лазаров**

Резюме: *Статията представлява обзор на съвременното състояние на ветроенергийните преобразователни системи (ВЕПС) и показва тенденциите на тяхното развитие. Дадени са сведения за дела на произведената енергия от вятърни генератори по света. Разгледани са актуалните конфигурации на ВЕПС. Направена е класификация на генераторите и силовите електронни преобразуватели, използвани в системите. Показани са най-често използваните схеми на преобразуватели, както и перспективни такива. Засегнати са възможностите за приложение на нови видове генератори като безчетков двойнозахранен асинхронен генератор и свръхпроводим генератор. Дадени са базови сведения за управлението на системата.*
Ключови думи: *ветроенергийни преобразователни системи, вятърни генератори, електронни преобразователни*

STATE AND DEVELOPMENT OF MODERN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS - part II

**Zahari Zarkov, Boris Demirkov, Ludmil Stoyanov,
Ivan Bachev, Vladimir Lazarov**

Abstract: *This paper is an overview of the current state of wind energy conversion systems (WECS) and represents the trends of their development. Information about the share of energy produced by wind turbines around the world is given. The current configurations of the WECS are presented along with a classification of power electronic converters and generators, used in wind turbines. The most commonly used converter circuits as well as promising ones are shown. Some possibilities for the application of new types of generators as brushless doubly-fed induction generator and superconducting generator are concerned. Basic information about the control of the system is also given.*
Keywords: *wind energy conversion systems, WECS, power electronic converters, wind turbines*

ВЪВЕДЕНИЕ

Настоящата статия се състои от две неразривно свързани части. Първата от тях съдържа увод, преглед на електрическите генератори, използвани във ВЕПС, видове конфигурации на ВЕПС и класификация на силовите електронни преоб-

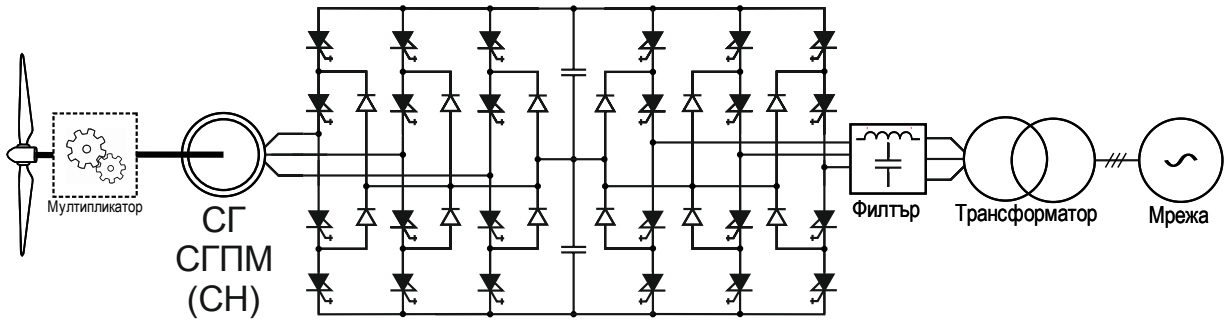
*© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved*

ISSN 1311-0829

разуватели с приложение във ветровата енергетика. В тази втора част са разгледани електронни преобразуватели за средно напрежение, преобразуватели с неуправляеми изправители, паралелни, каскадни и матрични преобразуватели с приложение във ВЕПС. Статията завършва със заключение и библиография.

4.2. Преобразуватели back-to-back за средно напрежение

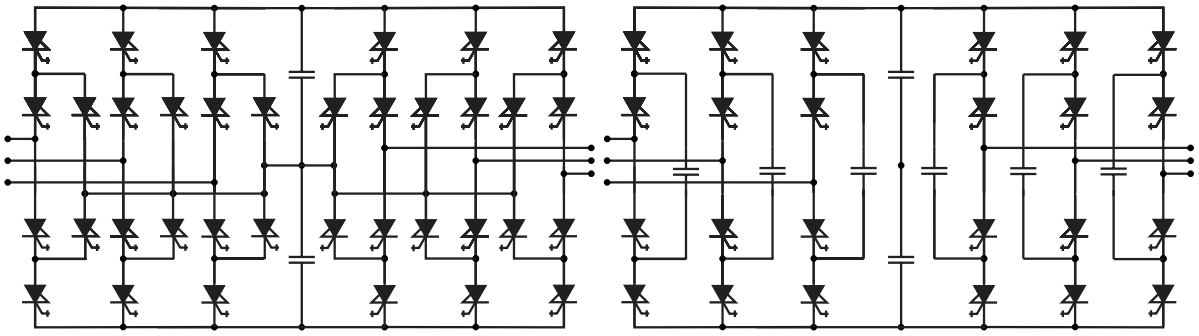
Едно от добрите решения за повишаване на мощността на ВЕПС е да се увеличи работното напрежение на генератора и електронния преобразувател, т.е. преминаване към системи със средно напрежение 3-6kV [30], [37]. При по-високите напрежения е по-добре да се използват преобразуватели с няколко нива на изходното напрежение (наречени „преобразуватели с модулация на няколко нива“ или просто „мултипотенциални“) [34]. Все повече фирми използват трипотенциална схема NPC (Neutral Point Clamped), показана на фиг.11. В тази схема са използвани пълноуправляеми тиристори IGCT, но тя може да се изпълни и с транзистори IGBT.



Фиг.11. Структурна схема на ВЕПС с преобразувател back-to-back с модулация на 3 нива с IGCT за средно напрежение (за пълна мощност) [30].

При тази схема напрежението на променливотоковата страна на преобразувателя преди филтъра има три нива. Предимство е, че пулсациите на напрежението имат по-малка амплитуда и скоростта на изменение на напрежението dV/dt остава приемлива. Напрежението върху полупроводниковите ключове е половината от напрежението на постояннотоковата страна [31]. Токовете в генератора и в преобразувателя се намаляват 3-5 пъти в сравнение с тези във ВЕПС с ниско напрежение. Недостатъците са: големият брой полупроводникови елементи в схемата; необходимостта от специални мерки за поддържане на еднакво напрежение върху кондензаторите в постояннотоковия кръг (фиг.11).

Съществуват и други схеми, които са подходящи за работа със средни напрежения, без да се използва последователно свързване на силови елементи с цел увеличаване на работното напрежение. Една от разновидностите на NPC е схемата с активни ключове вместо диоди за свързване към неутралната точка ANPC (Active Neutral Point Clamped) (фиг.12.а). При тази топология се постига полесно балансиране на напрежението върху кондензаторите в постояннотоковия кръг, но за сметка на увеличения брой пълно управляеми ключове и по-сложно управление [32].



а) *б)*

Фиг.12. Схеми на трипотенциални преобразуватели с IGCT за СрН [32].

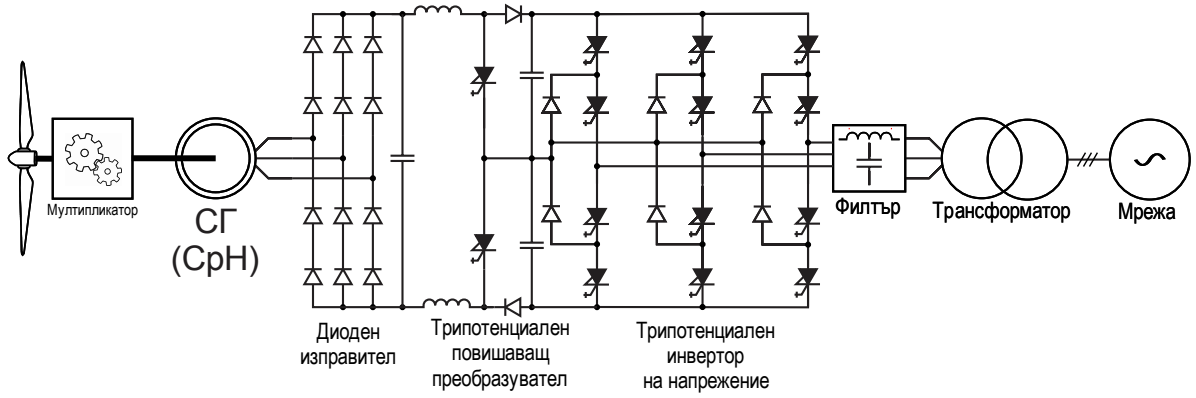
Друга алтернатива е преобразувателят с „висящи кондензатори“ (Flying capacitors), показан на фиг.12.б [8], [33], [34]. Той също осигурява 3 нива на напрежението, но вместо диоди има допълнителни кондензатори. Схемата е по-проста и балансирането на напреженията се осъществява по-лесно, а натоварването на силовите ключове е по-равномерно. Недостатъците са: нужни са повече кондензатори, като всеки от тях има нужда от схема за предварително зареждане; кондензаторите имат по-ниска надеждност от диодите в NPC схемата; управляващото устройство има нужда от по-голям брой сензори, за да поддържа нормалната работа на преобразувателя [8].

4.3. Преобразуватели с неуправляеми изправители

Разгледаните по-горе преобразуватели са по-своята същност реверсивни – при тях електрическата енергия може да се предава в двете посоки. Това обаче е необходимо само в конфигурациите с индукционни генератори – АГКР и ДЗАГ. При системите със синхронни генератори енергията се предава само в една посока. Поради това с успех може да се използва обикновен диоден изправител откъм страната на генератора вместо сложен активен изправител. Откъм страната на мрежата инверторът е същият както в back-to-back конфигурацията. Диодният изправител естествено е по-евтин и също така по-надежден от транзисторния преобразувател [35]. Ето защо тази схема е получила разпространение и се използва от редица производители на ВЕПС. Използването на обикновен диоден изправител води и до някои недостатъци, като:

- Увеличено съдържание на хармоници в тока на генератора, което предизвиква пулсации на електромагнитния момент [36].
- Необходимост от допълнителен DC/DC преобразувател, с който да се извършва следене на точката на максимална мощност и да се повиши напрежението на входа на инвертора [37].

Концепцията с диодния изправител може да се приложи и при системите със средно напрежение. На фиг.13 е показана такава схема, която включва и 3-потенциален повишаващ преобразувател, който лесно се комбинира с 3-потенциален NPC инвертор. Трипотенциалният DC/DC преобразувател позволява да се поддържа балансът на напреженията на кондензаторите на инвертора, което е голямо предимство [8], [38].



Фиг.13. Схема на ВЕПС с диоден изправител, 3-потенциален повишаващ преобразувател и 3-потенциален инвертор с IGCT за СрН (за пълна мощност) [38].

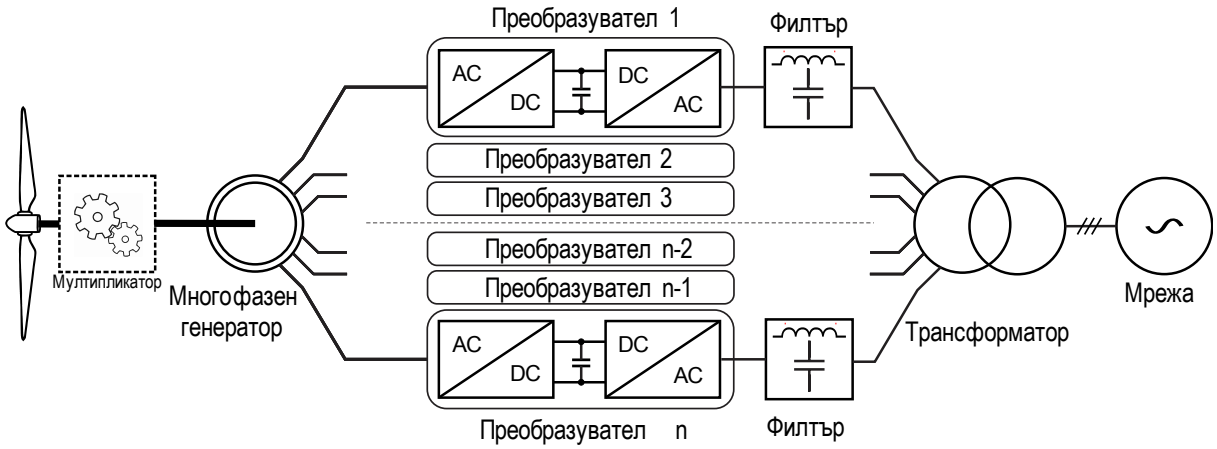
4.4. Паралелни и каскадни преобразуватели за ВЕПС с многофазни и многонамотъчни генератори

Обща структурна схема на ВЕПС с многофазен генератор и паралелни (разпределени) преобразуватели е показана на фиг.14. При системите с многофазни генератори обикновено се използват 6 фази – 2 групи трифазни намотки с дефазиране на напрежението на 30° [39]. Прилагат се и конструкции с повече комплекти статорни намотки – например 6, както е в Gamesa G10x 4.5MW [40]. За всеки комплект статорни намотки се използва отделен back-to-back преобразувател, като този от фиг.9 или преобразувател с диоден изправител като на фиг.13. Тази схема позволява да се повиши ефективността, защото преобразувателите се включват последователно един след друг с нарастване на мощността и така се осигурява работата им при висок к.п.д.

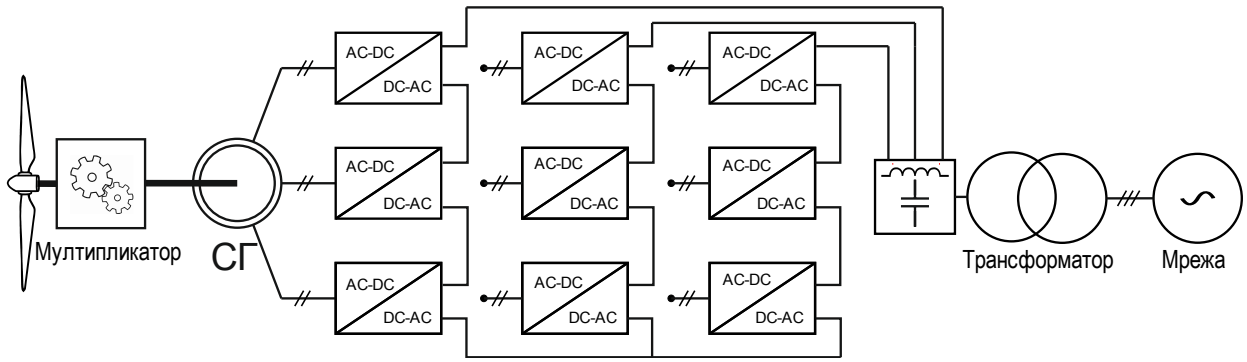
Възможно е да се използват и каскадни свързвания на изправителите, за да се получи средно напрежение на DC шината и инверторът да е за средно напрежение, а генераторът – за ниско напрежение [41].

Един от начините да се повишат напрежението и мощността е да се използват каскадно свързани няколко преобразувателя, които да формират изходно напрежение с повече нива – например 5 или 7 (фиг.15) [42]. Така се улеснява филтрирането и се намаляват размерите и цената на изходните филтри. За да се реализира тази идея, е необходимо всеки елементарен преобразувател (модул) да се захранва от изолиран източник. Ето защо генераторът се изпълнява с много на брой изолирани статорни намотки. Изходното напрежение може да се повиши до 10-30kV и да се използва директно свързване на изхода към мрежата СрН без трансформатор [8].

Отделните модули в структурата може да се изпълнят по различни схеми, като най-често се използват мостови еднофазни преобразуватели, които може и да са с галванично изолиране с трансформатор за средна честота. Силовите електронни елементи може да бъдат за ниско напрежение, защото модулите са свързани последователно. Модулната структура и надеждността са допълнителни предимства на тази конфигурация [43].



Фиг.14. Обща структурна схема на ВЕПС с многофазен генератор и паралелни (разпределени) преобразуватели [8].

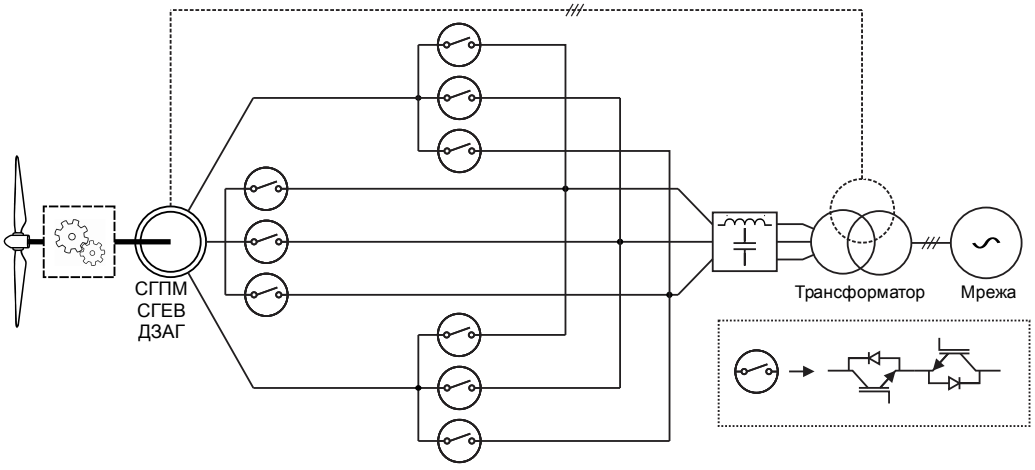


Фиг.15. Обща структурна схема на ВЕПС с многофазен генератор и каскадно свързани модулни преобразуватели. [42].

4.5. Матрични AC/AC преобразуватели за ВЕПС

В съвременната техника като директни AC/AC преобразуватели се използват т.нар. матрични преобразуватели [8], [34]. Те нямат междинен постояннотоков кръг, както е при back-to-back преобразувателите. Матричните преобразуватели могат да работят с напрежение с променлива честота на входа, което да преобразуват в напрежение с фиксирана стойност и честота на изхода. Премахването на филтровите кондензатори за постоянното напрежение определено повишава надеждността на този тип преобразуватели, особено, когато се използват в офшорни ВЕПС.

Схема на ВЕПС с трифазен директен матричен преобразувател (ДМП) с 9 ключа за НН е показана на фиг.16 [8], [44]. Този преобразувател е двупосочен и следователно може да се използва с всички видове електрически генератори, както беше дискутирано в първата част на статията (фиг.9). Основните недостатъци на директния матричен преобразувател са: голям брой полупроводникови двупосочни ключове и драйверни схеми; сложна система за управление; ниска степен на използване на възможностите на полупроводниковите ключове (те трябва да са преоразмерени). Понастоящем ДМП се използват в някои индустриални приложения, но все още не се прилагат в областта на ВЕПС.

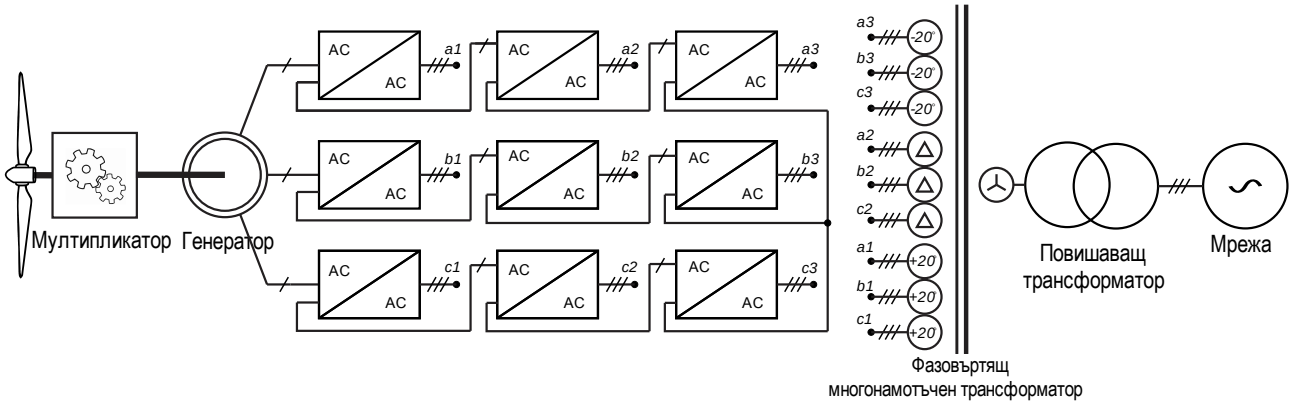


Фиг.16. Схеми на ВЕПС с трифазен директен матричен преобразувател с 9 ключа за НН [44].

За ВЕПС със средно напрежение матричните преобразуватели може да се използват в модулно свързване. Такава система с 9 модула е показана на фиг.17. Основният модул (клетка) представлява матричен преобразувател 1 фаза към 3 фази [8], [45]. Три такива модула са свързани последователно във всяка фаза на генератора, който е за средно напрежение. Този тип преобразувател осигурява синусоидален входен и изходен ток, което е съществено предимство. За да се свържат трифазните изходи на модулите последователно, се използва фазовъртящ многонамотъчен трансформатор, както е показано на фиг.17. Трансформаторът служи и за връзка с мрежата за средно напрежение. Фазовъртящият трансформатор подобрява значително хармоничния състав на изходния ток на ВЕПС.

Недостатъците на тази конфигурация са: голям брой полупроводникови ключове и драйверни схеми (108 броя); по-сложен и скъп трансформатор; много сложна система за управление.

Предимствата са: малък обем на активната част, защото се използват само полупроводникови елементи, без кондензатори; отличното качество на тока към мрежата; няма необходимост от балансиране на напреженията на кондензаторите, както в NPC преобразувателите [8]. Модулните матрични преобразуватели все още не са намерили приложение във ВЕПС.



Фиг.17. Схема на ВЕПС с модулен матричен преобразувател с 9 модула за СрН [45].

5. УПРАВЛЕНИЕ НА ВЕПС

Друг важен фактор във ВЕПС е управлението. То е съставено от отделни подсистеми: механично управление, управление на преобразувателя от страна на генератора и от страната на мрежата [37], [46]. Тези подсистеми са съчетани посредством една главна система за управление. Тя събира информация за скоростта и посоката на вятъра, напрежението и тока на генератора, напрежение на постояннотоковия кръг на преобразувателя, напрежението и тока на мрежата, като на базата на измерванията задава оптимални стойности за различните величини. Механичното управление контролира ъгъла на атака на перките на турбината и ориентацията на гондолата. Посредством тях може да се регулира входящата механична мощност [47]. Чрез управлението на преобразувателя от страната на генератора се влияе върху електрическата мощност. Стратегията за контрол позволява да се управляват поотделно магнитният поток и електромагнитният момент. Тази стратегия за контрол се постига чрез използване на директно управление на електромагнитния момент (DTC) или чрез векторно управление с ориентация по потокосцепление (FOC) [48]. Управлението на преобразувателя от страната на мрежата самостоятелно контролира активната и реактивната мощност, отдадени в електрическата мрежа. Тази стратегия е осъществима чрез използването на директно управление на мощността (DPC) или чрез векторно управление с ориентация по вектора на напрежението (VOC) [37], [49].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направеният обзор показва тенденциите в развитието на съвременните ВЕПС. Като основни направления на развитието се очертават:

- Постоянно нарастване на мощността на единичния ветрогенератор.
- Преминаване към генератори и преобразуватели за средно напрежение.
- Преминаване към използване на СГПМ.
- Премахване на мултипликатора и преминаване към директно задвижване на генератора.
- Постепенно навлизане на силови електронни елементи от алтернативни на силиция материали – най-напред от SiC (силициев карбид), а за в бъдеще и от GaN (галиев нитрид).
- Масово използване на електронните преобразуватели и при ВЕПС с малка мощност за битови приложения.

На базата на анализа могат да се определят насоките за бъдещи изследвания, а именно: моделиране на ВЕПС с различни конфигурации, ефективно управление на мощността им, както и интегриране на маломощни ветрогенератори в жилищната среда.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Richardson R., G. McNerney (1993), ***Wind energy systems***, Proc. IEEE, vol. 81, no. 3, 1993, pp. 378–389

[2] Pao L. Y., K. Johnson (2011), ***Control of wind turbines***, IEEE Control Syst. Mag., vol. 31, no. 2, 2011, pp. 44–62
[3] Wind energy scenarios for 2020**,** European Wind Energy Association (EWEA)**,** 2014, http://www.ewea.org
[4] Renewable energy progress report, European Comimission, 2015, https://ec.europa.eu.
[5] Wind Report, Global Wind Energy Council (GWEC), 2015, http://www.gwec.net
[6] Ackermann T., L. Soder (2000), ***Wind energy technology and current status: A review***, J. Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 4, no. 4, 2000, pp. 315–374
[7] Sahin A. D. (2004), ***Progress and recent trends in wind energy***, Int. J. Progress in Energy Combustion Sci., vol. 30, no. 5, 2004, pp. 501–543
[8] Yaramasu V., B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro, M. Narimani (2015), ***High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies***, Proc. of the IEEE, 2015, 103(5):740-788
[9] Offshore Wind, Global Wind Energy Council (GWEC), 2015, http://www.gwec.net.
[10] Small Wind World Report 2016, World Wind Energy Association, 2016, http://www.wwindea.org
[11] Renewables Global Status Report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 2016, http://www.ren21.net
[12] Polinder H. (2011), ***Overview of and trends in wind turbine generator systems,*** IEEE Power and Energy Society General Meeting, July, 2011, pp. 1–8
[13] Cao W., Y. Xie and Z. Tan (2012), ***Wind Turbine Generator Technologies,*** Chapter 7 , Advances in Wind Power, InTech, 2012
[14] PMG vs. DFIG–the big generator technology debate, The Switch, 2014, http://theswitch.com
[15] Лазаров В. (2015), ***Електрически генератори за ветроенергийни преобразователни системи***, С. Енергиен форум, 11-12, 2015, стр. 45-51.
[16] Serrano-González J., R. Lacal-Arántegui (2016), ***Technological evolution of onshore wind turbines - a market-based analysis,*** Wind Energy, 2016 Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com)
[17] Abdi E., X. Wang, S. S. Shao, R. McMahon, P. Tavner (2008), ***Performance characterisation of brushless doubly-fed generator***, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008.
[18] Long T., S. Shao, E. Abdi, P. Malliband, M.E. Mathekga, R.A. McMahon, P.J. Tavner (2012), ***Symmetrical low voltage ride-through of a 250 kW Brushless DFIG***, 6th IET Int.Conf.on Power Electronics,Machines and Drives,Bristol,UK, 2012,pp.1-6
[19] Qu R., Y. Liu, J. Wang (2013), ***Review of Superconducting Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines***, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, 2013 (vol 23)
[20] Jensen B. B., N. Mijatovic, A. B. Abrahamsen (2013), ***Development of superconducting wind turbine generators***, Journal of Renewable Sustainable and Energy (vol. 5), 2013, pp. .
[21] Fair R. (2012), ***Superconductivity for large scale wind turbines***, Final Scientific Report - DE-EE0005143, General Electric–Global Research, Niskayuna/DUNS No.086188401, 2012
[22] Wu B., Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro (2011), ***Power Conversion and Control of Wind Energy Systems***, 1st ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE, 2011
[23] Xu L., P. Cartwright (2006), ***Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation***, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 3, Sep. 2006, pp. 750–758

[24] Wessels C., F. Gebhart, R.W. Fuchs (2011), ***Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults***, IEEE Trans. on Power Electronics, 2011 (vol. 26), pp. 807-815
[25] Arabian-Hoseynabadi H., P.J. Tavner, H. Oraee (2010), ***Reliability comparison of direct-drive and geared drive wind turbine concepts,*** Wind Energy, 2010 (vol. 13), pp. 62-73
[26] Polinder H., F.F.A. van der Pijl, G.J. de Vilder, P. Tavner (2006), ***Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines***, IEEE Trans. on Energy Conversion, 2006 (vol. 21), pp. 725-733
[27] Yaramasu V., B. Wu, M. Rivera, J. Rodriguez (2014), ***A new power conversion system for megawatt PMSG wind turbines using four-level converters and a simple control scheme based on two-step model predictive strategy Part I: Modeling and theoretical analysis***, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 2, no. 1, Mar. 2014, pp. 3–13
[28] Yang X., D. Patterson, and J. Hudgins (2012), ***Permanent magnet generator design and control for large wind turbines***, in Proc. IEEE Symp. Power Electron. Mach. Wind Appl. (PEMWA), Denver, CO, USA, Jul. 2012, pp. 1–5
[29] Xu Z., R. Li, H. Zhu, D. Xu, C. Zhang (2012), ***Control of parallel multiple converters for direct-drive permanent-magnet wind power generation systems***, IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 3, Mar. 2012, pp. 1259–1270
[30] Yaramasu V., B. Wu (2014), ***Predictive control of a three-level boost converter and an NPC inverter for high power PMSG-based medium voltage wind energy conversion systems***, IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 10, Oct. 2014, pp. 5308–5322
[31] Rodrıguez J., S. Bernet, P. Steimer, and I. Lizama (2010), ***A survey on neutral-point-clamped inverters***, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 7, Jul. 2010, pp. 2219–2230
[32] Senturk O., L. Helle, S. Munk-Nielsen, P. Rodriguez, R. Teodorescu (2012), ***Power capability investigation based on electrothermal models of press-pack IGBT three-level NPC and ANPC VSCs for multimegawatt wind turbines***, IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 7, Jul. 2012, pp. 3195–3206
[33] Antoniewicz K., M. Jasinski, S. Stynski (2012), ***Flying capacitor converter as a wind turbine interface-modulation and MPPT issues***, in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE), Hangzhou, China, May 2012, pp. 1985–1990
[34] Анчев М. (2013), ***Силови електронни устройства***, Технически университет-София, 2013
[35] Wang J., D. Xu, B. Wu, Z. Luo (2011), ***A low-cost rectifier topology for variable-speed high-power PMSG wind turbines***, IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 8, Aug. 2011, pp. 2192–2200
[36] Xia Y., K. Ahmed, B. Williams (2011), ***Different torque ripple reduction methods for wind energy conversion systems using diode rectifier and boost converter***, in Proc. IEEE Int. Electric Mach. Drives Conf. (IEMDC), Niagara Falls, ON, Canada, May 2011, pp. 729–734
[37] Wu B., Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro (2011), ***Power Conversion and Control of Wind Energy Systems***, 1st ed. Hoboken, Wiley-IEEE, ser. IEEE Press Series on Power Engineering, 2011
[38] Xia C., X. Gu, T. Shi, Y. Yan (2011), ***Neutral-point potential balancing of three-level inverters in direct-driven wind energy conversion system***, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 26, no. 1, Mar. 2011, pp. 18–29
[39] Zulqarnain M., D. Xu, B. Yuwen (2011), ***Synchronous generator based wind energy conversion system (WECS) using multi-modular converters with autonomous controllers***, in Proc. IEEE Int. Electric Mach. Drives Conf. IEMDC, May 2011, pp. 819–824

[40] Andresen B., J. Birk (2007), ***A high power density converter system for the Gamesa G10x 4,5 MW wind turbine***, in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl. (EPE), Aalborg, Denmark, Sept. 2007, pp. 1–8
[41] Yuan X., J. Chai, Y. Li (2012), ***A transformer-less high-power converter for large permanent magnet wind generator systems***, IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no. 3, Jul. 2012, pp. 318–329
[42] Baier C.R., J. A. Munoz, J. R. Espinoza, P. E. Melın, J. I.Guzman, L. A. Moran. (2014), ***Improving power quality in cascade multilevel converters based on single-phase non-regenerative power cells***, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 9, Sep. 2014, pp. 4498–4509.
[43] Rodrıguez J., L. G. Franquelo, S. Kouro, J. I. Leon, R. C. Portillo, M. A. M. Prats, M. A. Perez (2009), ***Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications***, Proc. IEEE, vol. 97, no. 11, Nov. 2009, pp. 1786–1817
[44] Kang J., N. Takada, E. Yamamoto, E. Watanabe (2011), ***High power matrix converter for wind power generation applications***, in Proc. Int. Conf. Power Electron. Energy Convers. Congr. Expo. Asia, Jeju, South Korea, Jun. 2011, pp. 1331–1336
[45] Zuckerberger A., D. Weinstock, A. Alexandrovitz (1997), ***Single-phase matrix converter***, IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 144, no. 4, Jul. 1997, pp. 235–240
[46] Jain B., S. Jain, R.K. Nema (2015), ***Control strategies of grid interfaced wind energy conversion system: An overview,*** Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 47, 2015, pp. 983-996.
[47] Vidal Y., L. Acho, N. Luo, M. Zapateiro, F. Pozo (2012), ***Power Control Design for Variable-Speed Wind Turbines***, Energies, 5, 2012, pp. 3033-3050
[48] Рац Е. (2010), ***Векторно управление на електрически машини,*** Авангард Прима, 2010
[49] Bariša T., D. Sumina, M. Kutija (**2015**), ***Control of generator- and grid-side converter for the interior permanent magnet synchronous generator,*** 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo, 2015, pp. 1015-1020

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите благодарят за финансовата подкрепа на договор ДУНК № 01/3 „Университетски научно-изследователски комплекс“.

Автори: Захари Зарков, доцент, д-р, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; Борис Демирков, докторант, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *demirkov@tu-sofia.bg*; Людмил Стоянов, доц. д-р, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *ludiss@tu-sofia.bg*; Иван Бачев, докторант, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *iv.bachev@tu-sofia.bg*; Владимир Лазаров, проф. д-р, кат. „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: vl_lazarov@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Рад Станев

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛТЕРНАТОРИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЯ ВЪВ ВЕТРОЕНЕРГИЙНИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛНИ СИСТЕМИ

Захари Зарков, Иван Бачев, Борис Демирков, Владимир Лазаров

Резюме: *Работата представя резултатите от експериментално изследване на автомобилен алтернатор. На базата на получените от изследването характеристики и параметри е разработен устойчив математически модел на алтернатора чрез уравненията на обобщената теория на електрическите машини. Разработен е и симулационен компютърен модел в среда Matlab/Simulink. Експерименталните данни са сравнени с резултатите от симулациите и е получено добро съвпадение. Разработеният модел ще бъде използван в бъдещи изследвания на работата на автомобилни алтернатори в малки ветроенергийни преобразувателни системи.*
Ключови думи: *ветроенергийни преобразувателни системи, ВЕПС, автомобилни алтернатори*

EXPERIMENTAL STUDY OF ALTERNATORS FOR APPLICATIONS IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS

Zahari Zarkov, Ivan Bachev, Boris Demirkov, Vladimir Lazarov

Abstract: *The work presents the results from an experimental study of an automobile alternator. On the base of the obtained characteristics and parameters is developed a stable mathematical model of the alternator using the equations of the generalized theory of the electrical machines. A simulation model in Matlab/Simulink environment is also developed. The comparison between the simulations results and experimental data shows good agreement. The developed model will be used in further studies of operation of automobile alternators in small wind energy conversion systems* (*WECS*).
Keywords: *wind energy conversion systems, WECS, automobile alternators*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Общата инсталирана мощност на вятърни турбини в света през 2015 година е достигнала 433GW [1], като от тях 830MW се падат на над 1 милион инсталирани малки вятърни турбини [2]. Според стандарта IEC-61400-2 като малки ветрогенератори могат да бъдат класифицирани генератори с ометена площ на турбината до 200 m^2 и напрежения до 1000V AC или до 1500V DC [3]. Според [2] мощността на малките вятърни турбини е до 100kW. През последните го-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

дини средната мощност на малките ветрогенератори непрекъснато се увеличава, като за 2014 година тя е достигнала 0,87kW. Прогнозите са, че до 2020 година инсталираните малки ветрогенератори ще достигнат обща мощност 1,5GW [2].

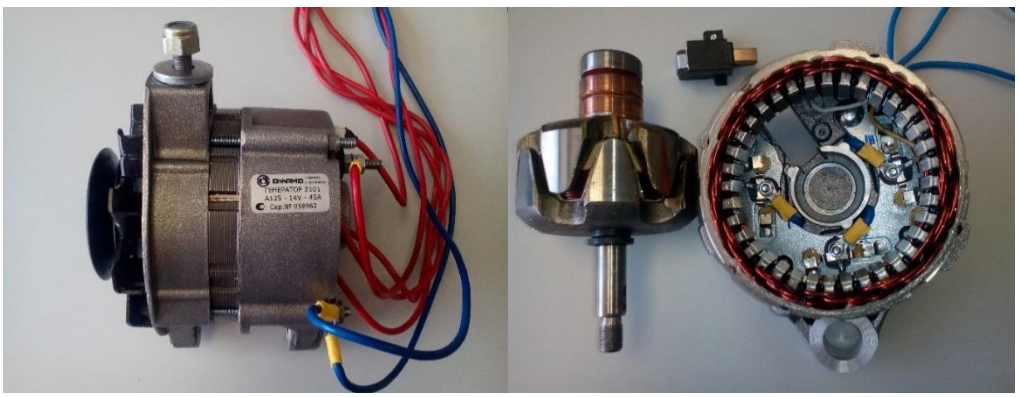
Едно добро решение в областта на ветроенергийните преобразувателни системи (ВЕПС) с малка мощност, предназначени за автономна работа, е използването на автомобилен алтернатор като генератор на електрическа енергия. Автомобилният алтернатор е малък (от 0.5 kW до 5 kW) и сравнително евтин синхронен генератор с ротор с нокътовидни полюси. Технологията на изработването на автомобилния алтернатор е добре известна, но въпреки това дава възможности за усъвършенстване, като в последните 10-15 години се забелязва сериозно увеличаване на мощностите и производителността на автомобилните алтернатори [4], [5], [6].

Подобряващите се показатели и ниската цена на автомобилните алтернатори ги прави подходящи за използване в малки ветрогенератори.

2. ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Целта на настоящата работа е да бъдат получени характеристиките на автомобилен алтернатор чрез експериментално изследване. След експерименталното снемане на характеристиките и параметрите на алтернатора, резултатите от изследването на машината ще бъдат използвани в математически модел, разработен в средата Matlab/Simulink. Този модел ще бъде използван впоследствие за симулиране на работата на цяла ветроенергийна преобразувателна система.

След проучване на пазара е избран алтернатор тип Г221, произведен от „Динамо-Сливен“ (фиг.1). Този генератор може да работи в тежки условия – високи температури и влажност, както и при широк диапазон от скорости на въртене. Различните скорости, при които автомобилният алтернатор може да работи устойчиво, позволяват използването му във ветрогенератори, функциониращи с променлива скорост на въртене при различни скорости на вятъра, което позволява по-добро извличане на енергията на вятъра [7], [8].

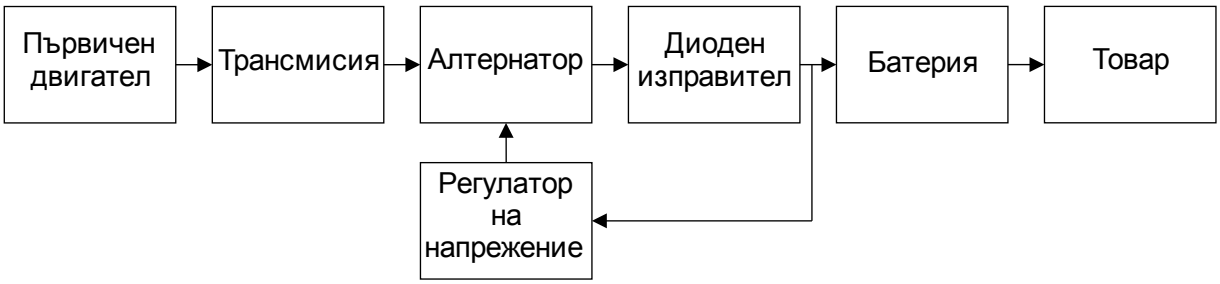


Фиг.1. Външен вид и разглобен алтернатор тип Г221.

Поради необходимостта от постоянно напрежение в автомобилите, алтернаторите са снабдени с неуправляем диоден изправител, който е интегриран в корпуса на машината. Напрежението на изводите на токоизправителя се управлява от

електронен регулатор. Съществуват множество решения за такива регулатори на напрежение, които се използват в автомобилната индустрия и осигуряват на изводите на диодния токоизправител постоянно напрежение около 14V, което е необходимо за зареждането на автомобилния акумулатор. Регулирането на напрежението посредством регулирането на възбудителния ток на алтернатора позволява нормалната работа на машината в широк обхват от скорости – от около 1000min^{-1} до над 6000min^{-1}.

Блокова схема на система за генериране на електрическа енергия с алтернатор и регулатор на напрежение е представена на фиг.2.

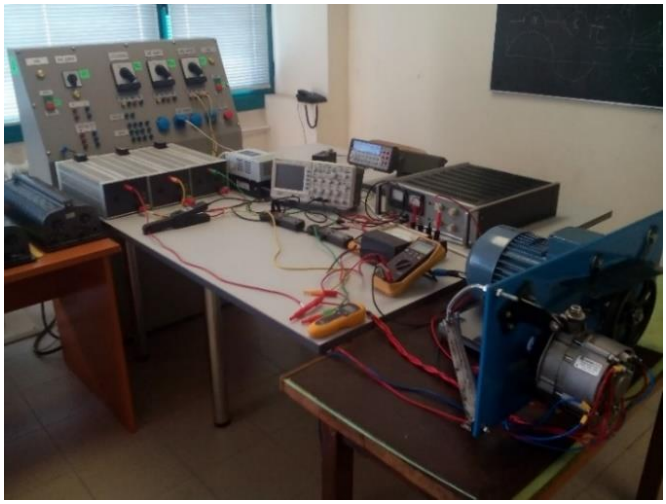


Фиг.2. Блокова схема на система с алтернатор и регулатор на напрежение.

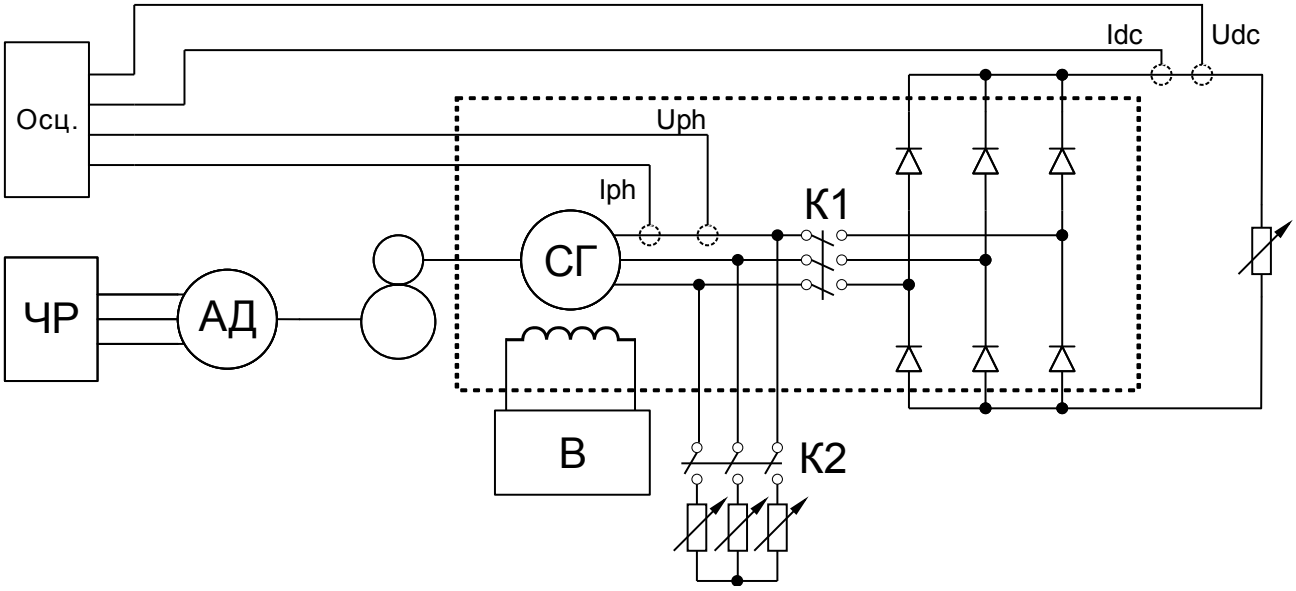
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

За целта на изследването в Лабораторията по Възобновяеми източници на енергия“ към катедра „Електрически машини“ в ТУ-София е разработен лабораторен стенд за експериментално изследване на алтернатори – фиг.3.

Принципна схема на стенда е показана на фиг.4. Алтернаторът се задвижва от асинхронен двигател (АД) посредством ремъчна предавка с предавателно число 2,29. Чрез честотно регулиране (ЧР) на скоростта на асинхронния двигател се осигурява широк обхват от скорости на въртене на изследвания алтернатор. Възбудителната намотка на алтернатора е захранена от независим управляем токоизправител (В), което дава повече свобода при експерименталното изследване на машината. Токовете и напреженията се измерват с подходящи сонди и се регистрират с цифров осцилоскоп (Осц.). Преминаването между режимите на работа на изследвания алтернатор се извършва чрез превключване на контакторите К1 и К2. При включен К1 алтернаторът работи като променливотоков генератор, а при включен К2 се изследва работата на алтернатора съвместно с неуправляем диоден изправител.



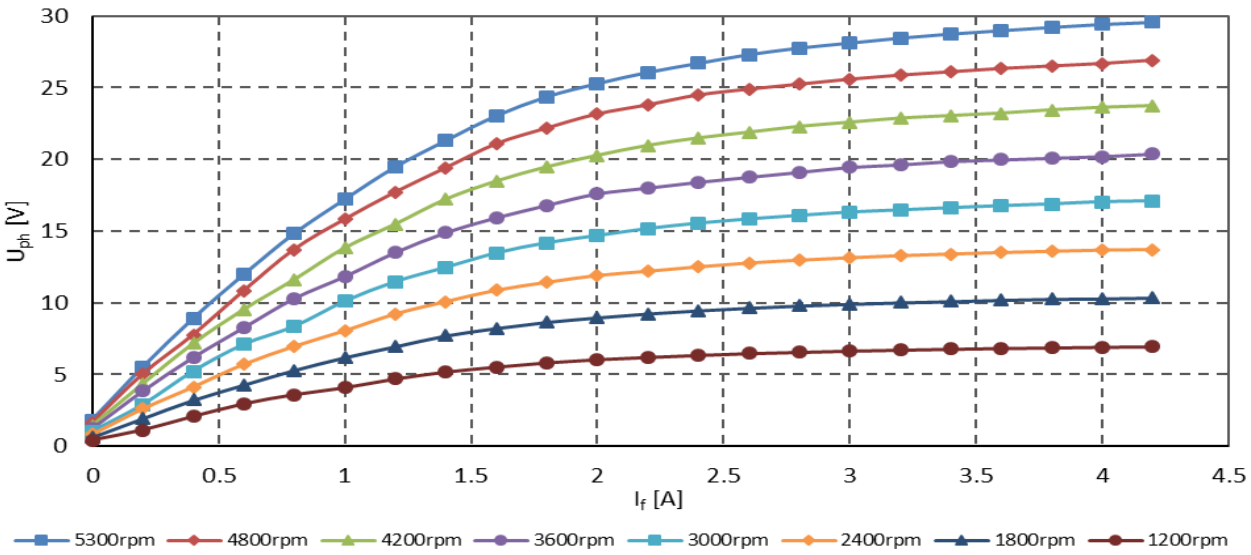
Фиг.3. Лабораторен стенд за експериментално изследване на алтернатори.



Фиг.4. Схема на стенда за експериментално изследване на алтернатори.

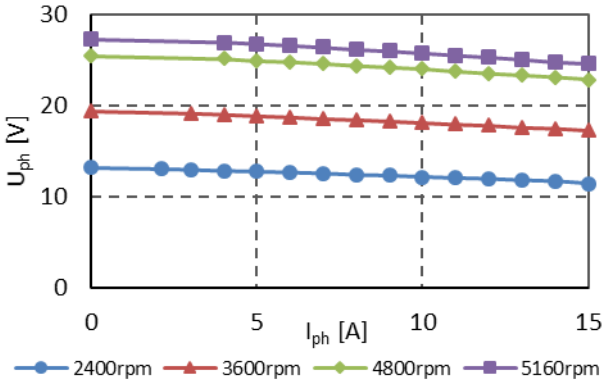
3.1 Изследване на алтернатора като променливотоков генератор

Изпитванията на алтернатора са проведени съгласно стандарта за изпитване на синхронни машини IEC-60034-4 [9]. Опитно са снети различни характеристики на машината, като някои от тях са представени по-долу. Характеристиките на празен ход за различни скорости на въртене са показани на фиг.5.

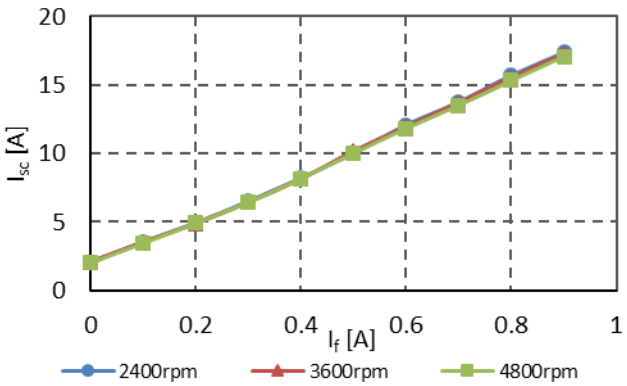


Фиг.5. Характеристики на празен ход при различни скорости на въртене.

Също така са снети външни характеристики на алтернатора за различни скорости на въртене при номинален възбудителен ток $I_f = I_{f_nom} = 3{,}3$А (фиг.6) и характеристики на късо съединение при различни скорости на въртене (фиг.7).



Фиг.6. Външни характеристики на алтернатора за различни скорости на въртене и $I_f=I_{f_nom}$=3,3A.



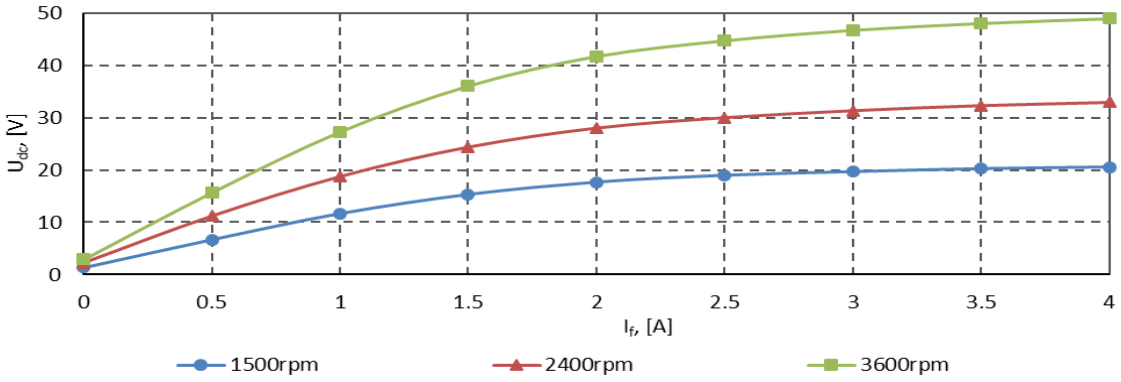
Фиг.7. Характеристики на късо съединение на алтернатора за различни скорости на въртене.

Индуктивностите на алтернатора са определени опитно чрез класически методи като: триъгълник на Потие, тест в режим на малко хлъзгане на ротора и графично - чрез характеристиките на празен ход и късо съединение. След като са определени наситените и ненаситените стойности на синхронната индуктивност по надлъжната ос L_d, е прието, че тя е еднаква с тази по напречната ос или $L_q=L_d$ =150μH. Това приемане е основано на информация от литературни източници, където е показано, че въпреки явнополюсната природа на ротора на алтернатора, той може да бъде разглеждан като неявнополюсна синхронна машина [10], [11].

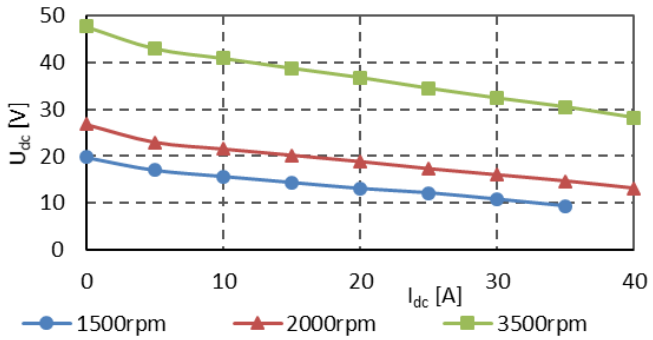
По-точното определяне на тези индуктивности ще представлява обект на по-нататъшно изследване.

3.2 Изследване на алтернатора съвместно с диоден токоизправител

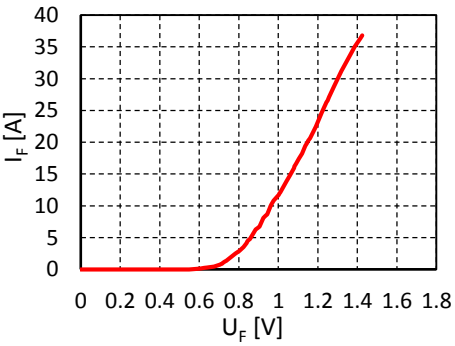
След получаването на основните параметри на алтернатора е изследвано и поведението на машината при съвместна работа с неуправляем диоден изправител. Експериментално са снети основни характеристики на алтернатора, като някои от тях са представени по-долу. На фиг.8 са показани характеристиките на празен ход, а на фиг.9 - външни характеристики за различни скорости на въртене.



Фиг.8. Характеристики на празен ход на Г221 с диоден изправител при различни скорости на въртене и възбудителен ток I_f=3.3A.



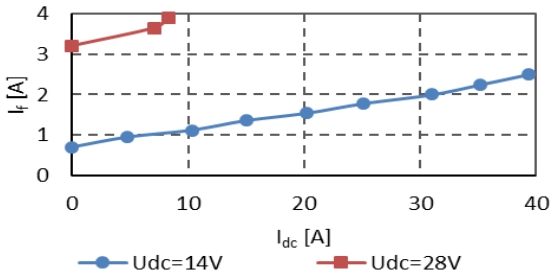
Фиг.9. Външни характеристики на алтернатора с диоден токоизправител при различни скорости на въртене, If=3.3A.



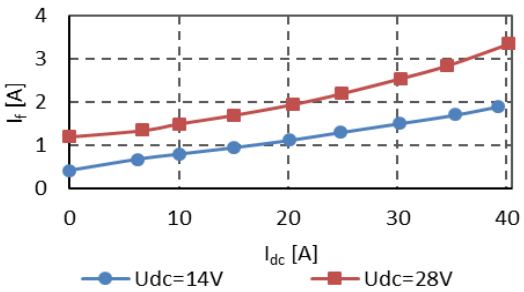
Фиг.10. ВАХ на диодите в токоизправителя.

Леката нелинейност в началото на външните характеристики (от I_{dc}=0A до I_{dc}=5A) се дължи на пада на напрежение в диодите на токоизправителя. Волт-амперната характеристика (ВАХ) на диодите е снета експериментално – фиг.10.

Снети са и регулировъчните характеристики на алтернатора при съвместната му работа с диоден изправител за две различни скорости на въртене и две различни изходни напрежения - фиг.11 и фиг.12.



Фиг.11. Регулировъчна характеристика при n=2400rpm.



Фиг.12. Регулировъчна характеристика при n=3600rpm.

4. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА АЛТЕРНАТОРА

На основата на получените резултати е разработен математически модел на алтернатора посредством уравненията от обобщената теория на електрическите машини [12]. Уравненията на напреженията на алтернатора са:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_d}{dt} &= U_d + \omega_r \Psi_q + R_S \frac{\Psi_{md} - \Psi_d}{L_{\sigma s}} \\
\frac{d\Psi_q}{dt} &= U_q + \omega_r \Psi_d + R_S \frac{\Psi_{mq} - \Psi_q}{L_{\sigma s}} \\
\frac{d\Psi_f}{dt} &= U_f + R_f \frac{\Psi_{md} - \Psi_f}{L_{\sigma f}} \\
\frac{d\Psi_{kd}}{dt} &= R_{kd} \frac{\Psi_{md} - \Psi_{kd}}{L_{\sigma kq}} \\
\frac{d\Psi_{kq}}{dt} &= R_{kq} \frac{\Psi_{md} - \Psi_{kq}}{L_{\sigma kq}}
\end{aligned} \qquad (1)$$

където U_d и U_q са статорните напрежения по надлъжната ос d и по напречната ос q, U_f - напрежението на възбудителната намотка, R_s - съпротивлението на статора, R_f - съпротивлението на ротора, R_{kd}, R_{kq} - съпротивленията на успокоителната намотка на ротора по осите d и q.

Токовете на синхронната машина могат да бъдат представени чрез потокосцепленията в нея:

$$\begin{vmatrix} i_d = \dfrac{\Psi_d - \Psi_{md}}{L_{\sigma s}} \\ i_q = \dfrac{\Psi_q - \Psi_{mq}}{L_{\sigma s}} \\ i_f = \dfrac{\Psi_f - \Psi_{md}}{L_{\sigma f}} \\ i_{kd} = \dfrac{\Psi_{kd} - \Psi_{md}}{L_{\sigma kd}} \\ i_{kq} = \dfrac{\Psi_{kq} - \Psi_{mq}}{L_{\sigma kq}} \end{vmatrix} \tag{2}$$

Тук i_d и Ψ_d са проекциите на пространствените вектори на тока и потокосцеплението по оста d; i_q и Ψ_q са проекциите на пространствените вектори на тока и потокосцеплението по оста q; i_f и Ψ_f са токът и потокосцеплението на възбудителната намотка; i_{kd}, Ψ_{kd}, i_{kq} и Ψ_{kq} са токовете и потокосцепленията на успокоителната намотка на ротора; $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma f}$, $L_{\sigma kd}$, $L_{\sigma kq}$ са индуктивностите на разсейване съответно на статора, възбудителната намотка и успокоителните намотки на ротора по осите d и q; Ψ_{md} и Ψ_{mq} са потокосцепленията на взаимна индукция, определени от:

$$\begin{aligned} \Psi_{md} &= LMD\left(\frac{\Psi_d}{L_{\sigma s}} + \frac{\Psi_f}{L_{\sigma f}} + \frac{\Psi_{kd}}{L_{\sigma kd}}\right) \\ \Psi_{mq} &= LMQ\left(\frac{\Psi_q}{L_{\sigma s}} + \frac{\Psi_{kq}}{L_{\sigma kq}}\right) \end{aligned} \tag{3}$$

където LMD и LMQ са еквивалентните индуктивности на паралелно свързаните индуктивности по надлъжната и напречната ос:

$$\begin{aligned} LMD &= \frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_{\sigma s}} + \frac{1}{L_{\sigma f}} + \frac{1}{L_{\sigma kd}} \\ LMQ &= \frac{1}{L_{mq}} + \frac{1}{L_{\sigma s}} + \frac{1}{L_{\sigma kq}} \end{aligned} \tag{4}$$

където L_{md} и L_{mq} са намагнитващите индуктивности по осите d и q.

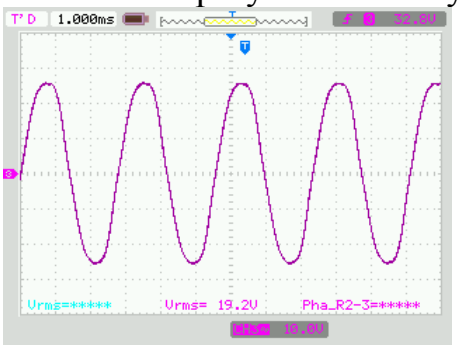
Уравнението за движение на синхронната машина е:

$$T_e = \frac{J}{p_p}\frac{d\omega_r}{dt} + T_m + k_D\omega_r + T_{add} \tag{5}$$

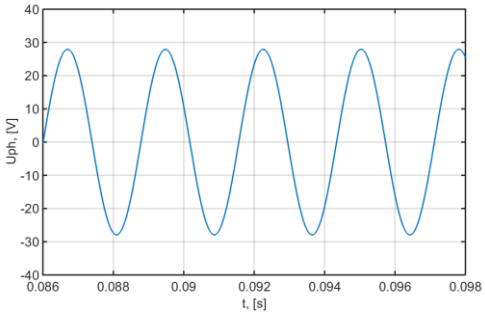
където T_e е електромагнитният момент, J - инерционният момент, p_p - броят на двойките полюси, T_m - външният момент, действащ върху вала на машината, k_D - коефициент на демпфериране, T_{add} - допълнителен момент, дължащ се на загубите в стоманата и механичните загуби в машината. Успокоителният и допълнителният момент са пренебрегнати, поради трудното им определяне.

5. СРАВНЕНИЕ МЕЖДУ СИМУЛАЦИОННИТЕ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Резултатите от проведените симулации са сравнени с експерименталните данни, като се вижда, че те съвпадат със задоволителна точност. На фиг.13 е показана осцилограма на фазовото напрежение на изследвания алтернатор, а на фиг.14 е показан резултат от симулация в Matlab/Simulink.

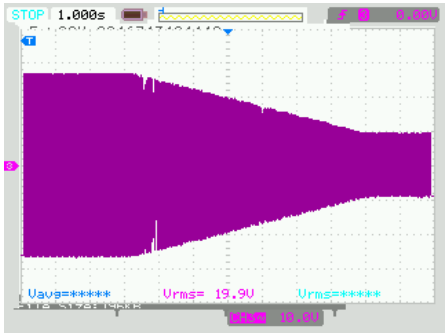


Фиг.13. Осцилограма на фазовото напрежение на изследвания алтернатор.

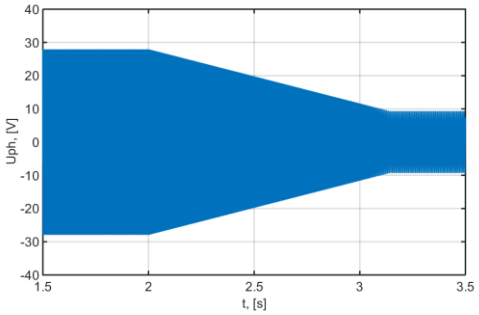


Фиг.14. Фазово напрежение на модела на алтернатора.

На фиг.16 и фиг.17 е показано изменението на напрежението на машината и на модела с изменение на скоростта на въртене при постоянен възбудителен ток, което показва устойчивостта на модела при промяна на скоростта, каквато би могла да се очаква в една ВЕПС.

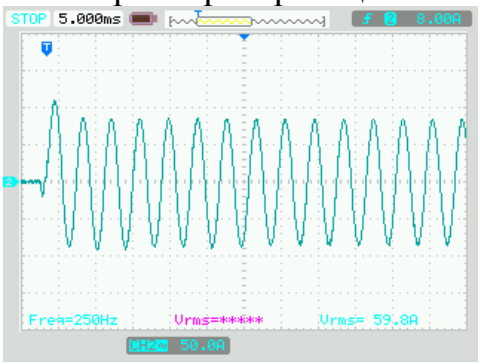


Фиг. 16 Осцилограма на напрежението на празен ход при изменение на скоростта на въртене от 3600 до 1200rpm.

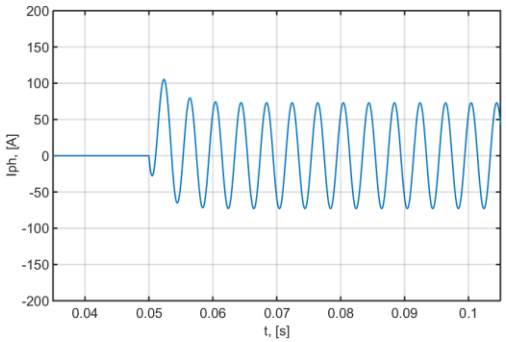


Фиг. 17 Напрежение на празен ход при изменение на скоростта на въртене от 3600 до 1200rpm на модела в Matlab/Simulink.

На фиг.18 и фиг.19 е сравнена осцилограма от внезапно трифазно късо съединение на алтернатора с реакцията на модела при идентични условия.

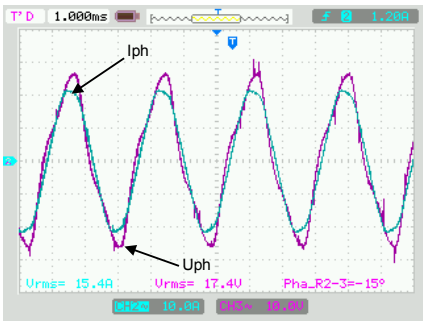


Фиг.18. Осцилограма на фазовия ток при внезапно късо съединение.

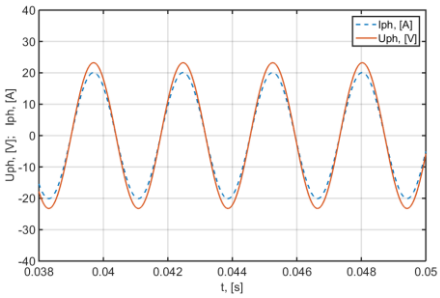


Фиг.19. Фазов ток на модела при внезапно късо съединение.

На фиг.20 е показана осцилограма на фазовия ток и напрежение на изследвания алтернатор при натоварване с активен товар, а на фиг.21 са показани изчислените форми на тока и напрежението при същите условия с помощта на разработения модел на алтернатора в Matlab/Simulink.



Фиг.20. Осцилограма на фазовия ток и напрежение на алтернатора при работа с активен товар.



Фиг.21. Фазов ток и напрежение на при натоварване с активен товар на модела в Matlab/Simulink.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено е експериментално изследване на алтернатор с електромагнитно възбуждане. Получени са характеристиките и параметрите на машината и е проучена възможността за работата ѝ във ВЕПС с малка мощност. На базата на експерименталните данни и обобщената теория на електрическите машини е създаден математически модел на алтернатор в средата Matlab/Simulink. Теоретичните резултати имат добро съвпадение с експерименталните, което показва адекватността на разработения математически и симулационен модел. Моделът ще бъде използван в по-нататъшно изследване не ВЕПС с малка мощност.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията в статията са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София - 2016г. по дог. № 162ПД0010-01 за научен проект в помощ на докторант.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Global Wind Energy Council (GWEC), ***Wind Report***, 2016, http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf.
[2] World Wind Energy Association (WWEA), ***Small Wind World Report***, 2016, http://www.wwindea.org/download/small_wind_/SWWR2016-SUMMARYR_2.pdf
[3] **IEC-61400-2:2013, "*Wind turbines - Part 2: Small wind turbines*"** – https://webstore.iec.ch/publication/5433
[4] Shrud M. A., Bousbaine A., Elazrag A., Benamrouche N. (2009), ***Analysis and simulation of a 42V power system for automotive applications***, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, Glasgow, 2009, pp. 1-5
[5] Perreault D. J., Caliskan V. (2000), ***A new design for automotive alternators***,

Proceedings of International Congress on Transportation Electronics (Convergence 2000), Oct. 2000, SAE Paper 2000-01-C084, pp. 583–594.
[6] Perreault D. J., Caliskan V. (2004) ***Automotive power generation and control***, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 3, pp. 618-630, May 2004
[7] Muljadi E., Butterfield C. P. (2002) ***Pitch–controlled variable wind turbine generators***, IEEE Trans, Ind, Appl, vol. 37, pp. 240-246, Jan./Feb 2002
[8] Mesbahi A., Saad A., Khafallah M., Bouattane O., Raihani A. (2013) ***Boost converter analysis to optimise variable speed PMSG wind generation system***, Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2013 International, Ouarzazate, 2013, pp. 275-280
[9] **IEC-60034-4:2008, "*Rotating electrical machines - Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*"** –
https://webstore.iec.ch/publication/138
[10] Gimeno A. (2011) ***Contribution à l'étude d'alternateurs automobiles: caractérisation des pertes en vue d'un dimensionnement optimal***, Thèse, Université de Technologie de Compiègne, 2011
[11] Whaley D. M., Soong W. L., Ertugrul N. (2004) ***Extracting More Power from the Lundell Car Alternator***, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004), 26-29 September 2004, Brisbane, Australia
[12] Lazarov V. (2012) ***Theoretical and practical problems of the modeling of wind-power generators***, E+E, 11-12, 2012, pp. 53-61

Автори: Захари Зарков, доцент, д-р, кат. „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; Иван Бачев, докторант, кат. „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *iv.bachev@tu-sofia.bg*; Борис Демирков, докторант, кат. „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *demirkov@tu-sofia.bg*; Владимир Лазаров, проф. д-р, кат. „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vl_lazarov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Пламен Ризов

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛТЕРНАТОР С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Захари Зарков, Иван Бачев, Борис Демирков, Владимир Лазаров

Резюме: *Целта на работата е създаването на автомобилен алтернатор с редкоземни магнити, който е изследван експериментално и е характеризиран. На базата на определените от изследването параметри е разработен устойчив математически модел на алтернатора чрез уравненията на обобщената теория на електрическите машини. Изготвеният модел ще бъде използван в бъдещи изследвания на работата на автомобилни алтернатори в малки ветроенергийни преобразователни системи. Сравнени са получените експериментални данни с резултатите от симулациите, проведени в средата Matlab/Simulink.*
Ключови думи: *ветроенергийни преобразователни системи, ВЕПС, автомобилни алтернатори, постоянни магнити, синхронен генератор с постоянни магнити*

EXPERIMENTAL STUDY OF ALTERNATOR WITH PERMANENT MAGNETS

Zahari Zarkov, Ivan Bachev, Boris Demirkov, Vladimir Lazarov

Abstract: *The purpose of the work is to create an automobile alternator with rare earth permanent magnets. An experimental study is carried out for the characterization of the machine. On the base of the experimental results is developed a stable mathematical model of the alternator with the generalized theory of the electrical machines. The model will be used in future study of small wind energy conversion systems (WECS) using permanent magnet alternators. The obtained experimental results are compared with the simulations of the machine in Matlab/Simulink.*
Keywords: *wind energy conversion systems, WECS, automobile alternators, permanent magnets, PMSG*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните ветроенергийни преобразователни системи се забелязва увеличаващ се дял на вятърни турбини, използващи синхронни генератори с постоянни магнити. Този вид генератори се използват както в големи така и в малки ВЕПС, работещи с променлива скорост на въртене [1], [2]. Автомобилният алтернатор е малък (от 0.5 kW до 5kW) и сравнително евтин синхронен генератор с нокътовиден ротор и възбудителна намотка. Поради необходимостта от изразходване на част от произведената енергия за възбуждане на алтернатора, за работата му в малка ВЕПС е целесъобразно възбудителната намотка да бъде заме-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

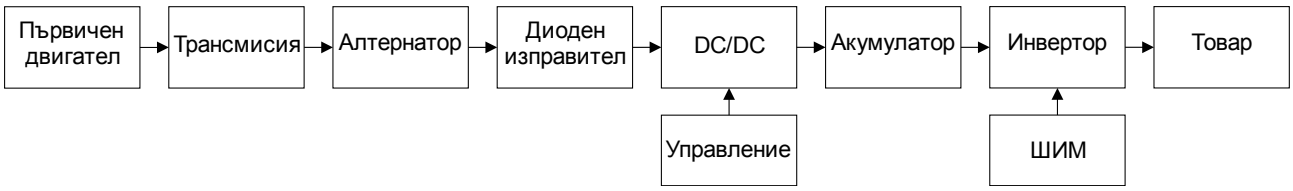
нена с постоянни магнити. Такива опити са правени от авторите в [3] и [4], както и [5]. Все по-намаляващата цена и подобряващите се качества на редкоземните магнити ги прави подходящи за целта [6].

2. ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Целта на настоящото изследване е създаване на автомобилен алтернатор с пръстеновиден постоянен магнит от редкоземни материали (Nd, Fe, B) на базата на генератор Г221, произведен от „Динамо- Сливен“ (фиг.1). Замяната на възбудителната намотка на алтернатора води до намаляване на загубите в машината, поради премахване на четковия апарат и премахване на нуждата от възбуждане, което може да достигне загуби, равни на 10% от полезната мощност на машината. Освен това, премахването на четковия апарат намалява нуждата от поддръжка на алтернатора, удължавайки живота, намалявайки необходимите разходи и увеличавайки производителността на ветроенергийната преобразувателна система, като в същото време позволява работата на системата с променливи скорости на въртене. [7], [8].

Фиг.1. Модифициран ротор на алтернатора.

Най-общо една ВЕПС с алтернатор с постоянни магнити може да бъде представена с блоковата схема от фиг.2. DC/DC преобразувателят може да бъде повишаващ или неинвертиращ понижаващо-повишаващ преобразувател, които са сред най-често срещаните топологии [9], [10].



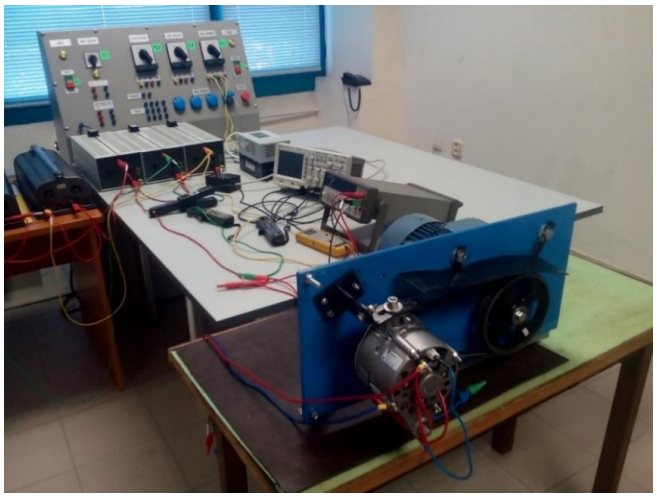
Фиг.2. ВЕПС с алтернатор с постоянни магнити.

Поради замяната на възбудителната намотка на алтернатора с постоянни магнити се губи възможността за регулиране на изходното напрежение чрез възбудителния ток. Това налага използването на силови електронни преобразуватели, които да регулират напрежението на изхода на машината по такъв начин, че то да е подходящо за зареждане на акумулатор или за използване от потребите-

лите. Наличието на силови електронни преобразуватели дава възможност за работа на ВЕПС в широк диапазон на скорости на вятъра, което спомага за увеличаване на производителността [9], [10].

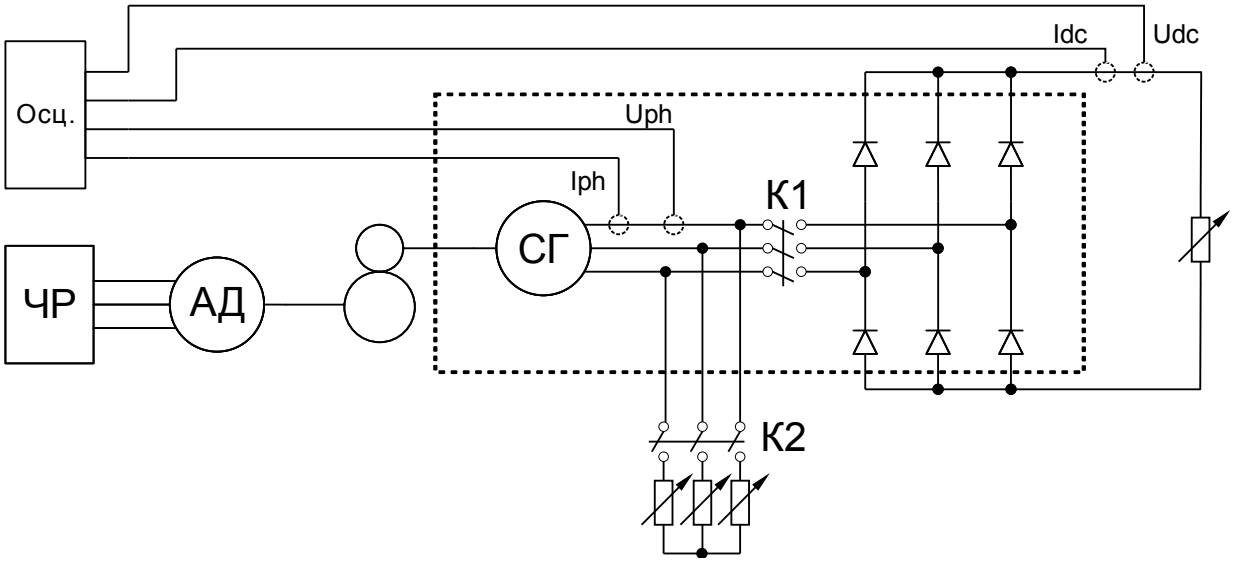
3. ОПИТНА ПОСТАНОВКА

За целта на изследването в Лабораторията по Възобновяеми източници на енергия“ към катедра „Електрически машини“ в ТУ-София е изработен лабораторен стенд за експериментално изследване на алтернатор Г221 – фиг.3.



Фиг.3. Опитна постановка за изследване на алтернатори.

Принципна схема на стенда е показана на фиг.4. Алтернаторът се задвижва от асинхронен двигател (АД) с номинална мощност 3,3kW, посредством ремъчна предавка с предавателно число 2,29. По този начин чрез честотно регулиране (ЧР) на скоростта на асинхронния двигател се осигурява широк диапазон от скорости на въртене на изследвания алтернатор, достигащи до 5300 min^{-1}. Токовете и напреженията се регистрират с цифров осцилоскоп (Осц.). При включен прекъсвач К1 и изключен К2 алтернаторът работи в режим на променливотоков генератор, което позволява експерименталното снемане на някои важни за синхронната машина параметри. При включен К2 и изключен К1 алтернаторът работи съвместно с неуправляем диоден токоизправител, позволяващ запасяване на произведената енергия и регулирането на напрежението посредством постояннотокови преобразуватели.



Фиг.4. Принципна схема на стенда за изследване на алтернатори.

3.1 Експериментални резултати и характеристики

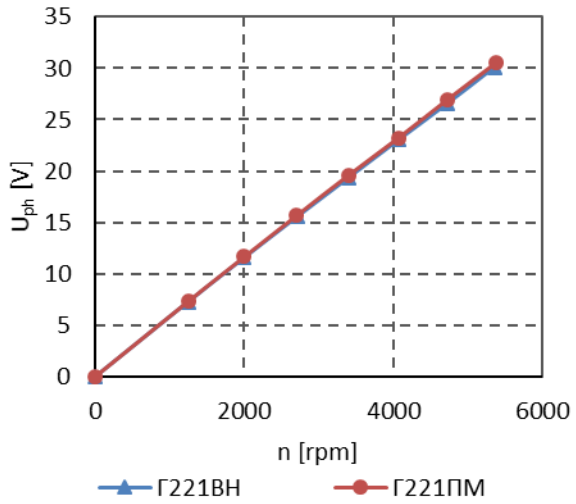
Изпитванията на модифицирания алтернатор с постоянен магнит са проведени съгласно стандарта за изпитване на синхронни машини IEC-60034-4 [11], както и [12], [13], [14].

За да бъдат определени важни за синхронния генератор параметри, които ще бъдат използвани при математическото моделиране на машината, е необходимо измерванията да бъдат направени без диодния токоизправител.

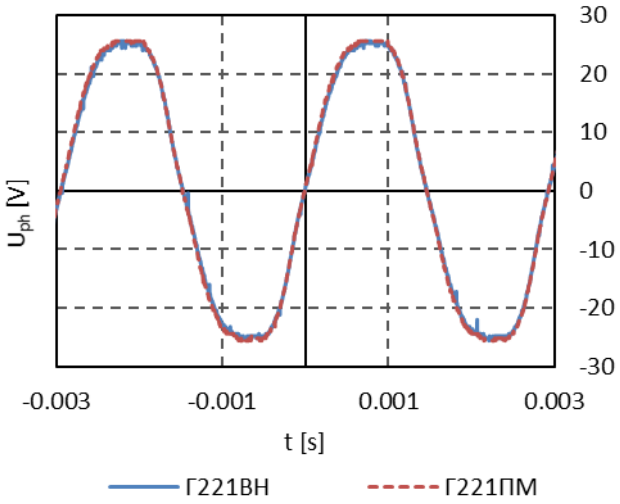
Поради невъзможността за снемане на характеристика на празен ход, дължаща се на постоянния поток от магнита, опитно е снета характеристиката на фазовото напрежение във функция от скоростта на въртене – $U_{ph}=f(n)$, която е сравнена със същата характеристика на алтернатора с електромагнитно възбуждане (фиг.5). Вижда се доброто съвпадение в характеристиките на напреженията на двете изследвани машини. Трябва да се отбележи, че възбудителният ток на алтернатора с електромагнитно възбуждане в случая е 4A, което е с 0,7A повече от номиналния възбудителен ток на машината.

На фиг.6 е показано сравнение на фазовите напрежения на двете машини при една и съща скорост на въртене. Може да се забележи доброто съвпадение в синусоидите на напреженията на двете машини.

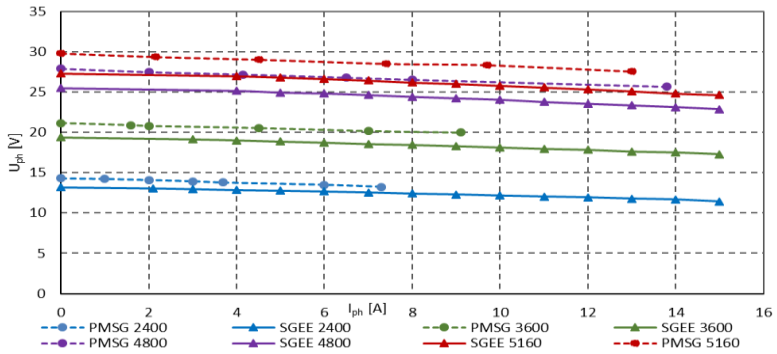
Също така са снети външни характеристики на модифицирания алтернатор при различни скорости на въртене, като е сравнено поведението на алтернатора с възбудителна намотка и на алтернатора с постоянни магнити (фиг.7). Забелязва се, че при по-високи скорости на въртене алтернаторът с постоянни магнити може да има по-високи напрежения за даден товарен ток в сравнение с алтернатора с възбудителна намотка. Това се дължи на по-големия магнитен поток, създаден от избрания редкоземен магнит.



Фиг.5. Сравнение на характеристиките на фазовото напрежение във функция от скоростта U=f(n) за алтернатора с възбудителна намотка при I_f=4A и за модифицирания алтернатор с постоянен магнит.



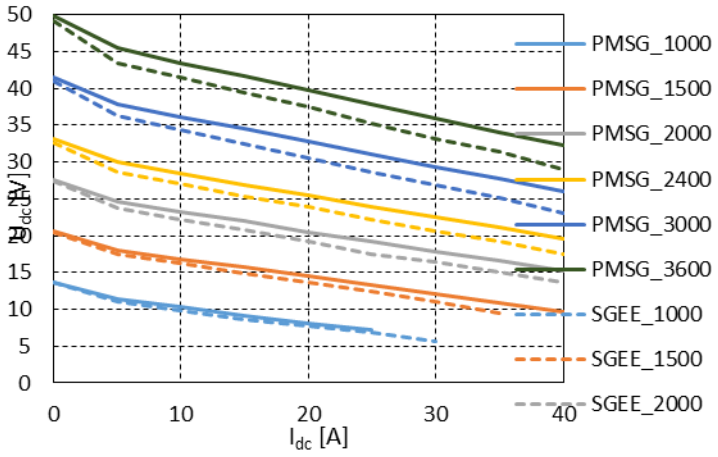
Фиг.6. Сравнение на осцилограми на фазовите напрежения на двата алтернатора при еднакви скорости на въртене.



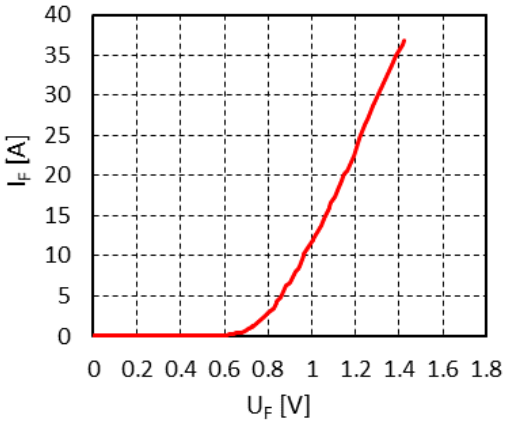
Фиг.7. Сравнение на външните характеристики на двата алтернатора при различни скорости на въртене.

3.3 Съвместна работа на алтернатора с диоден токоизправител

След получаването на основните параметри на алтернатора с постоянен магнит е изследвано и поведението на машината с включен диоден токоизправител. Външните характеристики на алтернатора с възбудителна намотка и на модифицирания алтернатор с постоянен магнит са сравнени на фиг.8. Също както при работата на алтернаторите без диоден токоизправител и тук може да се види по-голямата производителност на алтернатора с постоянен магнит, която се увеличава с увеличаване на скоростта на въртене.



Фиг.8. Сравнение на външните характеристики на двата алтернатора при съвместна работа с неуправляем диоден токоизправител и различни скорости на въртене



Фиг.9. ВАХ на диодите в токоизправителя.

Леката нелинейност в началото на външните характеристики (от I_{dc}=0A до I_{dc}=5A) се дължи на пада на напрежение в диодите на токоизправителя, който е определен експериментално - фиг.9. От външните характеристики на фиг.8 се вижда, че при постоянното възбуждане, осигурено от редкоземните магнити и различни скорости на въртене, постоянното напрежение, което се получава от неуправляемия диоден токоизправител варира в много широки граници. Това дава предпоставка за използване на различни управляеми силови електронни преобразуватели, които да дадат възможност за регулиране на изходното напрежение на алтернатора. Някои от най-подходящите топологии, срещани в литературата са повишаващ преобразувател и неинвертиращ понижаващо-повишаващ преобразувател [9], [10], [14], [15].

4. УРАВНЕНИЯ ОТ ОБОБЩЕНАТА ТЕОРИЯ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МАШИНИ

На основата на получените резултати е разработен математически модел на алтернатор посредством уравненията от обобщената теория на електрическите машини [16]. В синхронните машини с постоянни магнити липсва възбудителна намотка, а често липсват и успокоителни намотки, което свежда добре познатата система от уравнения на статорните напрежения до:

$$\begin{cases} \dfrac{d\Psi_d}{dt} = U_d + \omega_r \Psi_q - R_S \dfrac{\Psi_d - L_{pm} i_{pm}}{L_d} \\ \dfrac{d\Psi_q}{dt} = U_q + \omega_r \Psi_d - R_S \dfrac{\Psi_q}{L_q} \end{cases} \quad (1)$$

където U_d и U_q са статорните напрежения по надлъжната ос d и по напречната ос q, R_s е съпротивлението на статора, а постоянният магнит е представен чрез еквивалентната индуктивност L_{pm} и еквивалентния намагнитващ ток i_{pm}, които са приведени към статора.

Токовете на синхронната машина се изразяват чрез потокосцепленията в намотките:

$$\begin{cases} i_d = \dfrac{\Psi_d - L_{pm} i_{pm}}{L_d} \\ i_q = \dfrac{\Psi_q}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

Тук i_d и Ψ_d са проекциите на пространствените вектори на тока и потокосцеплението по оста d, i_q и Ψ_q са проекциите на на пространствените вектори на тока и потокосцеплението по оста q, L_d и L_q са индуктивностите на статора по осите d и q.

Уравнението за електромагнитния момент на синхронната машина в координатна система, свързана с ротора, е:

$$T_e = \frac{3}{2} p_p \left(L_d - L_q\right) i_d i_q + \frac{3}{2} p_p L_{pm} i_{pm} i_q \quad (3)$$

където T_e е електромагнитният момент, p_p е броят на двойките полюси.

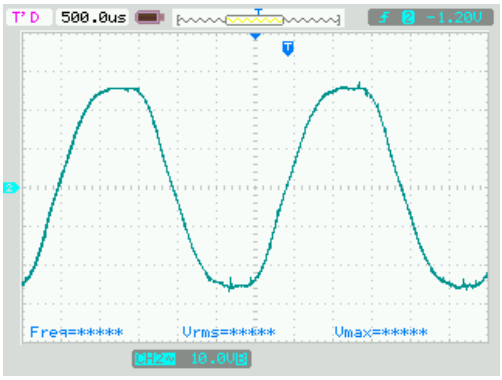
Първият член на уравнението за движение представлява реактивният момент,

създаден от разликата на индуктивностите L_d и L_q, а вторият член представлява момента, създаден от магнитното поле на постоянните магнити.

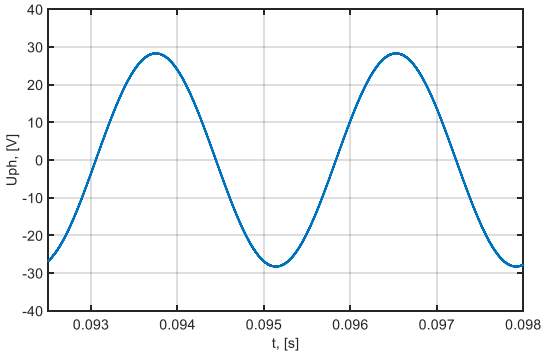
5. СРАВНЕНИЕ СИМУЛАЦИОННИТЕ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Резултатите от проведените симулации са сравнени с експерименталните данни, като се вижда, че те съвпадат със задоволителна точност.

На фиг.10 е показана осцилограма на фазовото напрежение на изследвания алтернатор с постоянни магнити, а на фиг.11 е показан резултат от симулация в Matlab/Simulink.

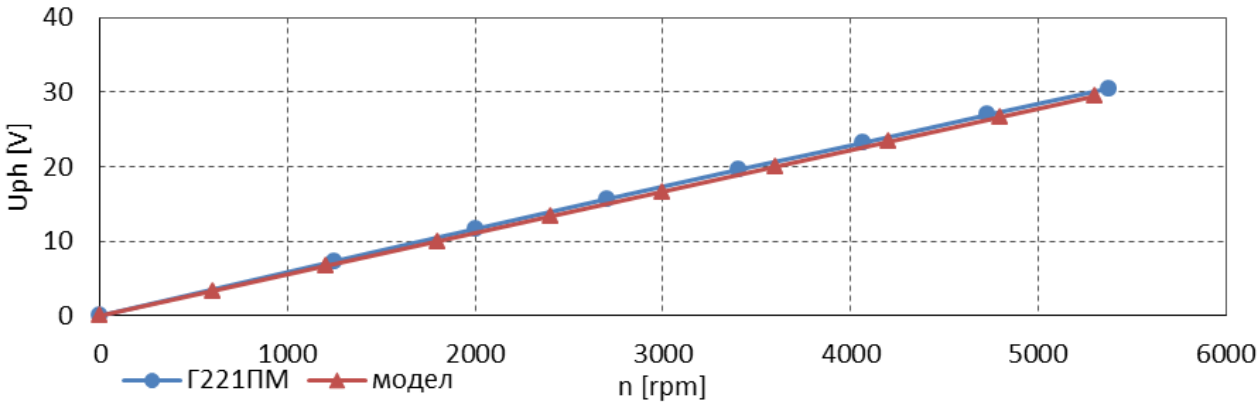


Фиг.10. Осцилограма на фазовото напрежение на алтернатора с ПМ



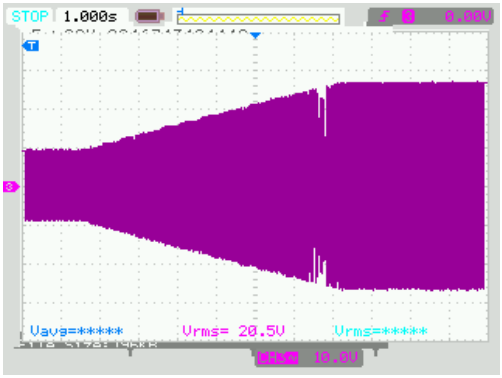
Фиг.11. Фазово напрежение на модела в Matlab/Simulink

На фиг.12 са показани фазовите напрежения на алтернатора и на модела във функция от скоростта на въртене на машината – $U_{ph}=f(n)$. Както се вижда, характеристиките на напреженията на алтернатора с постоянни магнити и модела съвпадат със задоволителна точност.

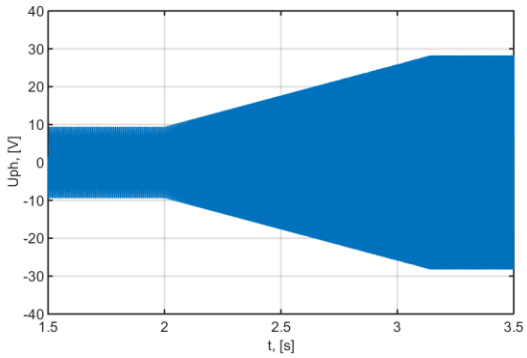


Фиг.12. Сравнение на характеристиките на напрежението на празен ход във функция от скоростта $U_{ph}=f(n)$ на алтернатора с ПМ и на модела.

На фиг.13 и фиг.14 е показано изменение на напрежението на машината и модела при промяна на скоростта на въртене, което показва устойчивостта на модела при промяна на скоростта, което е характерно за работата на съвременните ВЕПС.

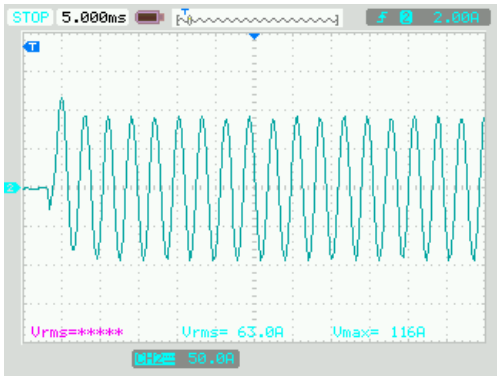


Фиг.13. Напрежение на празен ход при промяна на скоростта от 1200rpm до 3600rpm.

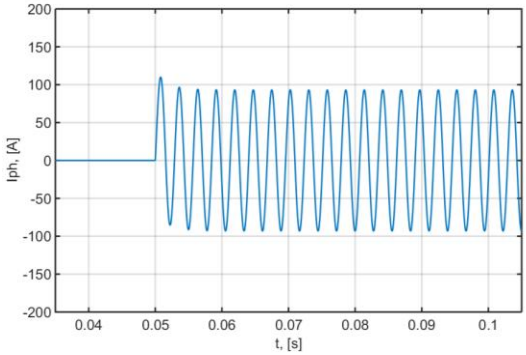


Фиг.14. Напрежение на празен ход при промяна на скоростта от 1200rpm до 3600rpm.

На фиг.15 и фиг.16 е сравнена осцилограма от внезапно трифазно късо съединение с реакцията на модела при идентични условия.

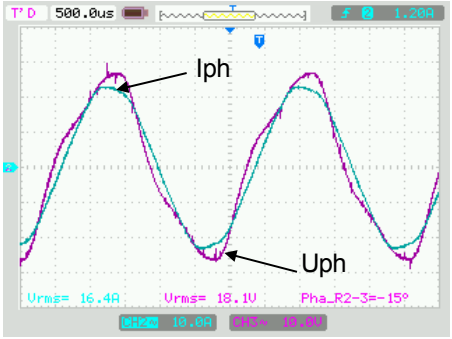


Фиг.15. Ток на внезапно късо съединение на алтернатора с ПМ.

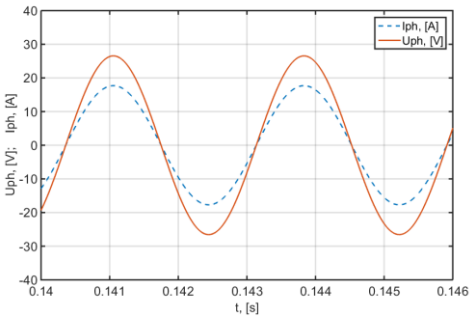


Фиг.16. Ток на внезапно късо съединение на модела.

На фиг.17 и фиг.18 е представено поведението на модела и алтернатора при натоварване с активен товар.



Фиг.17. Фазов ток и напрежение на алтернатора при работа с активен товар.



Фиг.18. Фазов ток и напрежение на модела при работа с активен товар.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модифициран е автомобилен алтернатор, като възбудителната му намотка е заменена с пръстеновиден постоянен магнит от редкоземни материали (Nd, Fe, B). Доказана е работоспособността на създадения алтернатор с постоянен магнит. Проведено е експериментално изследване на модифицирания алтернатор, който

е характеризиран и е проучена възможността за работата му във ВЕПС с малка мощност. Сравнени са основни характеристики на алтернатора с възбудителна намотка и алтернатора с редкоземен магнит, като се забелязва голямо сходство между тях. На базата на експерименталните данни и обобщената теория на електрическите машини е разработен математически модел на алтернатор с постоянни магнити, който да бъде използван в последващи изследвания на ВЕПС с малка мощност. Очаква се замяната на възбудителната намотка да доведе до повишаване на коефициента на полезно действие на алтернатора поради премахването на загубите за възбуждане, като това ще бъде проверено в по-нататъшно изследване.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията в статията са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София - 2016г. по дог. № 162ПД0010-01, за научен проект в помощ на докторант.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Cao W., Xie Y., Tan Z. (2012) ***Chapter 7 - Wind Turbine Generator Technologies,*** Advances in Wind Power, InTech, 2012

[2] Van Hertem D., Gomis-Bellmunt O., Liang J. (2016) ***Chapter 5 - Wind Turbine Technologies,*** HVDC Grids For Offshore and Supergrid of the Future, Wiley-IEEE Press, 2016

[3] Marinov M., Streblau M., Penev T., Aprahamian B. (2015) ***Study of the Electromagnetic Characteristics of Synchronous Generator by Replacement of Excitation Winding with Permanent Magnets***, Proceedings of Fourteenth International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems - ELMA 2015, pp. 14-17, 2-3 October 2015, Varna, Bulgaria

[4] Jurca N. F. (2009) ***Claw Pole Synchronous Generaotr for Small Electric Systems***, PhD Thesis, Technical University of Cluj-Napoca, 2009

[5] **WindBlue Power**, http://www.windbluepower.com/category_s/1.htm

[6] **Kitco Metals Inc**., http://www.kitco.com/strategic-metals/

[7] Tasneem Z., Sheikh M. R. I. (2015) ***Comprehensive modeling and analysis of Variable Speed Wind Turbine using Permanent Magnet Synchronous Generator***, 2015 International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), Rajshahi, 2015, pp. 133-136

[8] Kumar A. V. P., Parimi A. M., Rao K. U. (2015) ***Investigation of small PMSG based wind turbine for variable wind speed***, Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), 2015 International Conference on, Noida, 2015, pp. 107-112

[9] Sivakumar S., Jagabar Sathik M., Manoj P.S., Sundararajan G. (2016) ***An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 58, May 2016, pp. 1475–1485

[10] Du Y., Bhat A. K. S. (2016) ***Power Converter Schemes for Small Scale Wind Energy Conversion Systems - Review, a Systematic Classification Based on Isolation Transformer and Generator Side Rectifier,*** 2016 Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), Ghaziabad, 2016, pp. 338-344
[11] **IEC-60034-4:2008, *"Rotating electrical machines - Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests"***
[12] Abdessemed R. (2011) ***Modélisation et simulation des machines électriques***, Ellipses Marketing, 2011
[13] Biró K. Á., Szabó L., Iancu V., Hedesiu H.C., Barz V. (2001) ***On the Synchronous Machine Parameter Identification***, Workshop on Electrical Machines' Parameters, Technical University of Cluj-Napoca, 26 May 2001
[14] Orlando N. A., Liserre M., Monopoli V. G., Mastromauro R. A., Dell'Aquila A. (2008) ***Comparison of power converter topologies for permanent magnet small wind turbine system***, 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 2008, pp. 2359-2364.
[15] Kortabarria I., Ibarra E., Martínez de Alegría I., Andreu J., Ascarza A. (2010) ***Power Converters Used in Grid Connected Small Wind Turbines: Analisys of Alternatives***, 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)
[16] Lazarov V. ***Theoretical and practical problems of the modeling of wind-power generators***, E+E, 11-12, 2012, pp.53-61

Автори: Захари Зарков, доцент, д-р, кат. „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; Иван Бачев, докторант, кат. „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *iv.bachev@tu-sofia.bg*; Борис Демирков, докторант, кат. „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *demirkov@tu-sofia.bg*; Владимир Лазаров, проф. д-р, кат. „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vl_lazarov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Пламен Ризов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА РАЗЛИЧНИ ДЕФЕКТИ ВЪРХУ ИЗХОДНИЯ СИГНАЛ НА ИМПУЛСЕН ВИХРОВОТОКОВ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ

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 [1]. Той се прилага успешно за: ранно откриване на зони със структурни неоднородности, където е възможно възникване на дефекти; откриване на много малки дефекти и оценяване на срока на експлоатация на детайлите; определяне на степента на износване на повърхностни защитни слоеве. Наличието на дефекти в контролираните изделия причинява преразпределение на вихровите токове, промяна на реакцията им върху възбудителното поле и изменение на сигнала на преобразувателя. Целта на работата е на базата на разработен модел в средата на Mag Net 7.4 да се изследва влиянието на различни дефекти върху изходния сигнал на импулсен вихровотоков преобразувател. Резултатите от проведеното изследване могат да намерят място в разработки в областта на безразрушителния контрол.*
Ключови думи: *МКЕ, ударно възбуждане, импулсен вихровотоков преобразувател*

INVESTIGATION OF DIFFERENT FAULTS INFLUENCE OVER OUTPUT SIGNAL FROM PULSED EDDY CURRENT TRANSDUCER

Kalinka Todorova

Abstract: *The results of applied output electromagnetic field due to interaction with electromagnetic field of eddy current that is made of the same output field in the investigation object are based on electromagnetic eddy current method. It is successfully applied to: early detection of areas with structural non-homogeneities where appearance of faults is possible, defending of very small defects and the details term exploitation has been evaluated, the degree of attrition of the surface protective layers is qualified. Redistribution of eddy currents is caused to the presence of defects in controlled items. Their changing reaction on force field and modification signal transducer is done. The aim of this work is to investigate the influence of different faults over output signal from pulsed eddy current transducer based on a model that is made in Mag Net 7.4. The results from this investigation can be applied in non-destructive testing.*
Key words: *FEM, shock excitation, pulse eddy current transducer*

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

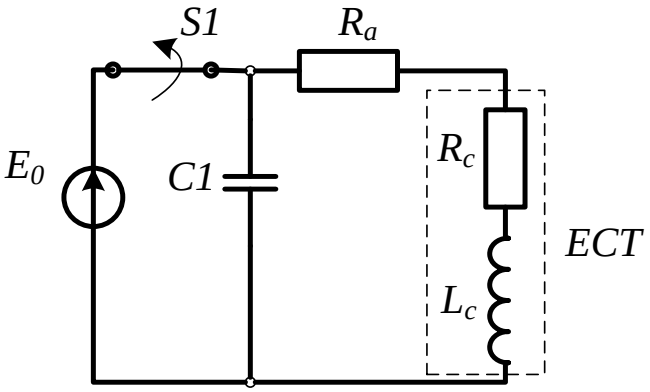
ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

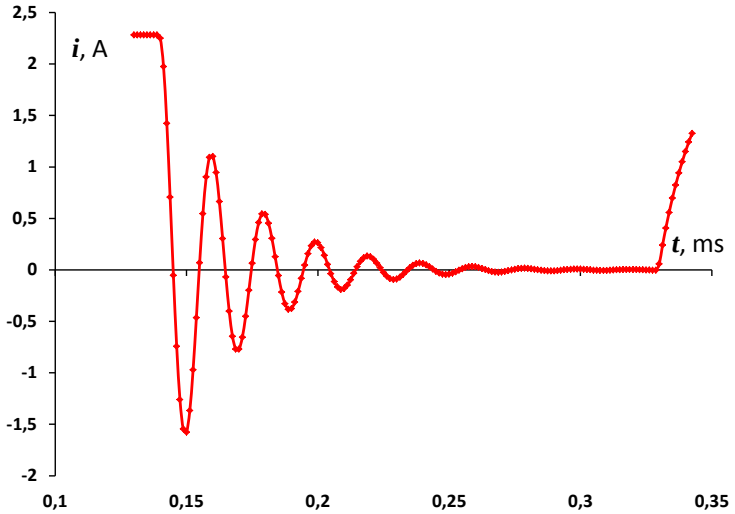
При монохроматичното синусоидално възбудително поле полезните сигнали на вихровотоковите преобразуватели имат две съставки – модул и фаза или реална и имагинерна съставка. Следователно могат да се контролират и измерват само два параметъра на обекта или един при отстраняване на смущаващото влияние на втория. Все по-често при използване на вихровотоковият метод за контрол се прилагат импулсни методи [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. При импулсните вихровотокови методи изходният сигнал е многомерен. Тези методи позволяват контрол и измерване на повече параметри, а също и намаляване на смущаващите въздействия. Изходният сигнал съдържа богата информация.

2. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Разглежда се параметричен вихровотоков преобразувател (ЕСТ) (фиг.1), който е включен в схема с ударно възбуждане (фиг. 1), и през него протича ток ***i*** (фиг. 2).



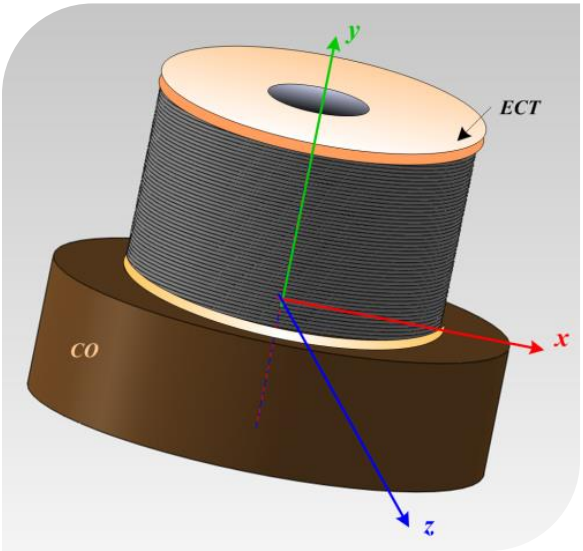
Фиг.1. Схема с ударно възбуждане.



Фиг.2. Графика *i(t)* на тока през ЕСТ.

В програмната среда MagNet е създаден модел [9], който се състои от контролиран обект (СО) и параметричен вихровотоков преобразувател (ЕСТ), разположен в близост над СО, съосно с него (фиг.3). СО е плътен хомогенен линеен проводящ цилиндър. Параметричният ЕСТ е цилиндрична намотка от меден

проводник. С така създадения модел се решава преходния процес в електрическата верига, като параметрите на ЕСТ се определят чрез метода с крайните елементи. За изходен сигнал на вихровотоковия преобразувател се използва напрежението $u_C(t)$ на изводите на кондензатора $C1$ в измервателната схема (фиг.1).



Фиг.3. Модел в програмната среда MagNet.

Данните за контролирания обект са дадени в табл.1, за вихровотоковия преобразувател – в табл.2, за измервателната електрическа верига с ударно възбуждане – в табл.3.

Таблица 1

Контролиран обект - **CO**	
Диаметър, mm	14
Височина, mm	4
Относителна магнитна проницаемост	1
Специфична електрическа проводимост, MS/m	1

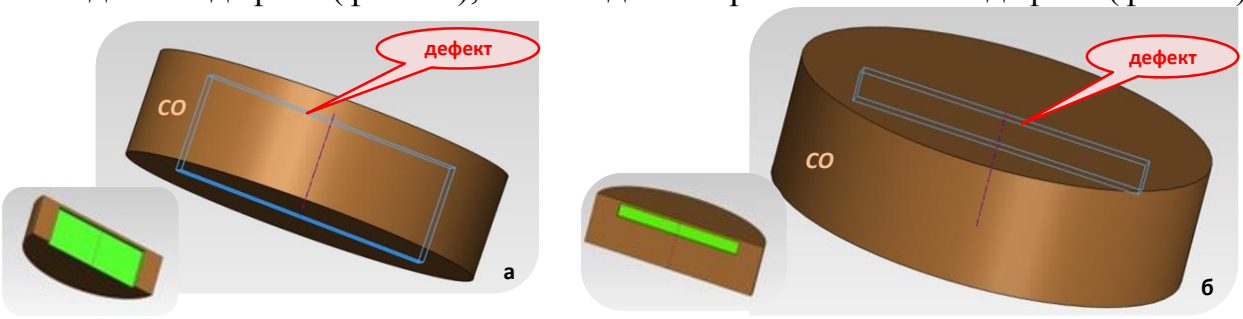
Таблица 2

Вихровотоков преобразувател - **ECT**	
Външен диаметър $\boldsymbol{r_o}$, mm	10
Вътрешен диаметър $\boldsymbol{r_i}$, mm	4
Височина, mm	6
Материал	Cu
Брой навивки	30
Разстояние до обекта, mm	0.2

Таблица 3

Верига с ударно възбуждане	
Кондензатор C, μF	3
Резистор R_a, Ω	0.2
t_{on}, ms	0.14
t_{off}, ms	0.19
E_0, V	0.5

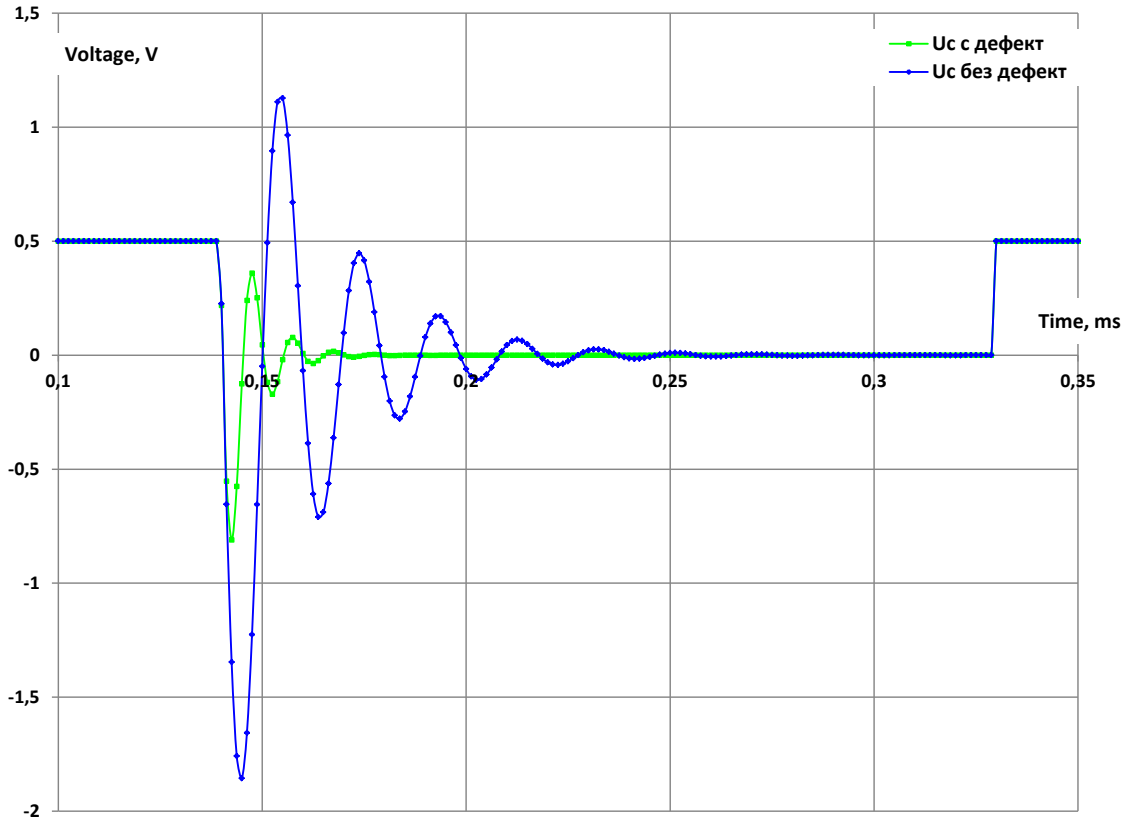
На фиг.4 са показани обекти с различни по вид дефекти – близък до повърхността дълбок дефект (фиг.4.а), близък до повърхността малък дефект (фиг.4.б).



Фиг.4. Различни дефекти в контролиран обект

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Проведени са числени експерименти с описания модел с контролиран обект без наличие на дефект и с наличие на дефект.



Фиг.5. Изходен сигнал на ЕСТ.

Изходният сигнал на вихровотоковия преобразувател при контрол на обект без дефект е показан на фиг.5 в син цвят. За сравнение на същата фигура е показан изходен сигнал и при контрол на обект с дефект (в зелен цвят). От фигурата се вижда, че при контрол на обект с дефект амплитудите (първи, втори пик) са значително по–малки (повече от два пъти) от тези при контрол на обект без дефект; времената за достигането им също значително се различават. Следователно може да се счита, че вихровотоковият преобразувател, включен в схема с ударно възбуждане, има значителна чувствителност при контрол на обекти с дефекти в структурата си.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От проведените числени експерименти и получените резултати може да се направят следните изводи:

- Импулсният вихровотоков контрол може успешно да се използва за откриване и характеризиране на дефекти. При използване на конвенционалните вихрови методи, за да се получи информация за дефекти в материалите, които могат да възникнат при различни дълбочини, трябва да установяват множество честоти на възбуждане. Импулсното възбуждане съдържа множество честоти, което е голямо предимство за получаване на информация от различни дълбочини.
- Като информационни параметри при контрол на обекти с вътрешни дефекти могат да се използват:
  - амплитудата на първия пик, на втория пик;
  - времената за достигането им;
  - средните стойности на обвивните криви на положителните и отрицателни затихващи колебания;

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] Chady Tomasz, Paweł Frankowski, Multilayer Transducer for Impulse Eddy Current Testing, System, przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 8/2011, 236-238

[3] 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

[4] 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

[5] Qiao Joanna X., John P. Hansen, Ian Mayes, Automatic Differential Lift-Off Compensation (Ad-Loc) Method in Pulsed Eddy Current Inspecti, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China

[6] Menana Hocine, Mouloud Fe´liachi, Pulsed Excitation in Eddy Current Non-Destructive Testing of Conductive Materials, M. Smetana, T. Strapá_ová, L. Janoušek, Advances in Electrical and Electronic Engineering, 7-1-2, 2008, 326-329
[7] 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
[8] Murner Christine, John P. Hansen, Buried Corrosion Detection in Multi-Layer Airframe Structures Using Pulsed Eddy Current, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China
[9] www.infolytika.com

Автор: Калинка Тодорова доц. д-р инж., кат. "Обща електротехника" (ОЕ), Електротехнически Факултет, технически Университет - София, E-mail address: *ktodorova@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент:** доц. д-р Стефчо Гунински

ЧИСЛЕН ПОДХОД КЪМ НЕЛИНЕЙНИТЕ ПРОБЛЕМИ ПРИ СИНХРОННИТЕ МАШИНИ

Ганчо Божилов, Михо Михов

Резюме: *В работата е изследвано изменението на нелинейните индуктивни съпротивления от реакцията на котвата и влиянието им върху характеристиките на синхронните машини. За целта са използвани апроксимиращи зависимости на съпротивленията от насищането на магнитната система, което в общия случай води до числено решение на уравненията на характеристиките на синхронните машини.*
Ключови думи: *Електрически машини, синхронни машини, нелинейни индуктивни съпротивления, нелинейни характеристики*

NUMERICAL APPROACH TO THE NONLINEAR PROBLEMS BY SYNCHRONOUS MACHINES

Gantcho Bojilov and Miho Mihov

Abstarct: *In this paper a study the variation of the non-linear reactances of the armature reaction and this influence on the performances of the synchronous machines is made. For this purpose an approximate functions of the reactances by the saturation of the magnetic circuit and for computing the performances is use.*
Keywords: *Electrical machines, synchronous machines, non-linear reactances, non-linear performances*

1. УВОД

Известните от общата теория на електрическите машини уравнения на синхронните машини от всякакъв тип (явнополюсни, неявнополюсни или реактивни; генератори, двигатели, компенсатори), както и на режимите им на превъзбуждане или недовъзбуждане, съгласно теорията на двете реакции, са [1,2,3] :

$$\dot{E}_0 = \pm\dot{U} + (r_a + jx_\sigma)\,\dot{I} + jx_{aq}\,\dot{I}_q + jx_{ad}\,\dot{I}_d \qquad (1)$$

$$\dot{E}_0 = \dot{E}_\delta + jx_{aq}\,\dot{I}_q + jx_{ad}\,\dot{I}_d \qquad (2)$$

където $\dot{U}$ е фазното напрежение на машината, $\dot{E}_0$ - надлъжно е.д.н., съответстващо на възбудителния ток */Ив.Попов/*, $\dot{I}$ – статорният ток със съставките си по двете координатни оси $I_d = I\sin\psi$ и $I_q = I\cos\psi$, r_a и x_σ - активното и индуктивното съпротивление от разсейване на статорната намотка, x_{aq} и x_{ad} – съставките на реактанса на статора от реакцията на котвата по двете оси – напречната

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

q и надлъжната d.

Проблемът е в това, че прилагането на теорията на двете реакции е коректно при линейни системи без насищане на магнитопровода и без висши хармоници в кривите на тока и напрежението, тъй като се базира на разлагане на статорния ток и реакцията на тока на котвата на две компоненти и последващата го суперпозиция на величините. В действителност индуктивните съпротивления x_{aq} и x_{ad} не са постоянни величини, а функция на насищането на магнитната система на машината[1,2].

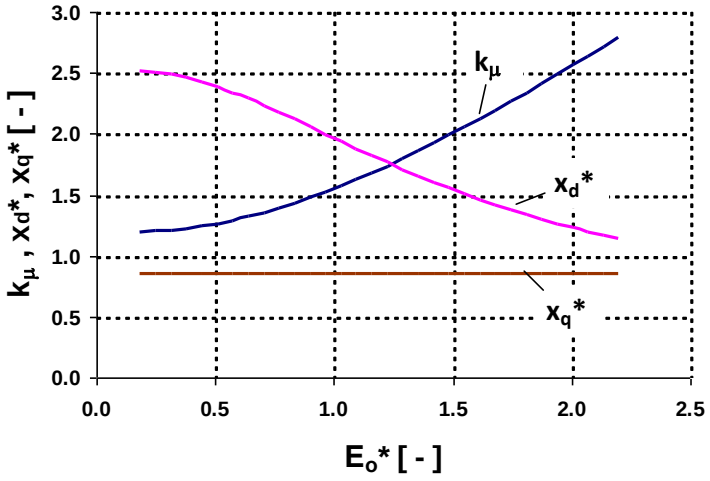
2. СЪЩНОСТ НА ПОДХОДА

Подходът е приложен за явнополюсна синхронна машина /СМ/ в генераторен режим със следните данни:

$$P_n = 500\,kW;\ U_n = 6.3\,kV;\ \cos\varphi_n = 0.8;$$

$$2p = 8;\ r_a^* = 0.017;\ x_\sigma^* = 0.103;\ x_{ad}^* = 1.171;\ x_{aq}^* = 0.747.$$

От предварителните изследвания на магнитната верига на синхронната машина и след съответни преобразувания [1,2,3] е получена зависимостта между коефициента на насищане k_μ и е.д.н. E_0 - $k_\mu = f(E_0)$ или в относителни единици - $k_\mu = f(E_0^*) = f(i_f^*)$, т.к. $E_0^* = i_f^*$ - фиг.1.



Фиг.1.

Интерполационната зависимост на кривата $k_\mu = f(E_0^*)$ от фиг.1 е:

$$k_\mu = 1.0125 - 0.0115 i_f^* + 0.2766 i_f^{*2} - 0.0241 i_f^{*3} \qquad (3)$$

Забележки:

1/ Преминаването от физически измерителни единици към относителни и/или обратно става в съответствие с приетите правила представени в основните източници [1,2,3].

2/ Числовото съотношение на r_a^* с x_{ad}^* и x_{aq}^* позволява съпротивлението на котвената намотка да бъде традиционно пренебрегнато. Като се отчете високият к.п.д. на СМ е налице основание да бъдат пренебрегнати загубите в нея.

При тези предварителни допускания основната функционална характеристика на синхронната машина – ъгловата й характеристика – ще добие вида:

$$P_\delta = \frac{m E_0 U}{x_{d\mu}} \sin\theta + \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_{q\mu}} - \frac{1}{x_{d\mu}}\right)\sin 2\theta \qquad (4)$$

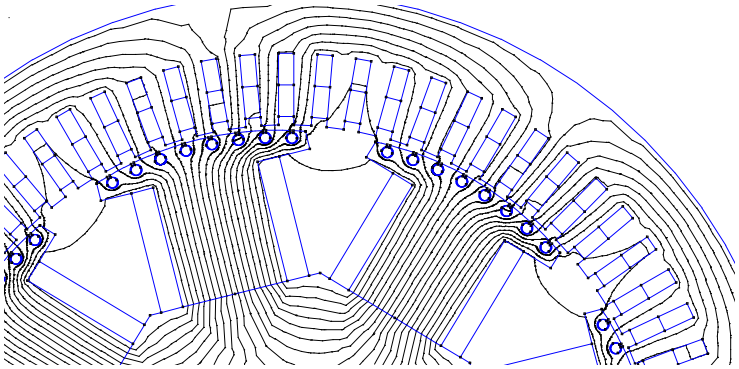
където, с отчитане на насищането:

$$x_{d\,\mu} = x_{ad\,\mu} + x_\sigma \,;\; x_{q\,\mu} = x_{aq\,\mu} + x_\sigma \qquad (5)$$

Стойностите на зависимите от насищането съставки са:

$$x_{ad\,\mu} = x_{ad\,nom}\frac{k_{\mu d\,nom}}{k_{\mu d}};\;\; x_{aq\,\mu} = x_{aq\,nom}\frac{k_{\mu q\,nom}}{k_{\mu q}} \qquad (6)$$

Основателно се приема [1,2,3,4], че при неявнополюсни машини тези съпротивления се изменят еднакво във функция на насищането на магнитната верига, докато при явнополюсни машини, в зависимост от конструкцията на ротора, може да се приеме $x_{ad} = f\left(k_\mu\right) = f_1\left(E_0\right)$ и $x_{aq\mu} = x_{aq} \approx const.$ - фиг.1.



Фиг.2.

За разглежданата машина е направен модел в средата на FEMM, фрагмент от изображението на решението на който е показан на фиг.2. Направени са изследвания в т.ч. и на изменението на магнитния поток Φ_q по напречната ос q в зависимост от котвения ток I - $\Phi_q = f\left(I\right)$, които потвърждават във висока степен основанието за горното допускане.

Изложеното до тук дава основание уравнение (4) да се представи във вида на трансцедентно уравнение /по отношение на ъгъла натоварване θ/ с нелинейни коефициенти :

Съвместното решаване на тази зависимост с някои от следващите в (7) води до получаване на система от трансцедентни уравнения с нелинейни коефициенти, която в общия случай се решава числено. Това води до определянето на предлагания подход като числен. Подобна организация на алгоритъма на решението вече е използвана в [5].

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{E_0 - U\cos\theta}{x_{d\mu}} = I\sin\Psi \\ I_q &= \frac{U\sin\theta}{x_q} = I\cos\Psi \\ I &= \sqrt{{I_d}^2 + {I_q}^2} \\ P &= mU\,I\cos\varphi \\ \varphi &= \Psi \pm \theta \end{aligned} \qquad (7)$$

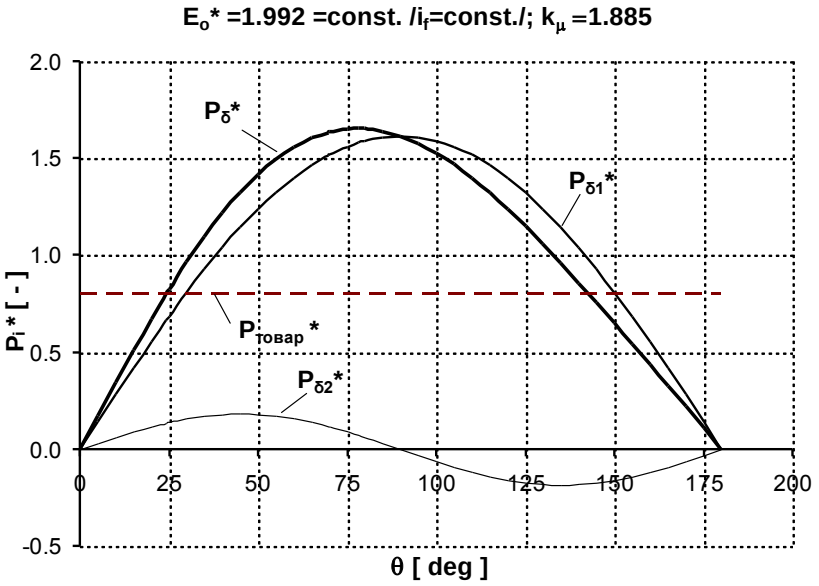
В случай, че се работи в относителни единици, може да се използват следните

зависимости:

$$S^* = I^*; P^* = P_\delta^* = I_a^* \cos\varphi; Q^* = I_r^* = I^* \sin\varphi$$
$$U_n^* = 1; S_n^* = 1; P_n^* = \cos\varphi_n; Q_n^* = \sin\varphi_n$$
$$tg\,\psi = tg\,\varphi + \frac{x_q^*\, I^*}{\cos\varphi} \qquad (8)$$
$$I^* = \frac{E_0^* - \cos\theta}{x_{d\mu}^* \sin\psi} = \frac{\sin\theta}{x_q^* \cos\psi}$$
$$P_\delta^* = \frac{E_0^*}{x_{d\mu}^*}\sin\theta + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_{d\mu}^*}\right)\sin 2\theta$$

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗЧИСЛЕНИЯТА

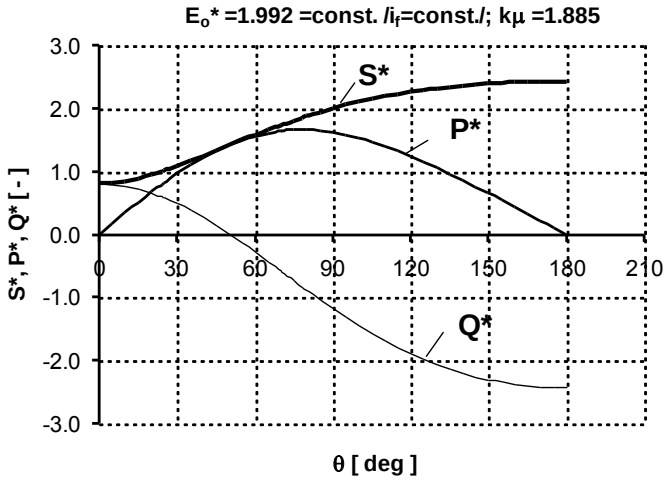
Решението (числено) на системата уравнения получена от (8) при номиналните данни на машината с отчитане на насищането дава следните стойности на параметрите й: $E_0^* = 1.992;\ k_\mu = 1.885;\ x_{d\mu}^* = 1.234;\ x_q^* = 0.850;\ \theta_n = 24.26^0$.



Фиг.3.

По (8) са построени ъгловите характеристики на СМ, в случая – в генераторен режим - фиг.3.

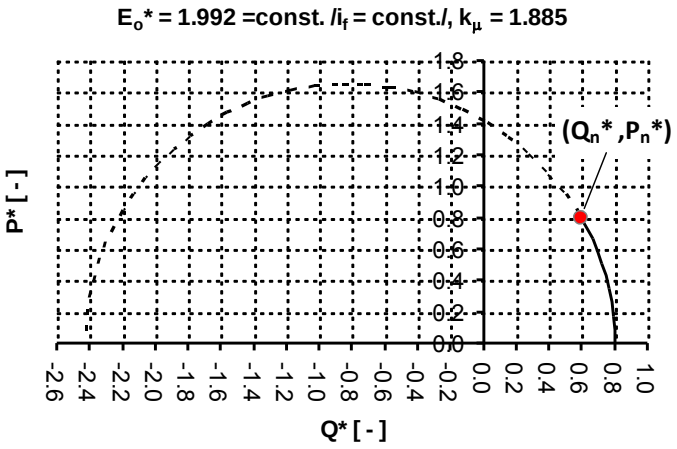
На фиг.4 е показан характера на изменение на активната P^*, реактивната Q^*, и пълната S^* мощности на СМ в зависимост от ъгъла на натоварване в режим на генератор - $0 \le \theta \le 180^0$. От практическо значение, ако няма други ограничения, е интервалът $0 \le \theta \le \theta_{P\delta\max}$. /Ъгъл $\theta_{P\delta\max} = 78.03^0$ се получава в хода на изчислителния процес [1,2,5]./ Предвид направените допускания характерът на изменение на активната мощност еднозначно съответства на характера на изменение на електромагнитната мощност - фиг.3.



Фиг.4.

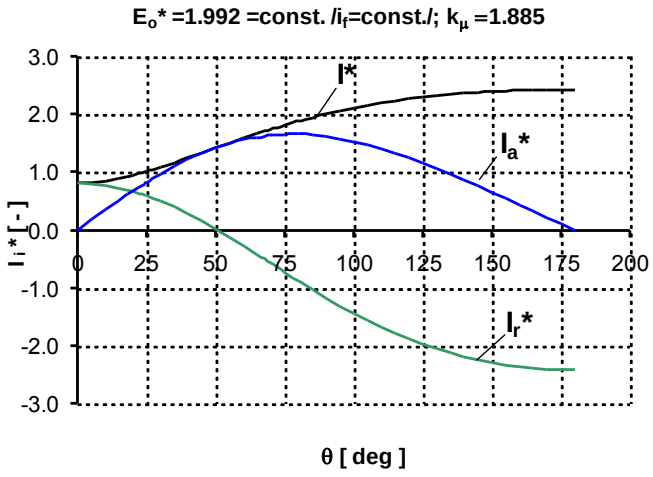
При необходимост, с получените стойности за мощностите може да се построи десния клон на $P^* - Q^*$ диаграмата на СМ [5] - фиг.5. На диаграмата е отбелязана точката на номиналния режим на работа с координати (8).

$$P_n^* = \cos\varphi_n = 0.8;\ \ Q_n^* = \sin\varphi_n = 0.6$$



Фиг.5.

От фиг.6 се вижда закономерното съответствие в характера на изменение на общия ток I^*, активната съставка I_a^*, реактивната I_r^* със съответните съставки на мощността - фиг.4.

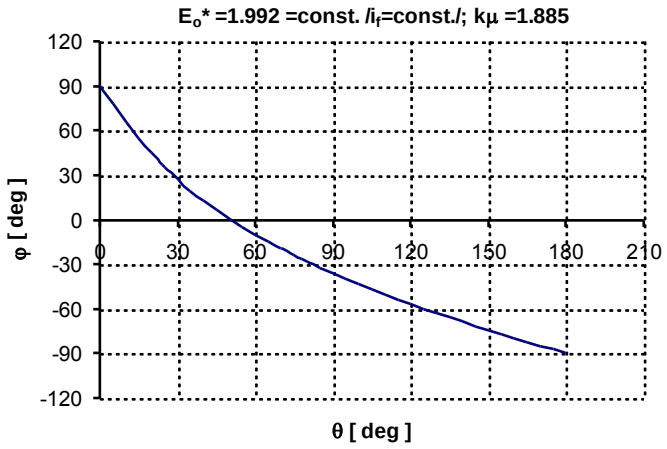


Фиг.6.

Горното съответствие се илюстрира и от характера на изменение на ъгъл φ в разглеждания интервал – фиг.7. Например, там където

$$\varphi = 0; I_a^* = I^* \cos\varphi = I^*; I_r^* = I^* \sin\varphi = 0.$$

Реактивната съставка $I_r^* = I^* \sin\varphi$ има локални максимуми при $\theta = 0; \theta = 180^0$, където $\varphi = \pm 90^0$.

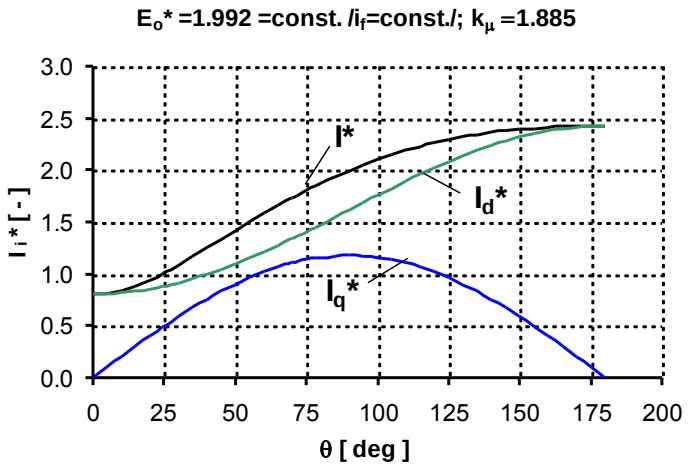


Фиг.7.

На фиг.8 е показан характера на изменение на общия ток I^* и съставките I_d^* и I_q^*. Изследванията потвърдиха, че функцията на тока I_q^* е нечетна по отношение на оста $\theta = 180^0$, докато тези на I^* и I_d^* са четни по отношение на същата ос. Впрочем, аналогични свойства имат и функциите на токовете I_a^* и I_r^* - фиг.6.

Стойността на амплитудата на реактивния момент на машината определена по предложения подход е $M_{\delta 2MAX} = \frac{mU^2}{2\Omega_1}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_{d\mu}}\right) = 1457$ Nm. С помощта на посочения по-горе модел в средата на FEMM е направено изследване за същата амплитуда на реактивния момент на синхронната машина с оглед съпоставянето им, като е определена числената зависимост $M_{\delta 2} = f(\theta), I = I\left(M_{\delta 2MAX}\right) = const.$

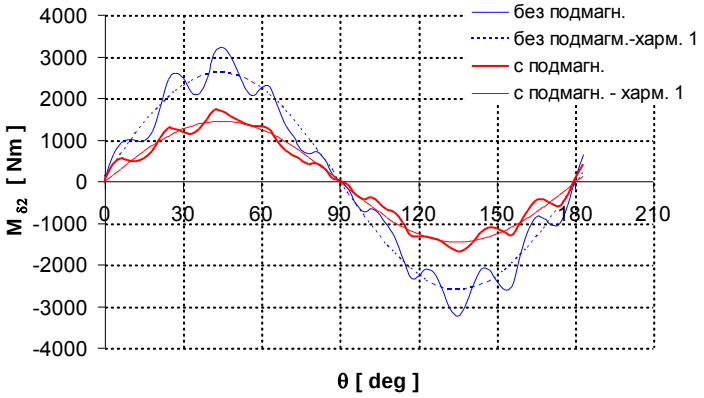
Забележка: поради ограниченото място за настоящата публикация, моделът ще бъде разгледан по-подробно в друга разработка.



Фиг.8.

На фиг.9 са показани резултатите за посочената по-горе зависимост при котвен

ток съответстващ на тока при максимален реактивен момент $/\theta = 45^0/$. Ток във възбудителната намотка няма.



Фиг.9.

Направено е изследване в случаите:

-„Без подмагнитване”, при което магнитната верига и в частност полюсните тела имат „естествената си” намагнитваща крива. Полето е създадено само от котвената намотка и има индукция в полюсното тяло /без накрайника/ $B_{cp} = 1.30 - 1.35T \rightarrow \mu_r \approx 900$. Амплитудата на първия хармоник на реактивния момент е $M_{\delta 2MAX} = 2508\,Nm$ - фиг.9, което твърде много се разминава с посочената по-горе стойност.

- „С подмагнитване”, при което на полюсните тела е зададена линейна магнитна характеристика с $\mu_r = 108.30 = \text{const}$. Тази стойност е определена предварително при празен ход и възбудителен ток при номинален режим - тогава $B_{cp} = 1.822T$ Амплитудата на първия хармоник на реактивния момент в този случай е $M_{\delta 2MAX\,(FEMM)} = 1440\,Nm$ - фиг.9. Очевидно, съвпадението на резултатите е повече от удовлетворително.

ИЗВОДИ

Представеният подход повишава прецизността на резултатите при изследване на функционалните характеристики на СМ - явнополюсни и неявнополюсни. При това, той може да се включи безпроблемно в разработените алгоритми [5] за построяване на $P^* - Q^*$ диаграмите им.

Получените резултати поощряват по-нататъшната работа за създаване на модел обединяващ елементи от традиционния подход при изследването на СМ с възможностите за моделиране във FEMM .

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ангелов, А., Д. Димитров. Електрически машини , С., Техника, ч. II, 1988.

[2] Костенко М., Л. Пиотровский. Электрические машины, М., Энергия, ч. II, 1965.

[3] Копилов, И. Проектирование электрических машин. М., Энергия, 1980.

[4] Seguier, G., F. Notelet. Electrotechnique industruelle, Paris, Lavoisier, 1994.
[5] Михов М., Д. Сотиров, П. Ризов, В.Господинов, Ст. Баташки, Числен подход за построяване на P-Q диаграми на явнополюсни синхронни генератори, Годишник на Техническия Университет – София, т. 57 книга 1, 2007 г.

Автори: Ганчо Й. Божилов, проф. дтн, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *gjboj@tu-sofia.bg*; Михо П. Михов, доц. д-р, катедра „Електрически машини”, Електро-технически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mpmi@tu-sofia.bg* .

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. д-р Емил Соколов

КОНСТРУКТИВНИ РЕШЕНИЯ ЗА ОТСЛАБВАНЕ НА ПОЛЕТО НА СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Георги Тодоров, Божидар Стоев

Резюме: *В настоящата работа е извършен сравнителен анализ на възможностите за отслабване на полето на две роторни конструкции на СДПМ с вътрешно разположени магнити. Чрез анализ по МКЕ е илюстрирано е влиянието на ширината на феромагнитните мостчета върху отслабването на полето на разгледаните конструкции. Разгледано е влиянието на сегментирането на магнитите и ширината на сегментиращия мост върху отслабването на полето.*
Ключови думи: *отслабване на полето, СДПМ, МКЕ*

ROTOR DESIGN SOLUTIONS FOR FIELD-WEAKENING OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINES

George Todorov, Bozhidar Stoev

Abstract: *The work presents a comparative analysis on field-weakening capabilities of two design solutions of an interior-type PMSM. The effect of ferromagnetic bridge width on the field-weakening is studied and illustrated by using FEA. The influence of segmentation of the magnets per pole and width of the segmenting ferromagnetic bridge on the field-weakening is also analyzed and presented.*
Keywords: *field-weakening, PMSM, FEA*

1. INTRODUCTION

The recent advancement in the field of high energy permanent magnet materials and power electronics has greatly broadened the field of application for Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSM). It has been adopted for many high performance applications such as robotics, aerospace, power tools, generation with renewable energy source, various medical equipment and electric/hybrid vehicles etc. Because of its advantages, the PMSMs are preferred over other traditional machines especially for highly efficient servo and variable speed drive applications. The PM synchronous machines are built with a number of rotor configurations. Among them, interior and surface magnet rotors are the two most commonly used configurations. In the interior magnet structure, magnet poles are buried inside the rotor core where as in the surface magnet rotor, the magnet poles are glued to the rotor surface.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

In the surface magnet rotor, magnet poles are also part of the air-gap and since, the permeability of the rare-earth magnet is close to air, the effective air-gap of the machine becomes relatively large. As there is not possible to control the magnetic field of the PM, like we can do for electromagnetically excited synchronous machines, the field-weakening operation in PMSM is achieved by influence of external magnetic field. A negative magnetic field is needed for lowering the field the permanent magnets. In PMSM this field is the direct axis armature reaction created by a negative direct axis current. In the Surface Permanent Magnet (SPM) machine with distributed stator winding the effect of negative armature reaction during flux-weakening is marginal and requires high values of negative current because of the large air-gap. The air-gap of the interior permanent magnet (IPM) rotor is small compared to SPM machines and hence, the air-gap flux can be weakened effectively by negative armature reaction [1]. As a result, the interior magnet structure is preferred over surface magnet structure in many applications, especially, where the machine needs to operate above base speed with constant power.

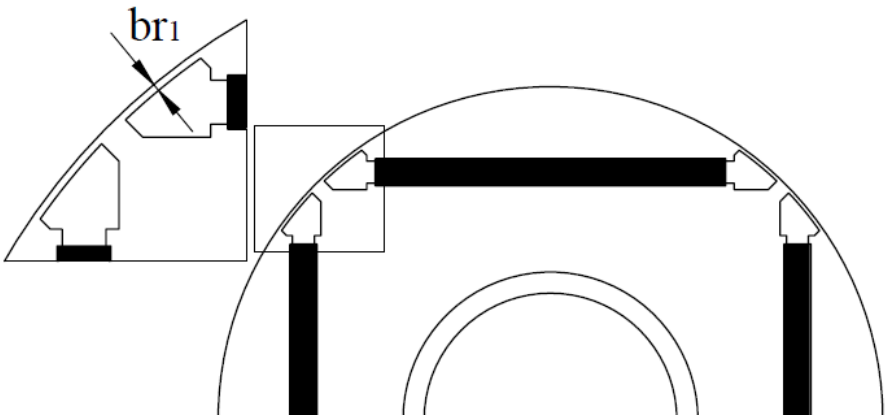
Although the field-weakening operation of IPM machines is eased, in some applications the needed negative direct axis current may reach high values in order to decrease the air-gap flux. These values may exceed the current limit of the controlling inverter and reduce the rotating speed range of the drive. One solution is to use expensive inverters with higher current limit but this will rise the overall drive cost. A solution proposed in [2] is to utilize the ferromagnetic bridges on the side of the magnets. In [3] a novel IPM rotor construction is presented, in which the permanent magnets per pole are split into several segments with ferromagnetic bridges between them. As stated in [3], this enhances the field-weakening operation and lowers the value of the needed demagnetizing current for achieving high operational speeds.

The main scope of this work is to analyze and show the effect of ferromagnetic bridges widths and segmentation of the magnets on the field-weakening. The effect of the negative armature reaction on the air-gap flux is illustrated for two IPM rotor configurations using Finite Element Analysis (FEA).

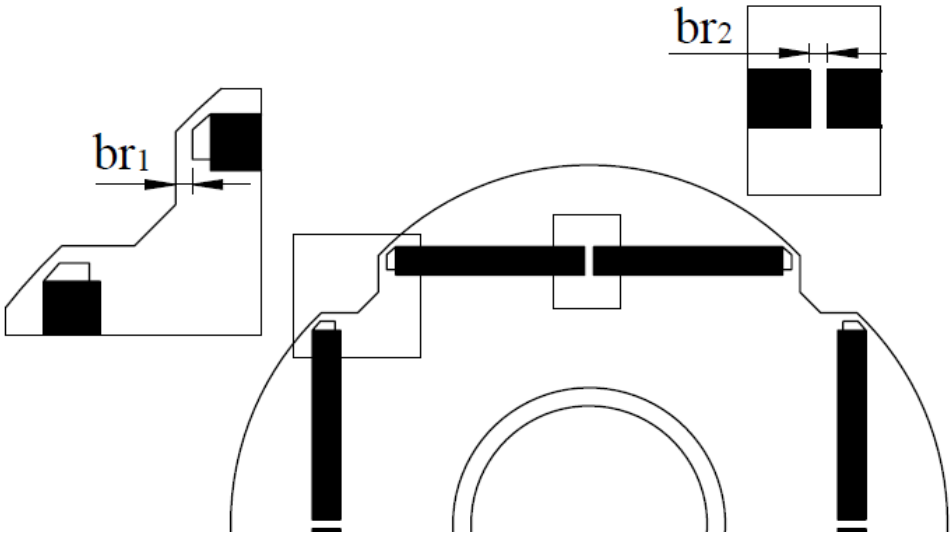
2. ROTOR CONFIGURATIONS

The machine under analysis is a four-pole PMSM with three-phase distributed stator winding. Two interior permanent magnet rotor configurations for this motor are analyzed. The permanent magnets are radially magnetized, of same type and volume for both configurations.

The design of rotor configuration shown in Fig.1a is in one piece permanent magnet per pole and uniform circumferential air-gap. Second rotor configuration shown in Fig.1b is with segmented permanent magnet and non-uniform air-gap – minimum along the direct axis and 1,5 times bigger at the end of pole. There is a cutting of the lamination along the quadrature axis of the rotor, which makes an additional increase of the air-gap and forms the ferromagnetic bridge like it is shown in Fig.1b.



(a) In one piece PM rotor configuration



(b) Segmented IPM rotor configuration

Figure 1. Rotor configurations.

The ferromagnetic bridges are depicted in Fig.1 as **br1** and **br2** respectively. The initial (original) width of **br1** for the design in Fig.1a is *0.4 mm* , and for the design in Fig.1b - **br1**=*0.86 mm* , **br2**=*1 mm*

3. PERMANENT MAGNET OPERATING POINT AND AIR-GAP FLUX

To calculate the air-gap flux, models of the examined PMSM are built and Finite Element Analysis (FEA) is performed. The direct axis is aligned with phase A magnetic axis. FEA is performed without stator current to calculate the air-gap flux from the permanent magnets only.

The air-gap flux is calculated by determining the equivalent m.m.f. of the magnetic circuit per pole and the permanent magnet operating point. The magnetic circuit is divided into several sections and the m.m.f. is determined for each section, based on the flux density values obtained from FEA, the B-H curve of the used steel and the geometry of the models. The equivalent m.m.f. is calculated as:

$$\sum F = F_{\delta} + F_{z1} + F_{p} + \frac{1}{2}(F_{a1} + F_{a2}) + 2F_{gap} \qquad (1)$$

where, F_δ is the m.m.f. of the main air-gap, F_{z1} is the m.m.f. of stator teeth, F_p is the m.m.f. of the pole shoe, F_{a1} and F_{a2} are the m.m.f. of the stator and rotor yoke respectively and F_{gap} is the m.m.f. of the mechanical air-gaps between the permanent magnet and the rotor lamination [4].

After the equivalent m.m.f. is calculated, the permanent magnet operating point is determined. The graphical depiction of the permanent magnet operating point is illustrated in Fig.2.

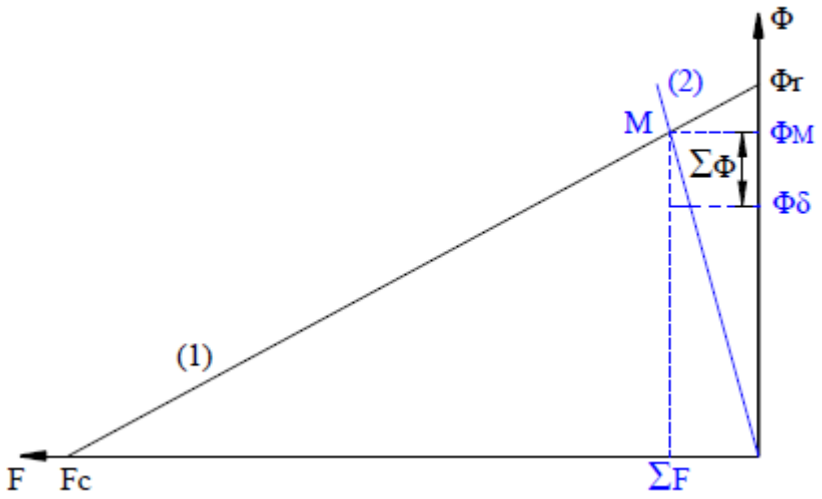


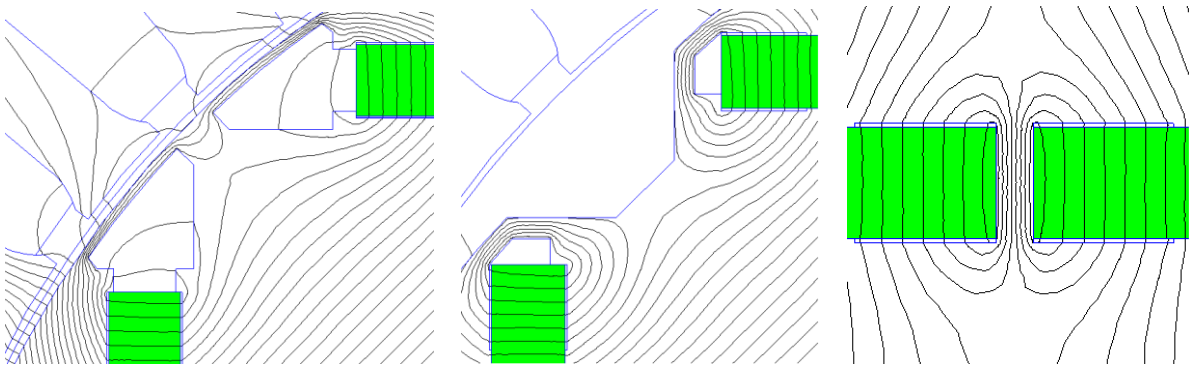
Figure 2. Operating point and air-gap flux without armature current.

In order to determine permanent magnet flux, corresponding to the magnet operating point, the demagnetizing characteristic - line (1) in Fig. 2, is transformed from B_r - H_C to Φ_r - F_C coordinates, based on the magnet size and placement in the rotor [4, 5]:

$$\Phi_r = B_r . w_m . l_m \quad (2)$$

$$F_C = 2 . H_C . h_m \quad (3)$$

where, B_r is the residual flux density, H_C is the coercive intensity and w_m, h_m, and l_m are the width, height and axial length of the magnets. The air-gap flux is calculated by (4), taking into account the flux leakage in the ferromagnetic bridges [5]. The flux leakage distribution for both rotor constructions is shown in Fig.3.



(a) *(b)* *(c)*

Figure 3. Ferromagnetic bridges flux leakage.

$$\Phi_\delta = \Phi_M - \sum \Phi = \left[\frac{\Phi_r}{F_C}.\left(F_C - \sum F\right)\right] - \sum \Phi \qquad (4)$$

where, Φ_δ is the air-gap flux, Φ_M is the flux corresponding to the magnet operating point and $\sum \Phi$ is the sum of the leakage flux in the bridges.

After the air-gap flux due to the permanent magnets is determined, FEA is performed with energized armature winding. Three-phase stator current is assigned to the respective phases, with the peak value assigned to phase A, so that the resultant armature reaction is negative along the direct axis. The negative armature reaction affects the permanent magnet operating point and tends to move it down the demagnetizing line, lowering the overall value of air-gap flux.

The armature reaction is taken into account by translating line (2) in Fig.4 to the left, on a distance corresponding to the armature reaction m.m.f. F_{ad} [5, 6]. The new operating point is P with m.m.f. F_P and air-gap flux is

$$\Phi_\delta = \Phi_P - \sum \Phi = \left[\frac{\Phi_r}{F_C}.(F_C - F_P)\right] - \sum \Phi \qquad (5)$$

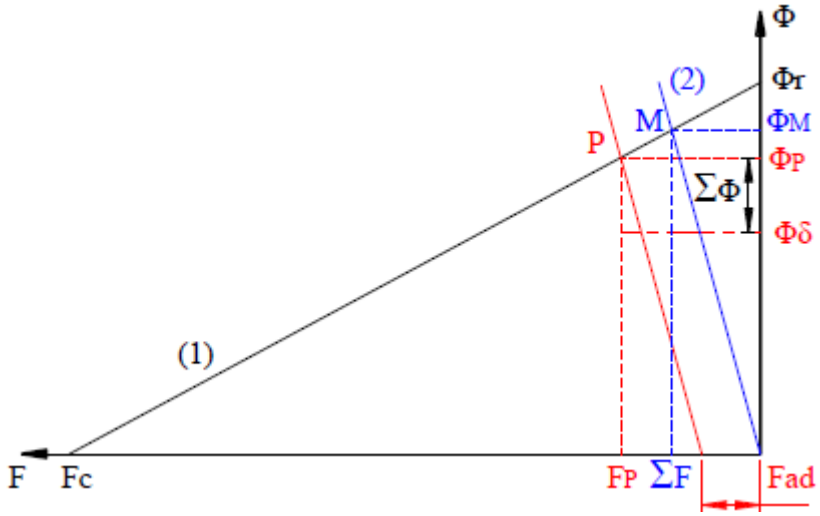


Figure 4. Operating point and air-gap flux with negative armature reaction

4. EFFECT OF SIDE FERROMAGNETIC BRIDGE WIDTH ON THE FIELD-WEAKENING

Following the procedure described in Section 3 the effect of the side bridges width (size **br1**) on the field-weakening capabilities of both PMSM is examined. The values of the width used in the analysis are: *0.4 mm*, *0.6 mm*, *0.86 mm*, *1 mm*, *1.2 mm*, and the size of the middle bridge of the segmented IPM rotor (**br2** in Fig. 1b) kept constant at *1 mm*. The air-gap flux is calculated with negative armature current for the range from *1 A* to *4 A* with a step of *0.5 A* for each bridge width.

The obtained results clearly show that the segmented IPM rotor is more suitable for field-weakening operations than in one piece IPM configuration. With increasing the armature current the segmented IPM configuration shows much greater flux decrease and higher flux leakage than the conventional IPM rotor – Fig.5 and Fig.6. The main

reason for this is the presence of a middle ferromagnetic bridge of the segmented IPM rotor that provides an additional flux path. As a result a greater amount of permanent magnet flux closes through this additional flux path without passing the main air-gap. The rotor with permanent magnets in one piece has less paths for the leakage flux and this makes bigger part of the permanent magnet flux to pass the main air-gap, although the same negative armature reaction is opposing it.

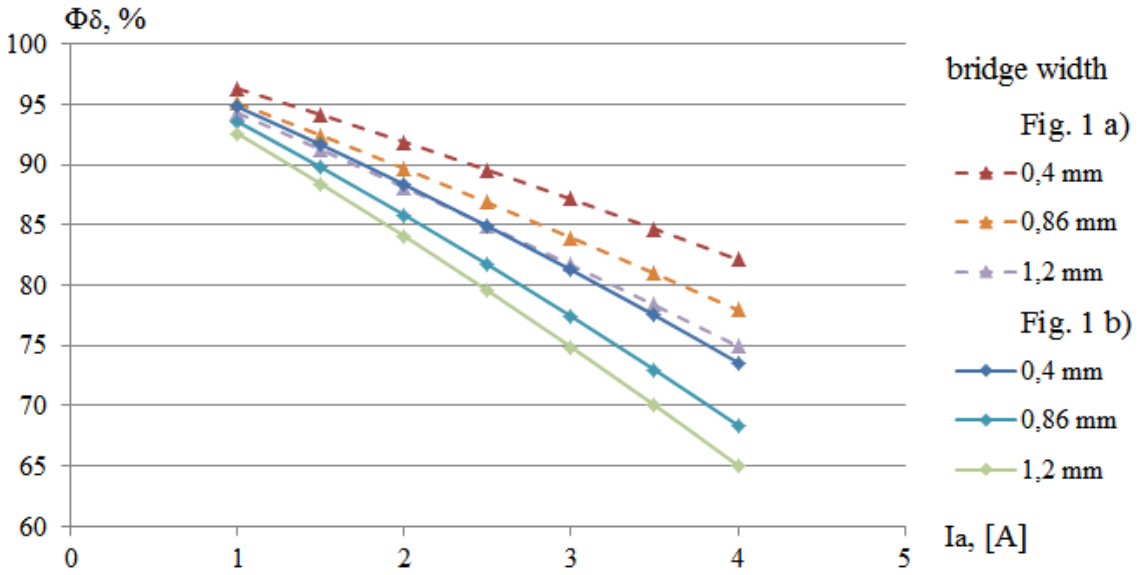


Figure 5. Air-gap flux decrease (in percentage) versus armature current.

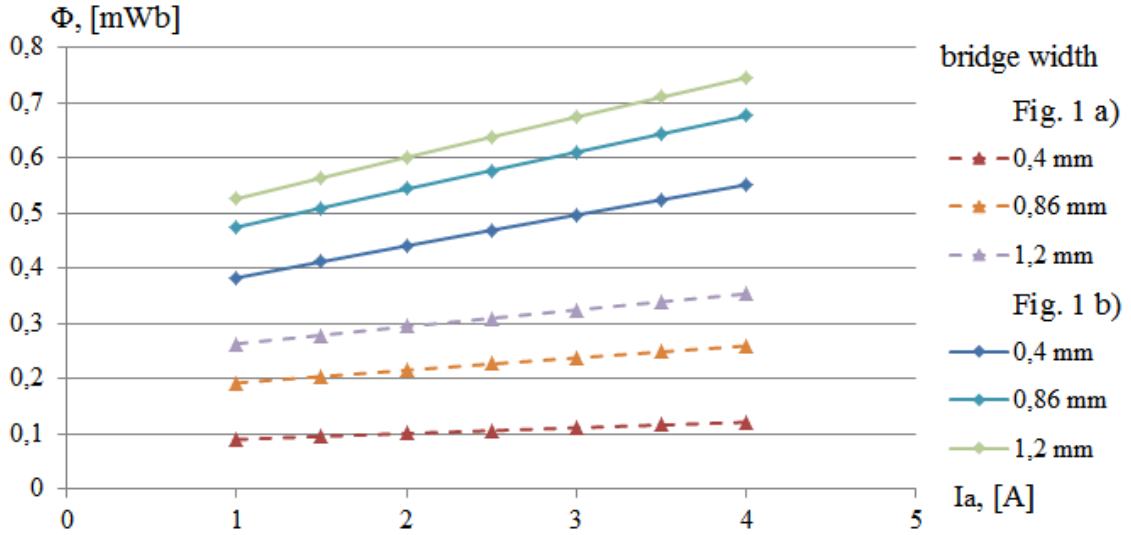


Figure 6. Bridge flux leakage versus armature current.

5. EFFECT OF MAGNET SEGMENTATION ON THE FIELD-WEAKENING

In this section the effect of the magnet segmentation in the rotor configuration shown in Fig.1b on the field-weakening is analyzed. The calculations of the air-gap flux and bridge flux leakage are performed for the following widths of the middle bridge (size **br2**): *0.5 mm*, *1 mm*, *1.5 mm* and *2 mm*. The width of the side bridges (size **br1** in Fig.1b) is kept constant at *0.86 mm*. Calculations are performed for the same range of

armature current following the procedure described in Section 3. The FEA obtained results are presented in Fig.7 and Fig.8.

Magnet segmentation with narrow bridge width shows slight effect on the field weakening. Reason for this is that a narrow middle bridge saturates heavily and its permeability becomes close to that of the permanent magnet material. Increase in the width of the bridge increases its permeability and results more permanent magnet flux to close through it without passing the main air-gap.

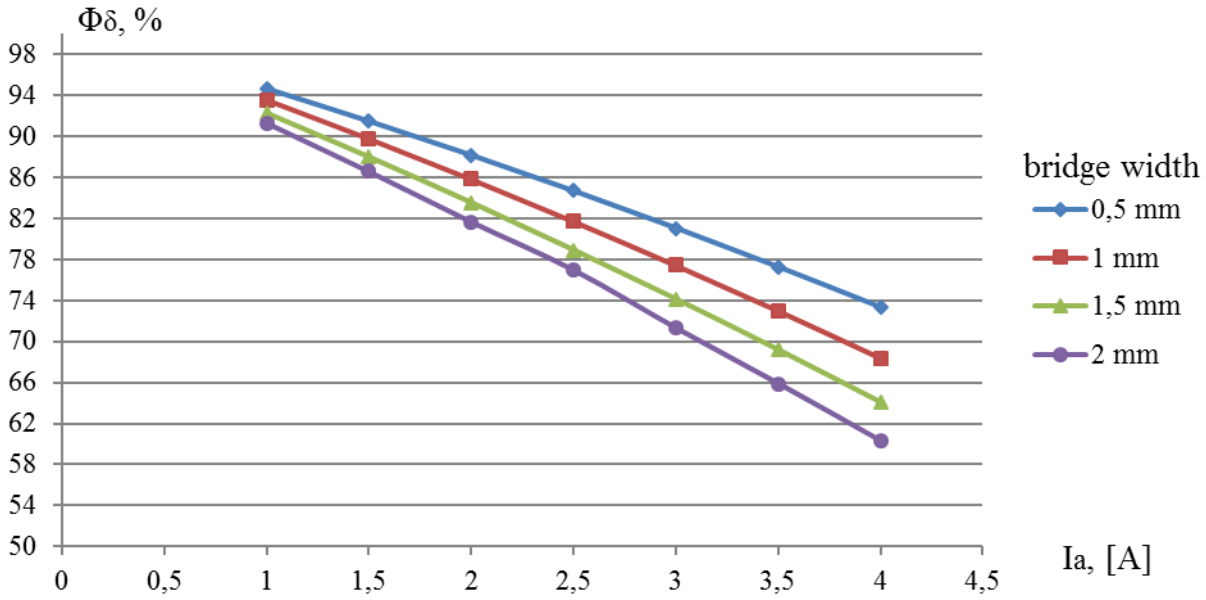


Figure 7. Air-gap flux decrease versus armature current.

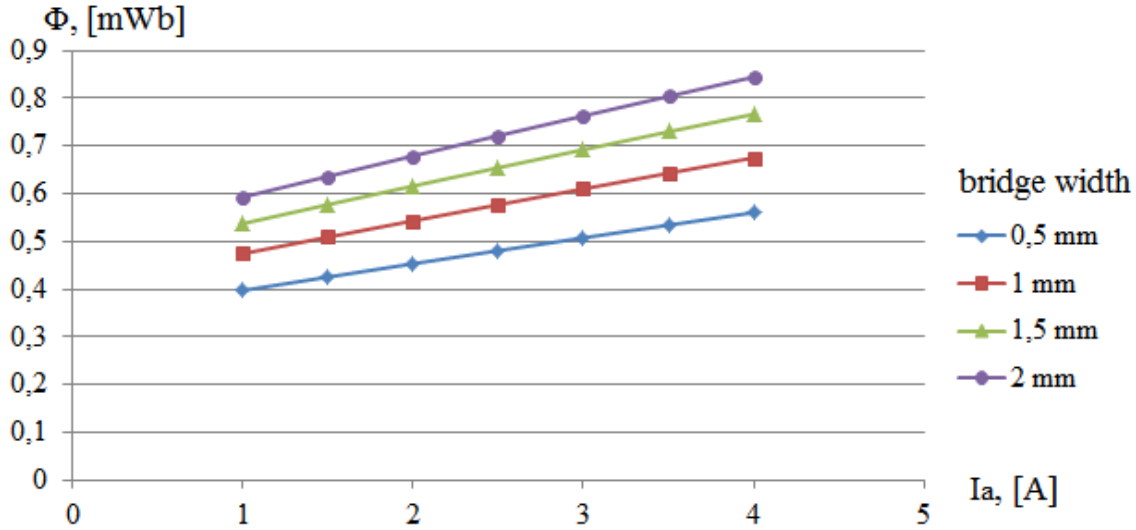


Figure 8. Bridge flux leakage versus armature current.

6. CONCLUSIONS

Effects of the ferromagnetic bride width and magnet segmentation on the field-weakening capabilities of IPM rotor configurations have been analyzed. The obtained results show that segmenting the permanent magnets with ferromagnetic bridges eases

the field-weakening operation. Segmenting the magnets with narrow bridges will not have much effect on the field-weakening, since the bridge will saturate heavily and become a large magnetic reluctance in the flux path. To enhance the flux-weakening capability of a PMSM a wider segmenting bridge or multiple bridges are needed.

It should be considered that a wider bridge leads to greater flux leakage. This will affect the other parameters and could worsen the overall performance of the machine. When designing a PMSM for wide speed range applications the width of the bridges and number of segments should be brought to the desired speed range and the effective usage of the machine volume. The ferromagnetic bridge size should be consistent with the expected requirements of the designed machine and the overall drive.

REFERENCES

[1] Chin Y., ***Permanent magnet synchronous motor for an electric vehicle – design analysis***, Universitetsservice US AB, Sweden, 2004, ISBN 91-7283-803-5

[2] Dutta R., M. F. Rahman, ***Design and analysis of an Interior Permanent Magnet (IPM) machine with very wide constant power operation range***, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, March 2008, 25-33

[3] Dutta R., M.F. Rahman, ***An investigation of a segmented rotor Interior Permanent Magnet (IPM) machine for field weakening***, The 5th International conference on Power Electronics and Drive systems (PEDS 2003), Singapore, Nov. 2003, 17-20

[4] Mi.C.C., ***Analytical design of permanent magnet traction-drive motors***, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, issue 7, July 2006, 1861-1866

[5] Mi, C. C., M. Filippa, ***Analytical method for predicting the air-gap flux of interior-type permanent magnet machines***, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, Jan. 2004, 50-58

[6] Gieras J. F. and Wing M., ***Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications***, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2002.

[7] Todorov G., B. Stoev. ***Saturation Effects on the Parameters of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Rotor Configuration***. Applied Electromagnetic Engineering for Advanced Materials from Macro- to Nanoscale. Materials Science Forum, DOI:10.4028, ISSN: 0255-5476, Vol. 856, 2016, pp 257-262, Trans Tech Publications, Switzerland

Authors: George Todorov, PhD, Associate Professor, Department of Electrical Machines, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *gtto@tu-sofia.bg*; Bozhidar Stoev, M.Eng., PhD student, Department of Electrical Machines, the Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *bdst@tu-sofia.bg*

Received 15 December 2016 **Reviewer:** Assoc. prof., PhD Miho Mihov

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИ НА СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ОТ ОПИТИ НА ПРАЗЕН ХОД И КЪСО СЪЕДИНЕНИЕ

Георги Тодоров, Божидар Стоев

Резюме: *В работата е представено определянето на електродвижещото напрежение и ненаситената стойност на надлъжната индуктивност на синхронни двигатели с постоянни магнити (СДПМ) от опити на празен ход и късо съединение. Експериментално снетите резултати са сравнени с аналитично определени стойности чрез анализ на разпределението на полето по МКЕ. Анализирани са особеностите при определяне на разгледаните параметри и съответствието между експериментално снетите и изчислените стойности.*
Ключови думи: *СДПМ, празен ход, късо съединение, МКЕ*

PARAMETER DETERMINATION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS FROM OPEN CIRCUIT AND SHORT CIRCUIT TESTS

George Todorov, Bozhidar Stoev

Abstract: *The paper presents the determination of the electromotive force and unsaturated value of the direct axis inductance of permanent magnet synchronous motors (PMSM), obtained from open circuit and short circuit tests. The results obtained by experiments are compared with ones obtained from Finite Element Analysis of the magnetic field distribution. The peculiarities and correspondence between the experimentally obtained data and calculated values are analysed and presented.*
Keywords: *PMSM, open circuit test, short circuit test, FEA*

1. INTRODUCTION

The advances in inverter drive technology and permanent magnet materials have enabled the application of permanent magnet synchronous machines (PMSMs) to several fields. The application of PMSM is rapidly spreading in recent years with the advantage of their high efficiency, power factor, power and torque density which are highly needed in many applications. Although the PMSM is a type of synchronous machine, some of the conventional methods for testing synchronous machines are not applicable to PMSM or have peculiarities due to the lack of possibility to control the field of the magnets.

The methods for testing PMSMs can be classified by the operating modes as standstill

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

modes, no-load and short circuit tests and load tests. By the scope the methods are classified for loss (or efficiency) assessment and for parameter estimation. Standstill tests are used only for parameter estimation, while the others may be used either for parameters or loss (efficiency) estimation [1]. The accuracy and range of the measured results depend on the available testing equipment also. The most commonly used testing sets for PMSM are described in [2]. The availability of measurements depending on the testing equipment is also depicted. Least equipment is required to conduct the open circuit and short circuit test, but the available results are limited to the electromotive force (or open circuit voltage) and the unsaturated value of direct axis inductance. These parameters do not describe the full operating performance of the tested machine, but give some important highlight for upcoming measurements and analysis.

2. EXPERIMENTAL SETUP

The machine under test is a four-pole PMSM with a symmetrical three-phase stator winding placed in 36 slots (Fig.1a) and rotor with radially magnetized NdFeB permanent magnets (Fig.2b). The experimental arrangement includes a DC motor used as a prime mover to run the PMSM as a generator.

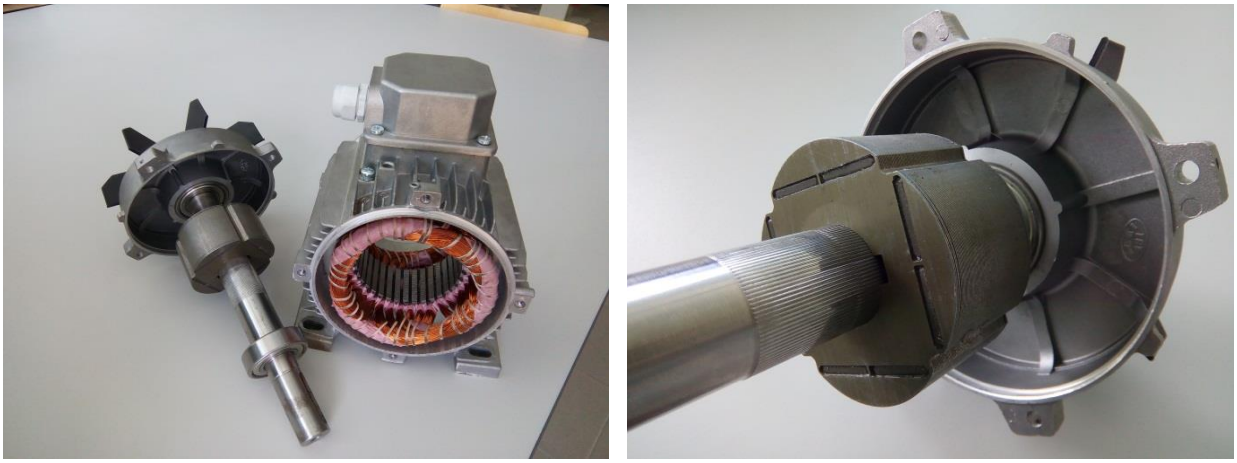


Figure 1. Tested machine – a) PMSM; b) Rotor construction.

3. Short circuit and open circuit tests

The constant permanent magnet field presents a problem in performing the conventional short circuit and open circuit tests [2]. The high value of the constant permanent magnet flux may lead to high values of short circuit current even at low rotational speed. To ensure that the short circuit current will not damage the stator winding during the test procedure, the short circuit test is conducted starting from low rotational speed and smoothly increasing it until a reasonable short circuit current is reached. The maximum speed is limited by the maximum safe current density in the stator winding. Starting from this highest speed the short circuit test is performed for several lower rotational speeds. Afterwards the open circuit test is conducted with the same rotational speeds (see Fig.8). Using the measured values of the short circuit current and electromotive force (open circuit voltage), the unsaturated value of the direct axis inductance is calculated by (1) for the set of rotational speeds [1, 2, 3].

$$L_d = \frac{U_{o.c}}{\omega . I_{s.c}} \tag{1}$$

where $U_{o.c}$ is the open circuit phase voltage, $I_{s.c}$ is the short circuit current and ω is the angular velocity. The results from measurements are depicted as line 1 in Fig.8.

4. FINITE ELEMENT ANALYSIS

4.1. ELECTROMOTIVE FORCE BY MEANS OF MAXIMUM PHASE FLUX LINKAGE

One of the commonly used approach for determining the electromotive force based on FEA is by the maximum flux linkage of one of the stator phase windings [4]. A model of the tested machine is built and FEA is performed. The axis of phase A is aligned with the direct axis of the PMSM and no current is assigned to the stator winding. The axis alignment and the distribution of the permanent magnets magnetic flux are shown in Fig.2.

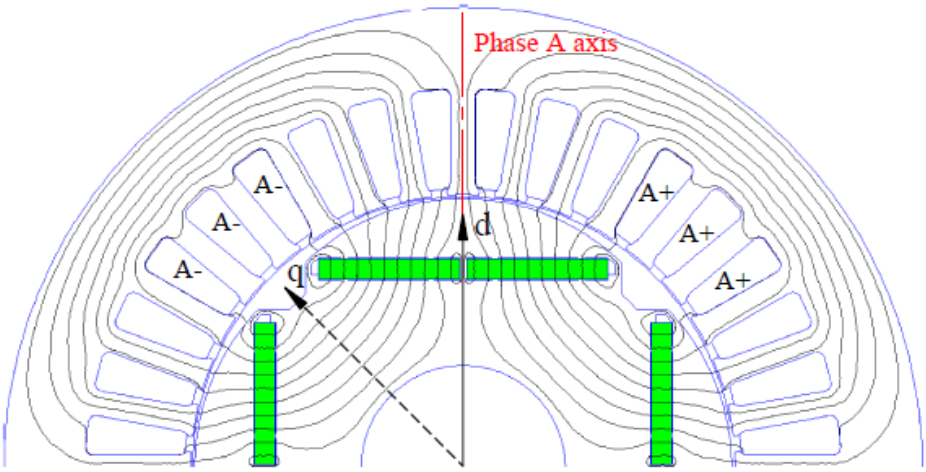


Figure 2. Magnetic axis alignment and PM flux distribution.

The coils of phase A link the maximum permanent magnet flux. The flux linkage is calculated by integrating the value of the magnetic vector potential over the slot cross section of the positive and negative sides of phase A coils [4, 5]:

$$\Psi_A = \Psi_{PM} = W_c . \sum \frac{l_m}{S_z} . \left(\int_{S_Z} A_+ . dS - \int_{S_Z} A_- . dS \right) \tag{3}$$

where, W_c is the number of turns per coil, l_m is the lamination stack length, S_z is the cross section of the stator slot and A is the value of the magnetic vector potential for the positive and negative sides of the coils respectively. The RMS value of the electromotive force (open circuit voltage) is calculated by:

$$E_{0\,rms} \approx U_{o.c} = \frac{\Psi_{PM} . \omega}{\sqrt{2}} \tag{4}$$

4.2. ELECTROMOTIVE FORCE BY MEANS OF PERMANENT MAGNET OPERATING POINT

Another approach to calculate the electromotive force is to determine the air-gap flux from the permanent magnet operating point. Using the results obtained from FEA, the

equivalent m.m.f. of the magnetic circuit per pole is determined. Based on the values of the flux density obtained from FEA (Fig.3), the B-H curve of the used electrical steel and the geometry of the tested machine, the equivalent m.m.f. is calculated.

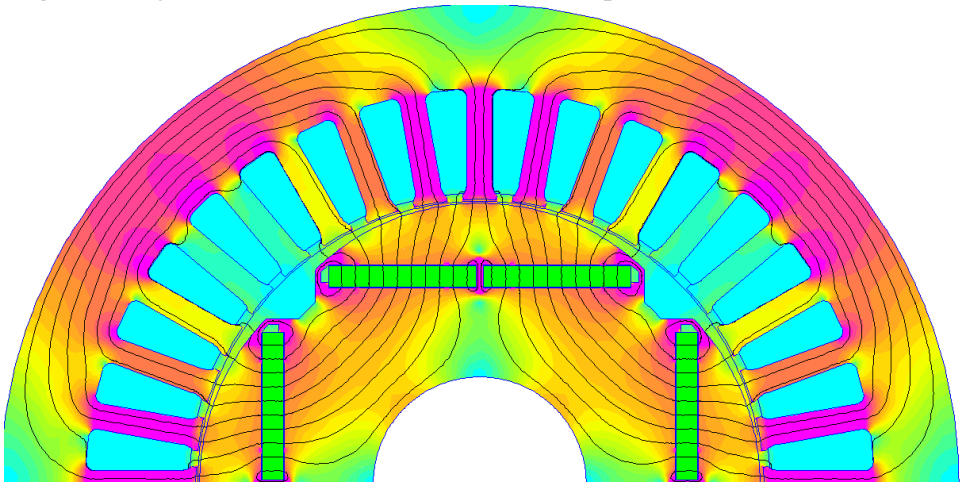


Figure 3. Flux density distribution.

$$\sum F = F_\delta + F_{z1} + F_p + \frac{1}{2}(F_{a1} + F_{a2}) + 2F_{gap} \quad (5)$$

where, F_δ is the m.m.f. of the air-gap between stator and rotor, F_{z1} is the m.m.f. of stator teeth, F_p is the m.m.f. of the pole shoe, F_{a1} and F_{a2} are the m.m.f. of the stator and rotor yoke respectively and F_{gap} is the m.m.f. of the mechanical air-gaps between the permanent magnet and the rotor lamination. When calculating the m.m.f. of the main air-gap F_δ, the peak value of the first spatial harmonic of the air-gap flux density distribution is used – Fig.4.

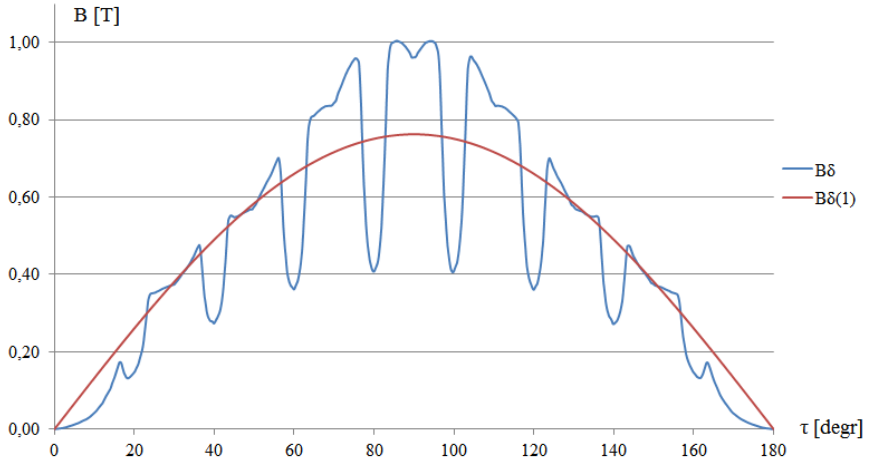


Figure 4. Air-gap flux density distribution.

In order to determine the permanent magnet operating point, the demagnetizing characteristic of the magnets is transformed from B_r - H_C to Φ_r - F_C coordinates. Based on the permanent magnet placement in the rotor and their dimensions, the residual flux Φ_r and coercive m.m.f. F_C are calculated from (6) and (7) [6].

$$\Phi_r = B_r . w_m . l_m \quad (6)$$

$$F_C = 2 . H_C . h_m \quad (7)$$

where, B_r is the residual flux density of the magnets, H_C is the coercive intensity and w_m, h_m, and l_m are the width, height and axial length of the magnets. The graphical depiction of permanent magnet operating point is illustrated in Fig.5.

To calculate the air-gap flux, the leakage flux in the ferromagnetic bridges $\sum \Phi$ is taken into account, as shown in Fig. 6. The air-gap flux is calculated by (8) and the electromotive force is calculated by (9).

$$\Phi_\delta = \Phi_M - \sum \Phi = \left[\frac{\Phi_r}{F_C}.\left(F_C - \sum F\right)\right] - \sum \Phi \quad (8)$$

$$E_0 = \sqrt{2}.\pi.W_1.k_{w1}.f_1.\Phi_\delta \approx U_{o.c} \quad (9)$$

where, Φ_δ is the air-gap flux, Φ_M is the flux corresponding to the magnet operating point and $\sum \Phi$ is the sum of the leakage flux in the bridges.

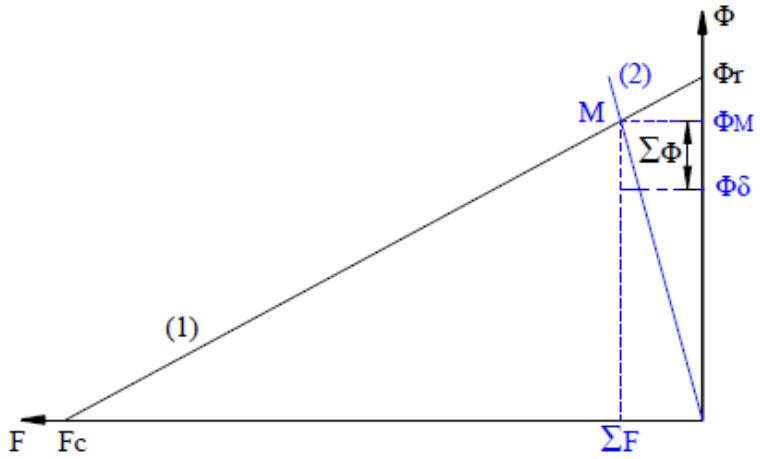


Figure 5. Operating point and air-gap flux without armature current

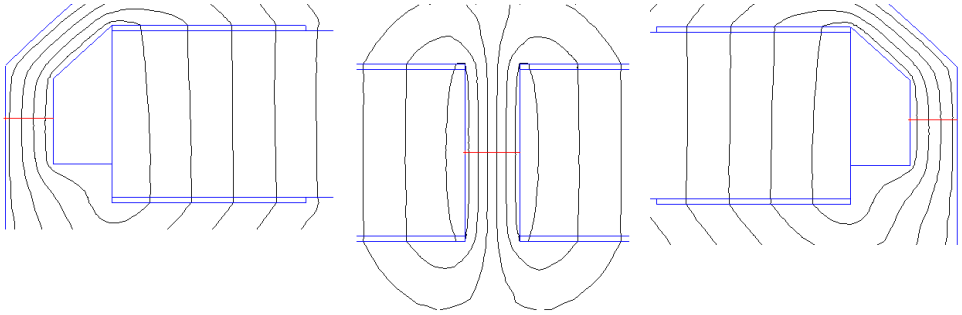


Figure 6. Ferromagnetic bridge flux leakage

4.3. DIRECT AXIS INDUCTANCE

To calculate the direct axis inductance the stator winding is fed with current corresponding to the analysed operating condition. Assuming that the influence of the stator winding resistance is negligible compared to the inductance, at short circuit the stator current has only direct axis component. The current is assigned to the phases of the stator winding so that the armature reaction field is directed along the direct axis, negative to the permanent magnet field and demagnetising the magnetic circuit. The phase currents are determined with the peak value assigned to phase A assuming sinusoidal distribution [3].

The negative armature reaction tends to move the operating point down the demagnetizing line, lowering the overall value of air-gap flux. The armature reaction is taken into account by translating line (2) in Fig.7 to the left at a distance corresponding to the m.m.f. F_{ad} - the armature reaction for a given value of the stator current [7, 8]. The new operating point (point P in Fig.7) defines the m.m.f. F_P and the flux of the permanent magnets

$$\Phi_P = \left[\frac{\Phi_r}{F_C}.(F_C - F_P)\right] \tag{10}$$

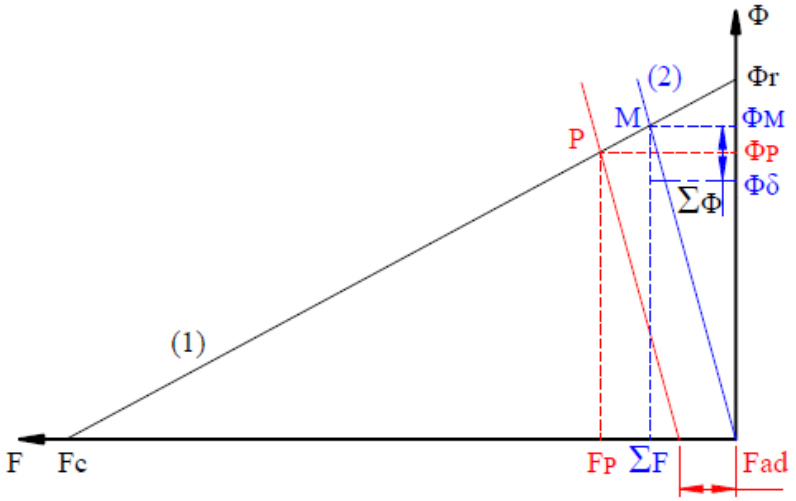


Figure 7. Operating point with negative armature reaction.

Park transformation is used to transform the 3-phase currents and flux linkages into d-q reference system and determine the direct axis inductance (11) - (13).

$$i_d = \frac{2}{3}\cdot\left[i_A.\cos(\theta_r) + i_B.\cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C.\cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right)\right] \tag{11}$$

$$\Psi_d = \frac{2}{3}.\left[\Psi_A.\cos(\theta_r) + \Psi_B.\cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \Psi_C.\cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right)\right] \tag{12}$$

$$L_d = \frac{(\Psi_d - \Psi_P)}{i_d} \tag{13}$$

where $\Psi_P = \Phi_P.W_1.k_{w1}$ is the flux linkage corresponding to the permanent magnet flux Φ_P.

5. RESULTS AND ANALYSIS

The values of the electromotive force obtained from experiments and from the FEA for several values of the rotational speed are presented in Fig.8. Curve (1) represents the measured values and curves (2) and (3), represent the values of $E_0 = U_{o.c}$ obtained from FEA by means of maximum flux linkage and permanent magnet operating point respectively. The measured and calculated results are in good agreement although curves (2) and (3) show higher values. Small geometry inaccuracies in the FE model may be a possible reason for the discrepancies. Fig.9 shows the waveform of the line to line open circuit voltage measured at the machine terminals for 1500 rpm.

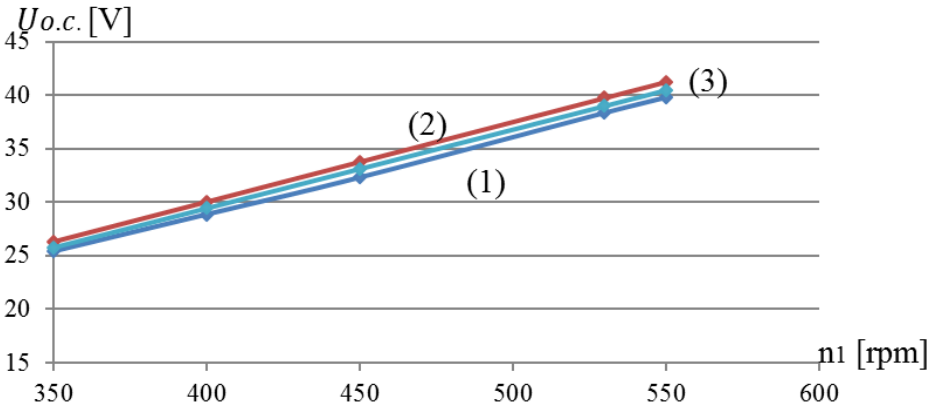


Figure 8. Open circuit voltage.

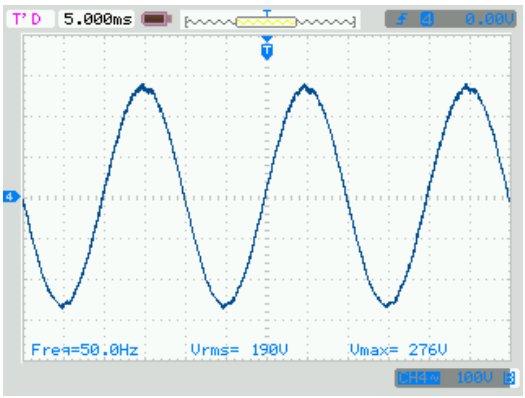


Figure 9. Waveform of the measured open circuit voltage.

The values of the direct axis inductance obtained from experiments and from the FEA are presented in Fig.10 for several values of the short circuit current. Curve (1) depicts the values of direct axis inductance calculated with the data measured from the short circuit and open circuit tests and curve (2) depicts the values of direct axis inductance obtained from FEA.

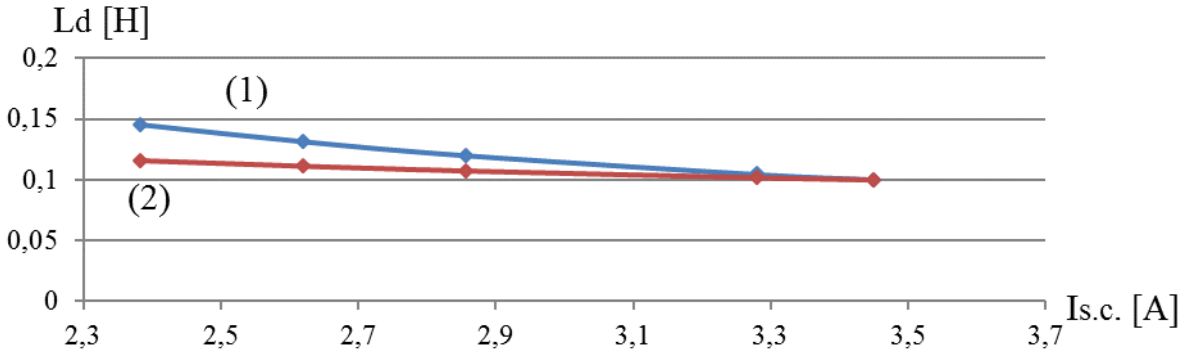


Figure 10. Direct axis inductance versus short circuit current

There are discrepancies present between the FEA calculated values and the experimentally obtained ones at low short circuit currents. The reason here is the neglect of the influence of the stator winding resistance in FEA which is more significant at low current. As the current rises these discrepancies become lower and at high values of the short circuit current, the direct axis inductance values come to a good agreement, with a difference lower than 2,5%.

6. CONCLUSIONS

This paper presents the determination of PMSM parameters obtained from short circuit and open circuit tests. The measured results are compared with results obtained via Finite Element Analysis. The FEA obtained results show a good agreement with the experimentally obtained.

The assumption of neglecting the armature resistance is made, when calculating the direct axis inductance with FEA. Neglecting the armature resistance is reasonable for large synchronous machine in which it is small compared to the reactance. In small synchronous machines, the armature resistance is commensurable to the reactance. At low short circuit currents the total current is not entirely inductive, but has a small active component. This active component determines a resistive voltage drop which results in the observed discrepancies. With the rise of the current, it becomes more inductive as the influence of the resistive component decreases.

REFERENCES

[1] Boldea I., ***Variable speed generators***, CRC Press, Taylor & Francis Group NW, 2006, ISBN 0-8493-5715-2

[2] Minoru K., ***Parameter Measurements for Permanent Magnet Synchronous Machines***, Trans. on Electrical and Electronic Engineering, IEEJ Trans 2007, 109-117.

[3] Цанков Й., ***Изпитване на електрическите машини - четвърто издание***, Държавно издателство „Техника“– София, 1968

[4] Bianchi N., ***Electrical machine analysis using finite elements***, CRC Press, Taylor & Francis Group NW, 2005, ISBN 0-8493-3399-7

[5] Rizov, P., R. Spasov, T. Stoyanov, V. Zahariev, ***Determining the Dependency of the Flux Linkage from the Load in Synchronous Machines with Permanent Magnets for Hybrid Automobiles***, Proc. of Technical University of Sofia, Volume 64, Issue 4, 2014, 97-105 (in Bulgarian).

[6] Mi, C. C., M. Filippa, ***Analytical Method for Predicting the Air-Gap Flux of Interior-Type Permanent-Magnet Machines***, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, Jan. 2004, 50-58.

[7] Gieras J. F. and Wing M., ***Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications***, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2002.

[8] Todorov G., B. Stoev. ***Analytical model for sizing the magnets of permanent magnet synchronous machines.*** Journal of Electrical Engineering, Vol. 3, No. 3, 2015 ,pp 134-141, DOI:10.17265/2328-2223, ISSN 2328-2223, Libertyville, IL 60048, USA

Authors: George Todorov, PhD, Associate Professor, Department of Electrical Machines, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *gtto@tu-sofia.bg*; Bozhidar Stoev, M.Eng., PhD student, Department of Electrical Machines, the Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *bdst@tu-sofia.bg*

Received 15 December 2016 **Reviewer:** Assoc. prof., PhD Miho Mihov

АВТОМАТИЗИРАНА СИСТЕМА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТИ

Йоско Балабозов, Кръстьо Хинов, Данчо Венков, Иван Ячев

Резюме: *В настоящата работа е представена автоматизирана система за определяне на динамичните характеристики на електромагнити. Основното ядро на системата се състои от микроконтролер, микрокомпютър и сензорни модули. За създаването на системата е разработена графична софтуерна среда за задаване на необходимите параметри и визуализиране на резултатите. Разработен е и софтуерен алгоритъм за микроконтролера, позволяващ двупосочна комуникация с графичното приложение в микрокомпютъра.*
Ключови думи: *електромагнит, динамични характеристики, микроконтролер, разработване на графична среда.*

AUTOMATED SYSTEM FOR STUDY OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETS

Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Dancho Venkov, Ivan Yatchev

Abstract: *In the present work is presented an automated system for determining the dynamic characteristics of electromagnets. The core of the system consists of a microcontroller, a microcomputer and sensor modules. For the creation of the system is developed graphics software environment to set the required parameters and visualization the results. It is also developed a software algorithm for a microcontroller which allows bi-directional communication with the graphics application in the microcomputer.*
Keywords: *electromagnet, dynamic characteristics, microcontroller, development of graphical environment.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременното развитие на електрониката и появата на достъпни микроконтролерни системи позволява да се автоматизира решаването на инженерните задачи и да се повиши точността на резултатите от тях. Една такава възможност представя разработената автоматизирана система за определяне на динамичните характеристики на електромагнити.

Основната цел е изработването на експериментална система, която да е в състояние да повтори многократно даден експеримент, да обработи и представи получените резултати. Същевременно с това е необходимо да се следят стойнос-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

тите на определени параметри на изследвания обект. Едновременно с това е необходимо да се постигне модулност на системата, което е предпоставка за лесната й адаптация при реализиране на други експериментални установки.

Цялостното разработване на системата може да се раздели на следните етапи:

- Разработване на софтуерни алгоритми и графична среда за управление и визуализиране на резултатите от експеримента;
- Асемблиране на хардуер, изпълняващ заложените софтуерни алгоритми;
- Изработка на сензорни модули за измерване на търсените величини.

В литературни източници [1-5] са разгледани така наречените „вградени системи“. Описани са хардуерните и софтуерните принципи, залегнали при тяхното изграждане и използването им в автономни управляващи системи.

2. ОПИСАНИЕ НА СИСТЕМАТА И ПРИНЦИП НА РАБОТА

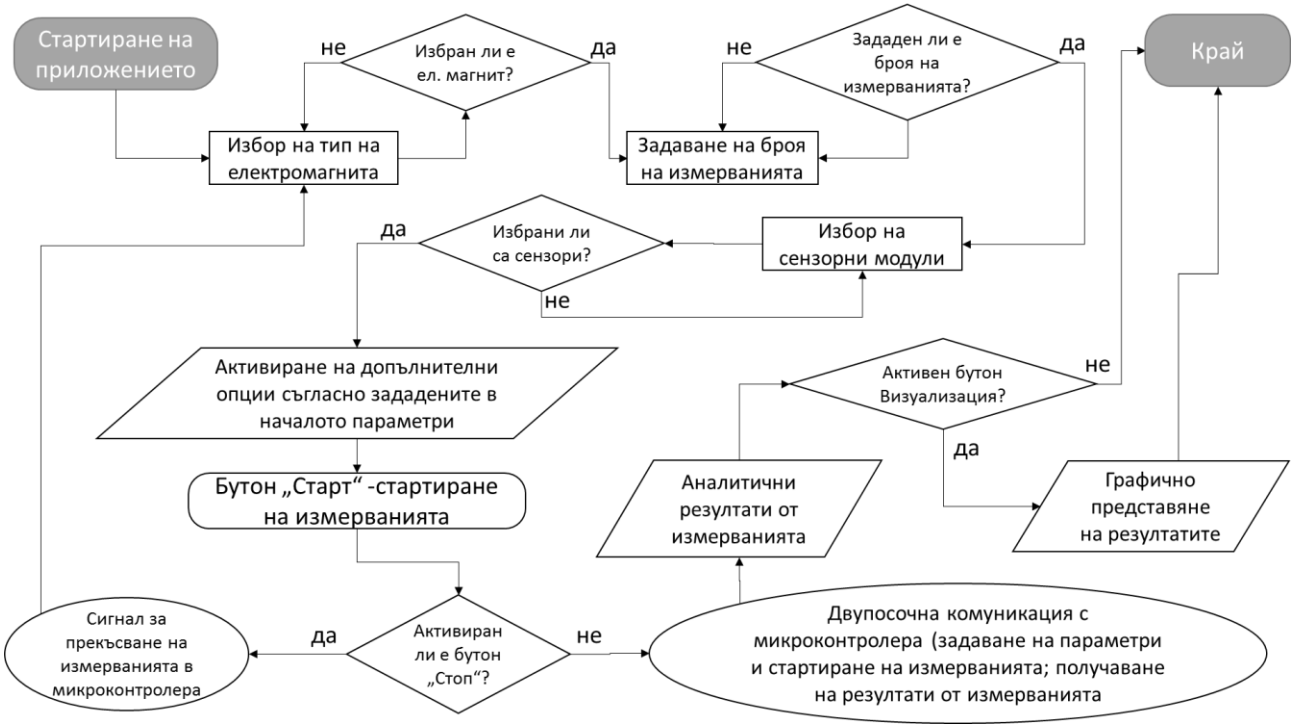
За осигуряване на работоспособността на системата е разработено софтуерно приложение с графична среда, с което са реализирани функции, осигуряващи взаимодействието с микроконтролерната система. Чрез графичната среда могат да се изпращат команди към микроконтролерната система, чрез които се променят параметрите, използвани при провеждането на експерименталното измерване. След това натрупаната база с данни, получени от сензорните модули, се изпраща през същата връзка за комуникация обратно към микрокомпютъра, където в софтуерното приложение става обработката на данните и тяхната визуализация.

Микроконтролерната система осигурява управлението на процеса за реализирането на съответното експериментално изследване и дава възможност да се приемат данните от използваните сензори. В нея е реализиран софтуерен алгоритъм, осигуряващ приемането на нови данни от микрокомпютърната система и връщането обратно на резултатите от проведения експеримент.

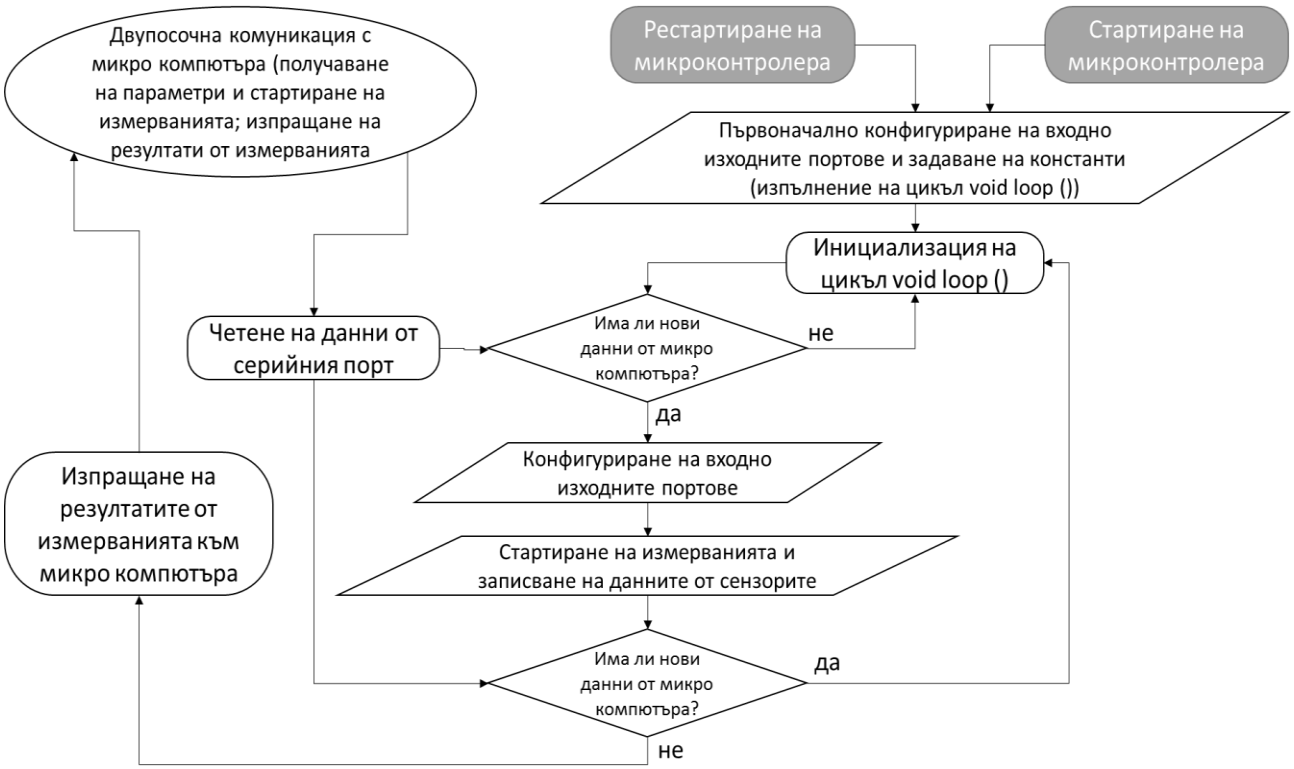
В хардуерно отношение, за реализация на автоматизираната система за изследване на динамичните характеристики на електромагнити, са използвани „Arduino“ съвместима микроконтролерна система, микрокомпютър, LCD дисплей за визуализиране на резултатите, захранващ блок и определен набор от сензорни модули. Изработването на сензорни модули за измерване на различни величини, както и постигнатите с тях резултати, са обект на бъдещи публикации.

Принципна блокова схема, показваща връзките между отделните функционални блокове в системата е дадена на фиг.1. Алгоритмите на работа на реализираното софтуерно приложение и на софтуерния скрипт в микроконтролера са дадени съответно на фиг.2 и фиг.3.

Фиг.1. Блокова схема на автоматизираната система за измерване на динамичните характеристики на електромагнити.



Фиг.2. Алгоритъм на работа на софтуерното приложение за управление на системата и визуализация на резултатите.



Фиг.3. Алгоритъм на работа на микроконтролера.

3. ВЪЗМОЖНОСТИ НА СИСТЕМАТА И ТОЧНОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

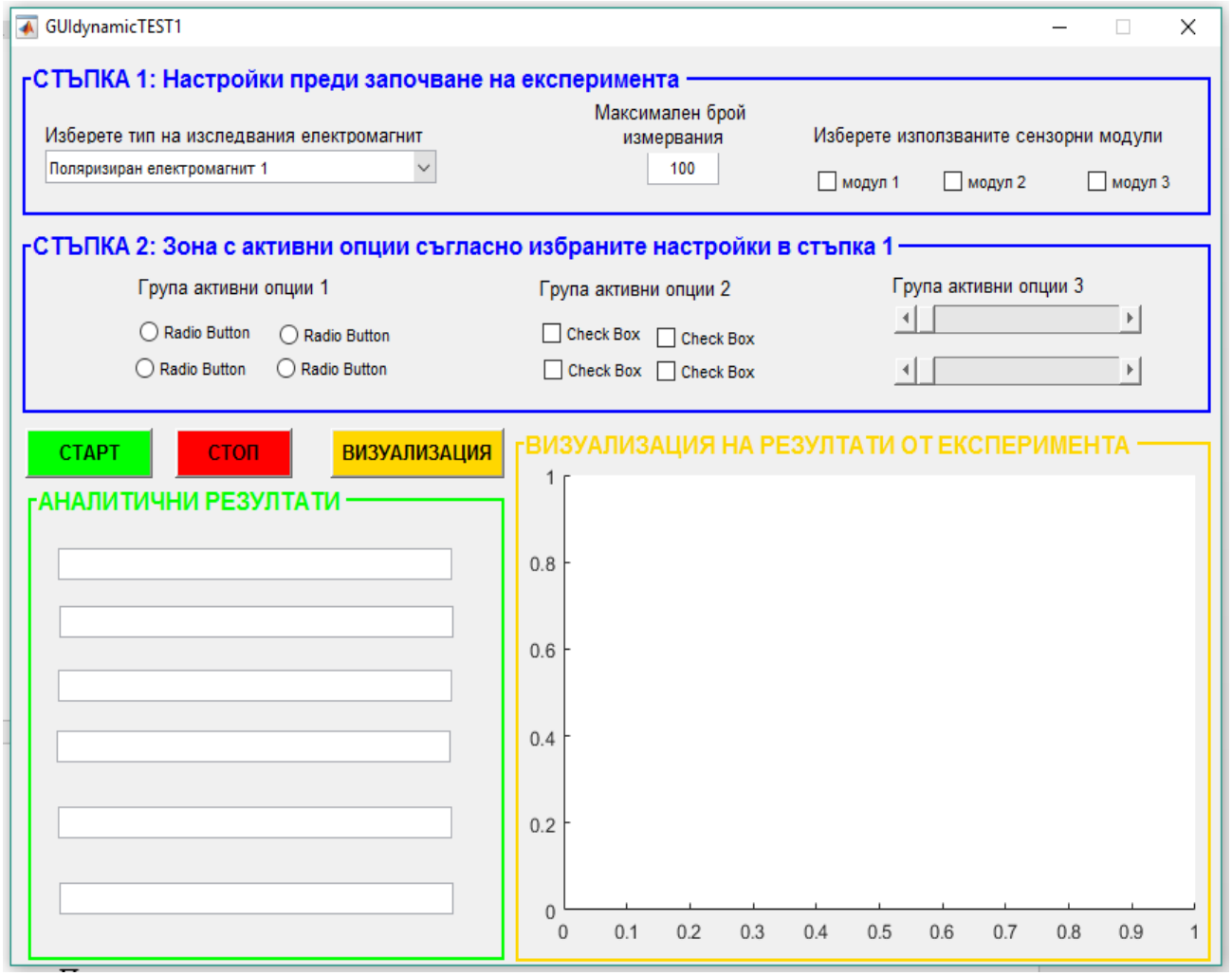
Основните експериментални изследвания, свързани с динамичните характеристики на електромагнити, които могат да се реализират със системата са:

- Определяне на изменението на тока във функция от времето, при движението на котвата на електромагнита;
- Определяне на ускорение (скорост).

Други възможни за реализация експериментални изследвания са:

- Определяне на прегряването, след определен брой превключвания за определено време. От тук следва и възможността за определяне на максималния брой превключвания за единица време;
- Определяне на механичната износоустойчивост;
- Определяне на минималната продължителност на захранващия импулс необходим за превключване на електромагнита, във връзка с енергоефективността му.

Обобщеният вид на разработената графична среда за управление на системата и за визуализация на получените резултати е показан на фиг.4.



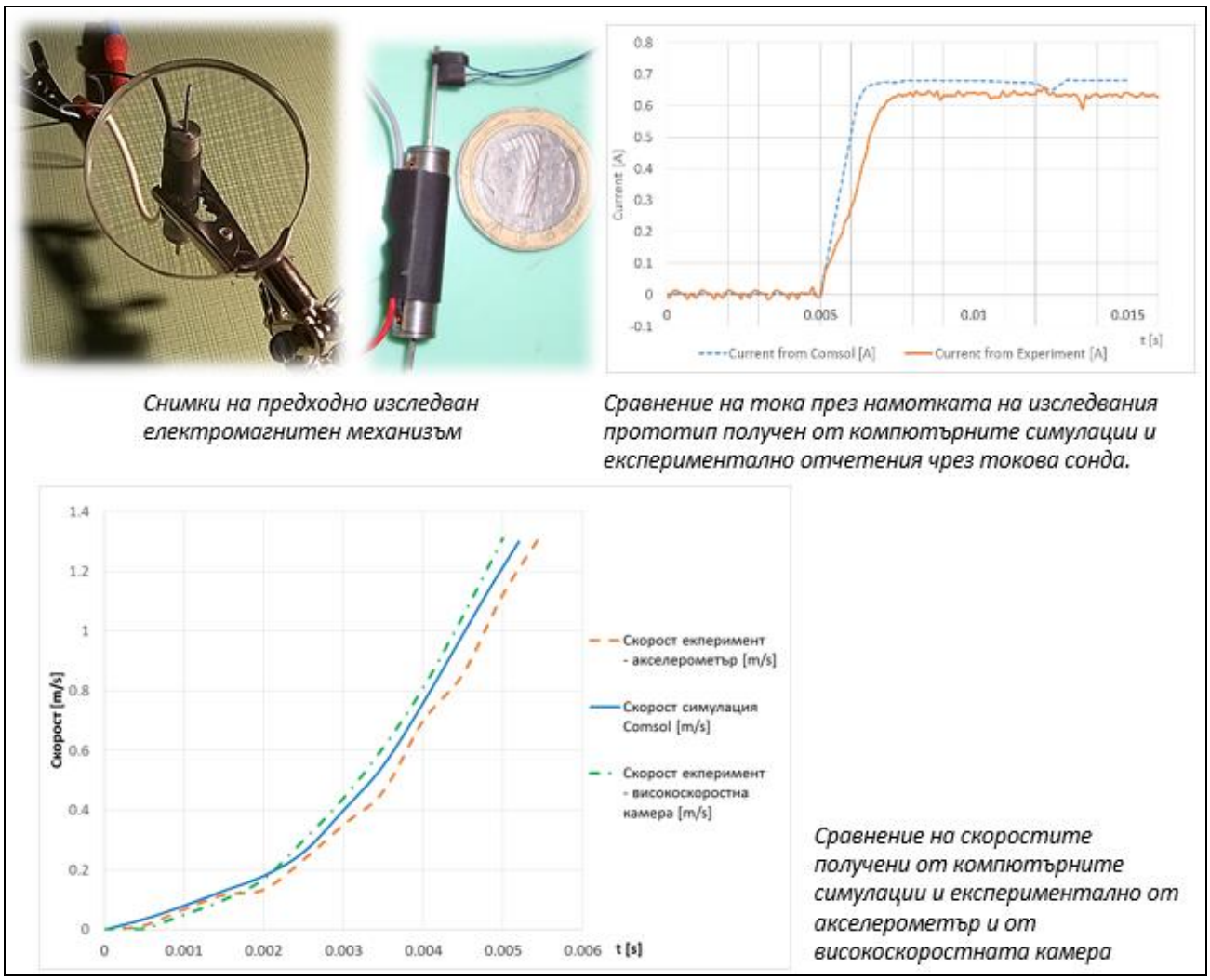
Фиг.4. Обобщен вид на графичното приложение за управление на системата и визуализация на резултатите.

Предвид модулността на системата, ограничението във вида на възможните експериментални изследвания зависи от наличието на необходимите сензорни модули.

За да се провери коректната работа и да се потвърди достоверността на постигнатите резултати, за сравнение се използват резултати от предварително изследван поляризиран електромагнитен модул, чийто динамични характеристики са определени чрез компютърно моделиране и след това са потвърдени по експериментален път.

Част от тези резултати, както и снимка на изследвания модул са дадени на фиг.5.

Допълнителна информация за електромагнитния модул и проведените с него експериментални изследвания са представени в публикации [6-8].



Фиг.5. Резултати от предварително изследван електромагнитен модул, използвани при определяне на точността на резултатите от системата.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработената автоматизирана система дава възможност за провеждането на редица експериментални изследвания и решаването на голям брой инженерни задачи.

Едновременно с това необходимостта от човешка намеса е сведена до минимум. Това от своя страна ограничава възможността за допускане на редица грешки при подготовката и провеждането на експеримента и дава възможност за по-голяма концентрация върху анализа на постигнатите резултати.

Намаленото време за получаване на необходимите резултати е от съществено значение при провеждането на експерименти върху серия от прототипи.

Важно качество на системи от този тип е и възможността за изпращане и визуализиране на резултатите на отдалечен онлайн сървър, както и дистанционното задаването на нови стойности на входните за системата параметри.

ЛИТЕРАТУРА

[1.] Marwedel P., ***Embedded System Design***, Springer Science+Business Media B.V. 2011, ISBN 978-94-007-0256-1

[2.] Li, Yau-Tsun S., Malik, ***Performance Analysis of Real-Time Embedded Software***, Kluwer Academic Publishers 1999, ISBN 978-1-4615-5131-7

[3.] Pop P., Eles P., Peng Z., ***Analysis and Synthesis of Distributed Real-Time Embedded Systems***, Kluwer Academic, 2004, ISBN 978-1-4020-2873-1

[4.] Каракехайов З., Кристенсен К., Винтер О., ***Проектиране на вградени микрокомпютърни системи с микроконтролери. Хардуер и софтуер***, Pensoft Publishers, 2000, ISBN 9546421014, 9789546421012

[5.] Георгиев В., Нишева М., Бончев Б., ***Вградени и автономни системи***, Академично издателство „Св. Климент Охридски“, София, 2014.

[6]. Хинов К., Балабозов Й., Ячев И., ***Изследване на електромагнит за Брайлов екран с подобрени характеристики***, VI-та Научна конференция ЕФ’2014, Септември 15-17, 2014, Созопол, България

[7]. Balabozov I., Yatchev I., Hinov K., ***Computer Modeling and Experimental Verification of Dynamic Characteristics of Permanent Magnet Linear Actuator for Braille Screen***, International Conference on Applied and Theoretical Electricity – ICATE 2014, ISBN: 978-1-4799-4161-2/14/$31.00 ©2014 IEEE, ISSN: 2376-4163, October 23-25, 2014, Craiova, Romania

[8]. Балабозов Й., Хинов К., Стоименов Й., Гьошев С., Карастоянов Д., ***Изследване на движението на електромагнит за Брайлов екран чрез високоскоростна камера***, VII-ма Научна конференция ЕФ‘2015, Септември 19-21, 2015, Созопол, България

Автори: Йоско Балабозов, маг. инж. асистент, кат. “Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *i.balabozov@tu-sofia.com*; Кръстьо Хинов - доцент д-р инж., кат. “Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *k_hinov@tu-sofia.bg*; Данчо Венков, инж. бак., ТУ-София, E-mail adress dancho36@mail.bg; Иван Ячев, проф. дтн инж., кат. “Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *yatchev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. дтн Илиана Маринова

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ПУЛСАЦИИ НА РАЗЛИЧНИ СВЕТЛИННИ ИЗТОЧНИЦИ

Симона Петракиева, Йордан Шопов, Захари Иванов

Резюме: *В настоящата статия са изследвани различни светлинни източници, като на базата на експериментални данни е определен коефициента на пулсации на светлинния поток на всеки от тях. Анализирани са различни модели светлодиодни, луминесцентни, компактни луминесцентни лампи и „нажежаеми лампи“. Извършен е сравнителен анализ на получените резултати.*
Ключови думи: *светодиоди, осветителни уредби, коефициент на пулсации*

DETERMINING THE FLICKER INDEX FOR DIFFERENT LIGHT SOURCES

Simona Petrakieva, Yordan Shopov, Zahari Ivanov

Abstract: *In the present paper are considered different types light sources and based on the experimental data is determined the flicker index of the light flow of each of them. It is analized different models LED, fluorescent, compact fluorescent lamps and incandescent light bulbs. It is made a comparative analysis of the final results.*
Keywords: *Light Emitting Diod* (*LED*), *lighting systems, flicker index*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Светлинният поток, излъчван разрядни и светодиодни лампи, при захранваните с променлив ток, се изменя с двойна честота на мрежовата. Очите на човека различават пулсации с честота, която е по-ниска от т. нар. критична честота, при която се сливат трептенията. Тази честота се намира в диапазона от 35 до 60 Hz. Видимите за човешкото око пулсации предизвикват дразнения и често са причина за парене и сълзене в очите, главоболие и чувство за цялостно неразположение. Но в същото време и неразличимите от човешкото око пулсации, с честоти извън този диапазон и достигащи до 300 Hz, също влияят отрицателно върху зрителната работоспособност и върху нервната система на хората. Най-опасно влияние върху човешкото поведение оказват тези пулсации, които предизвикват т. нар. „стробоскопичен ефект“ – създаване на илюзия за неподвижност или бавно движение на различни части на движещи се обекти (например стругове или други машини, извършващи въртеливи движения при работата си), което може да доведе до производствени травми и наранявания. Повишената зрителна умора на човешкото око и опасността от травми, причинени от появата на светлинните трептения, налагат необходимост от количествена оценка на

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

пулсациите на светлинния поток на лампите, което се извършва посредством т. нар. коефициент на пулсациите $K_П$.

Настоящата статия е организирана по следния начин. В следващия раздел е дефиниран коефициента на пулсациите като количествена оценка на породените от светлинни източници трептения на осветеността E (респ. светлинния поток Ф). В раздел 3 са дефинирани допустимите норми на изменение на коефициента на пулсации за различните видове осветители съгласно текущите международни стандарти. В раздел 4 са представени резултатите от изчисленията на коефициента на пулсациите $K_П$ за различни типове светлинни източници – LED (Light Emitting Diode), луминесцентни лампи, компактни луминесцентни лампи и лампи с нажежаема нишка. Акцентирано е върху LED лампите, тъй като в литературата съществува доста оскъдна информация по отношение на техния анализ. Доста често хората работещи в помещения, осветени с електрически източници, се сблъскват с проблема на повишена пулсация на светлинния поток и произтичащата от това пулсация на осветеността. Статията завършва със заключителни бележки, свързани с факта, че качеството насветене на всяка от лампите зависи в голяма степен от вида на вградения в нея преобразувател.

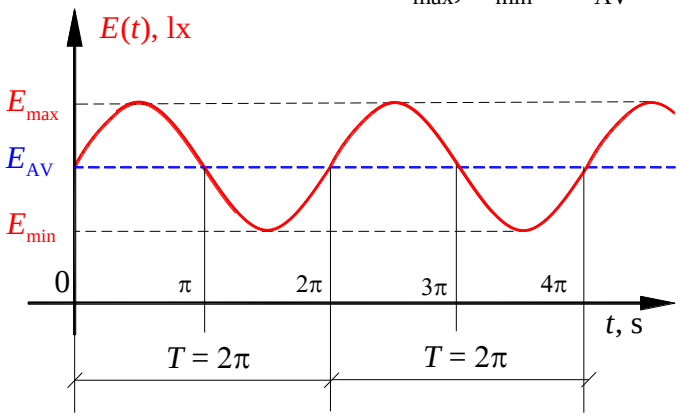
2. КОЕФИЦИЕНТ НА ПУЛСАЦИИТЕ ($K_П$) – КОЛИЧЕСТВЕНА ОЦЕНКА НА ТРЕПТЕНИЯТА, ГЕНЕРИРАНИ ОТ СВЕТЛИННИ ИЗТОЧНИЦИ [1, 2]

Съгласно стандарта ГОСТ Р 54945-2012 [3] коефициентът на пулсации на осветеността се дефинира по следния начин:

$$K_П = \frac{(E_{\max} - E_{\min})}{2.E_{AV}}.100,\ \%, \qquad (1)$$

където: $E_{\max}$, lx – максимална стойност на осветеността;
$E_{\min}$, lx – минимална стойност на осветеността;
E_{AV} , lx – средна стойност на осветеността.

При изменение на осветеността $E(t)$ по закона, показан на фиг.1, върху графиката са означени съответните стойности на $E_{\max}$, $E_{\min}$ и E_{AV}.



Фиг.1. Измененение на осветеността $E(t)$

Съгласно дефиницията за средна стойност на периодична величина с период T, средната стойност на осветеността се определя по израза:

$$E_{\mathrm{AV}} = \frac{1}{T}\int_0^T E(t).dt,\ lx \qquad (2)$$

Забележка: Израз (2) е валиден само за периодична величина с $E_{\min} \geq 0$ (в частност синусоидалната величина от фиг.1). В случай, когато графиката на изследваната периодична променлива величина $x(t)$ с период T е симетрична спрямо абцисната ос за всеки два последователни полупериода, то интегрирането се извършва само за един полупериод на $x(t)$, тъй като за цял период $T - x_{\mathrm{av}} = 0$.

Тогава изразът за коефициента на пулсации от формула (1) добива вида:

$$K_{П} = \frac{\left(E_{\max} - E_{\min}\right)}{\frac{2}{T}\int_0^T E(t).dt}.100,\ \%. \qquad (3)$$

В практиката, обаче с достатъчна инженерна точност, средната стойност на осветеността се определя по формулата:

$$E_{\mathrm{AV}} = \frac{\left(E_{\max} + E_{\min}\right)}{2}.100,\ lx. \qquad (4)$$

В този случай, отчитайки израз (4) в (1), то за коефициента на пулсации се получава:

$$K_{П} = \frac{\left(E_{\max} - E_{\min}\right)}{\left(E_{\max} + E_{\min}\right)}.100,\ \%. \qquad (5)$$

При сигнали, близки до синусоидалните, стойностите на коефициента на пулсации, изчислени съгласно формули (3) и (5) практически съвпадат. При импулсни сигнали, обаче, резултатите от тези формули могат силно да се различават в зависимост от спецификата на сигнала. От израз (5) се вижда, че стойността на коефициента на пулсации $K_{П}$ не превишава 100 %, докато ако той се изчислява съгласно израз (3), то може да се получи резултат, който значително превишава 100 %.

3. ДОПУСТИМИ НОРМИ НА ИЗМЕНЕНИЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ПУЛСАЦИИ

В Наредба № 49 за изкуствено осветление на сградите, обнародвана в ДВ. бр.7 от 23 Януари 1976 г. и изменена съгласно ДВ. бр. 64 от 10 август 1976 г. са посочени общите изисквания при проектиране на изкуствено осветление на сгради. В Приложение № 7 на наредбата са посочени допустимите стойности за коефициента на пулсациите на осветеността, генерирани от наличните в съответното помещение разрядни лампи. [**Чл. 29**]

(1) При осветление на производствени помещения с разрядни лампи, захранвани с променлив ток 50 Hz, коефициентът на пулсации не може да надвишава стойностите, посочени в приложение № 7.

(2) Коефициентът на пулсации на осветеността не се ограничава за разряди на зрителна работа:

1. непосочени в приложение № 7.

2. VIIIа и IXа при кратковременно пребиваване на хора в помещението и липса на възможност в него за възникване на стробоскопичен ефект.

(3) Допуска се повишаване на коефициента на пулсации на осветеността до 30 % в помещения, в които се изпълняват работи от VI и VII разряд, при отсъствие в тях на условия за възникване на стробоскопичен ефект.

Таблица 1

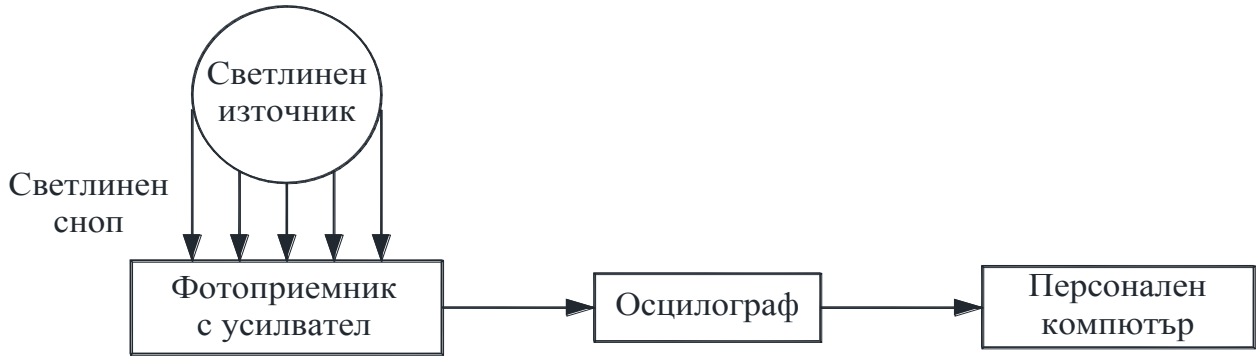
Приложение № 7 към чл. 29, ал. 1 от Наредба № 49 за изкуствено осветление на сгради

Система за осветление	**Допустим коефициент на пулсации на осветеността в % за разряди на зрителна работа**		
	I и II	**III**	**IV, V, VI, VII, VIII, IXа и X**
Общо осветление	10	15	10
Комбинирано осветление			
а) общо	20	20	20
б) местно	10	15	20

Обикновено реномирани фирми като Philips, Osram и т.н., държейки на своето име и авторитет, произвеждат осветители, чийто коефициент на пулсации на осветеността отговаря на по-горе описаните норми и публикуват тази информация в справочници или на своите сайтове. Но за съжаление при осветителите, произведени от неизвестни фирми (предимно от Китай), пулсацията на осветеността (респ. на светлинния поток) не отговарят на никакви стандарти, но за сметка на това те са по-евтини и са едни от най-разпространените на българския пазар. В литературата и на пазара, разбира се, липсва информация относно коефициента на генерираните от тях пулсации. По тази причина в настоящата статия е извършено едно изследване на този коефициент на базата на експерименти. В анализа са включени най-много LED лампи, тъй като информация за коефициента на генерираните от тях пулсации почти липсва или е оскъдна. Като съпоставка с тях са измерени и на луминесцентна лампа, компактна луминесцентна лампа и „нажежаема лампа“. В последната $K_П \approx 0$, защото не се наблюдават пулсации, тъй времето за загряване и охлаждане на металната нишка е доста по-голямо от периода на пулсациите.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ПУЛСАЦИИ $K_П$

В настоящия материал е изчислен коефициента на пулсации $K_П$ на осветеността $E(t)$, генерирана от различни видове източници на изкуствена светлина. Експериментите са извършени на базата на опитната постановка, визуализирана чрез показаната на фиг.2 блок-схема.



Фиг.2. Блок-схема на опитната постановка за определяне на коефициента на пулсации

Генерираната светлина от тествания светлинен източник (лампата) попада върху интегрален фотометър с фотоприемник с усилвател.

Сигналът се подава към цифров осцилограф, който го визуализира във времевата област.

За улеснение на обработката данните се предават към персонален компютър.

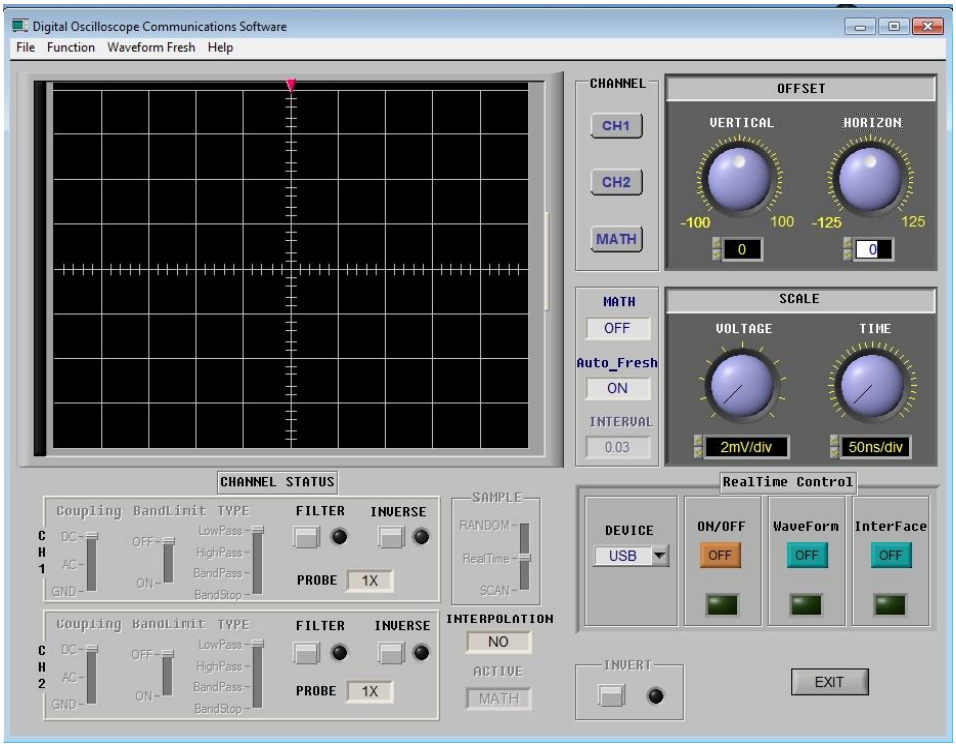
Окончателната стойност на коефициента на пулсациите на осветеността за всяка от анализираните лампи се извършва чрез Excel.

Използваният измервателен уред е: цифров осцилограф - марка: UNI-T UT-2025C на фирмата UNI-TRENDO.

Изследвани са 5 броя LED лампи и по един брой луминесцентна лампа, компактна луминесцентна лампа и нажежаема лампа - за сравнение. За всяка от анализираните лампи са отчетени E_{max}, E_{min} и E_{AV} чрез визуализиращия софтуер към осцилографа (фиг.3).

Данните от измерванията са дадени графично (табл.2) и в цифров вид (табл.3, където за всяка анализирана лампа са посочени съответно две стойности на коефициента на пулсации $K_П$ – от измерванията и пресменати по формула (4)).

По ординатната ос на всяка от графиките е отбелязана дименсия във [V], а не в [lx], тъй като на входа на осцилографа осветеността е преобразувана в електрически сигнал - напрежение. Това не влияе върху стойността на коефициента на пулсации $K_П$ (изрази (3) и (5)), тъй като там зависимостите са в относителни единици.

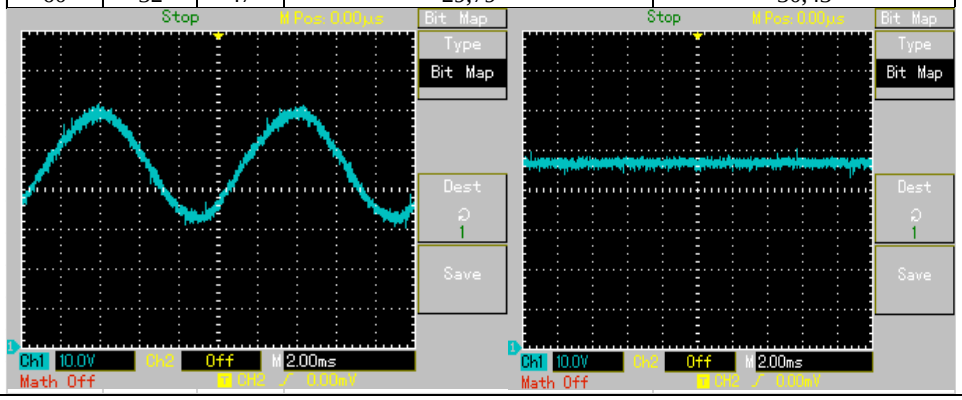


Фиг.3. Виртуален екран, създаден със специализиран софтуер, за визуализация на данните от цифровия осцилограф UNI-T UT-2025C

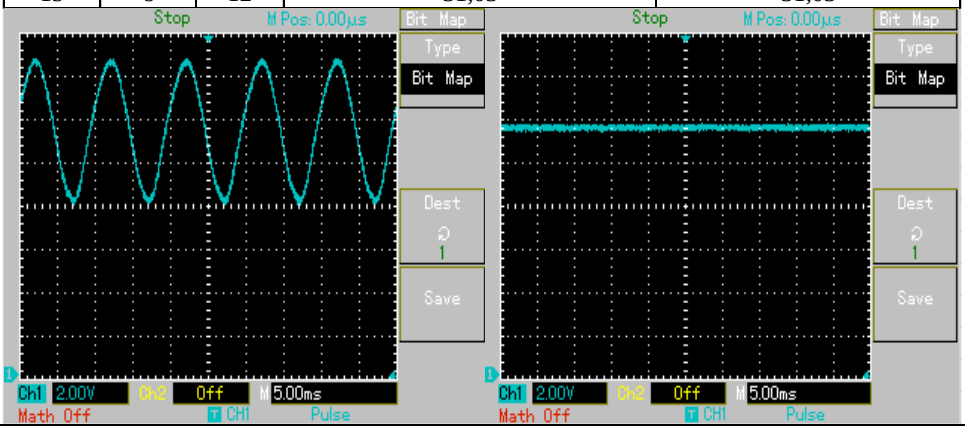
Таблица 2

Резултати от проведените експерименти

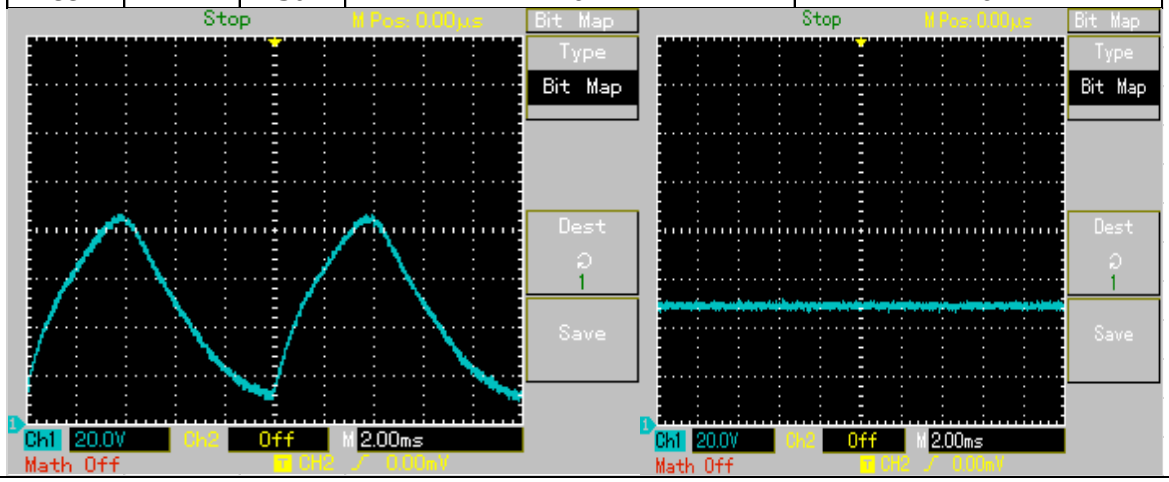
LED 1_студена светлина				
E_{max}, lx	E_{min}, lx	E_{AV}, lx	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
60	32	47	29,79	30,43



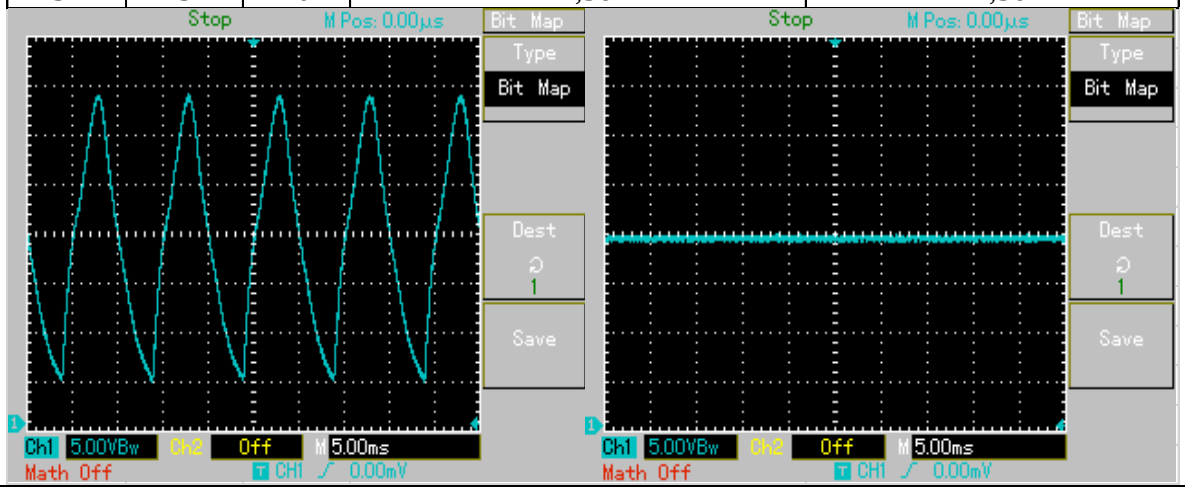
LED 5_VIDIN_студена светлина				
E_{max}, lx	E_{min}, lx	E_{AV}, lx	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
15	8	12	31,03	31,03



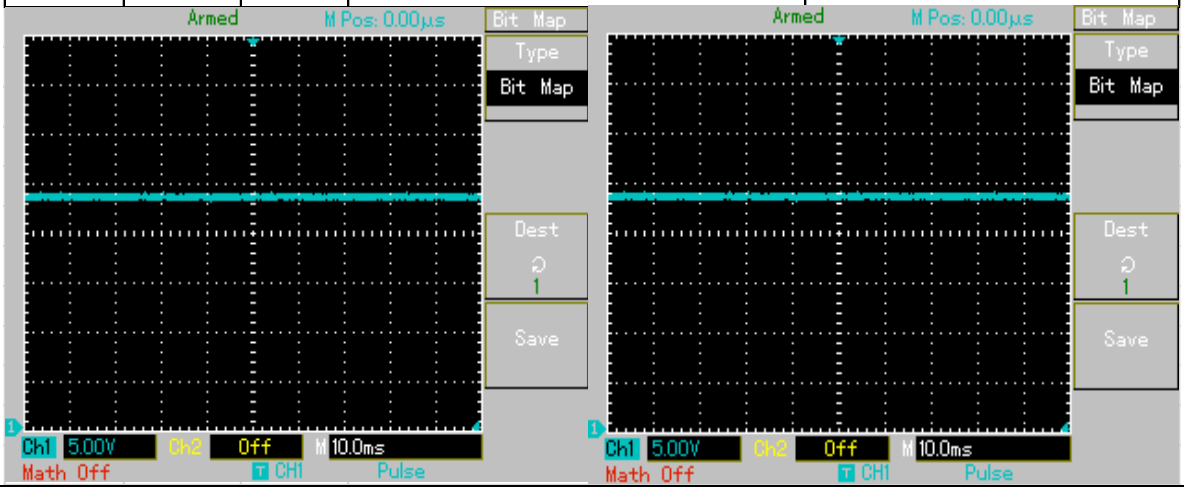
LED 2_топла светлина				
E_{max}, lx	E_{min}, lx	E_{AV}, lx	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
88	12	50	76	76



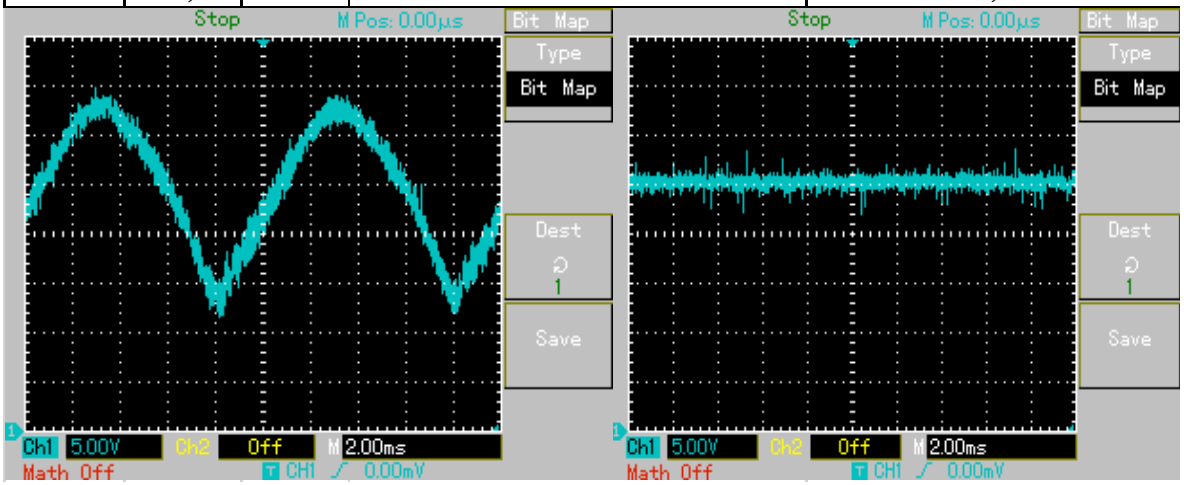
LED 3_OPTONICA_HM-BL701_топла светлина				
E_{max}, lx	E_{min}, lx	E_{AV}, lx	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
34	5	20	74,36	74,36



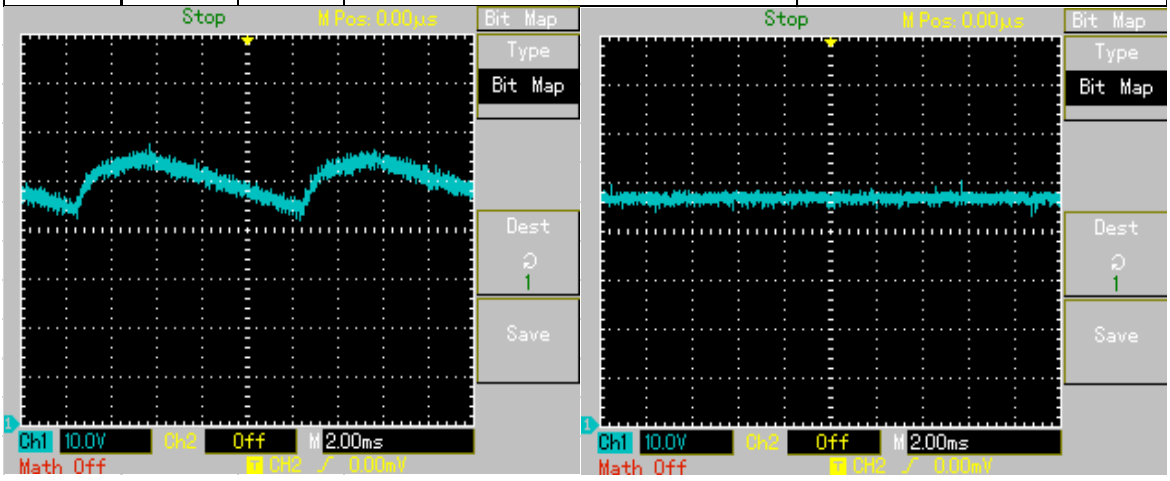
LED 4_V_TAC_VT-1853_топла светлина				
E_{max}, lx	E_{min}, lx	E_{AV}, lx	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
24	24	24	0	0



Луминесцентна лампа_1 фаза				
E_{max}, lx	E_{min}, lx	E_{AV}, lx	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
34	11,5	25	45	49,45



Компактна луминесцентна лампа				
E_{max}, lx	E_{min}, lx	E_{AV}, lx	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
56	43	48	13,54	13,13



"Нажежаема лампа"				
E_{max}, lx	E_{min}, lx	E_{AV}, lx	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
1100	1100	1100	0	0

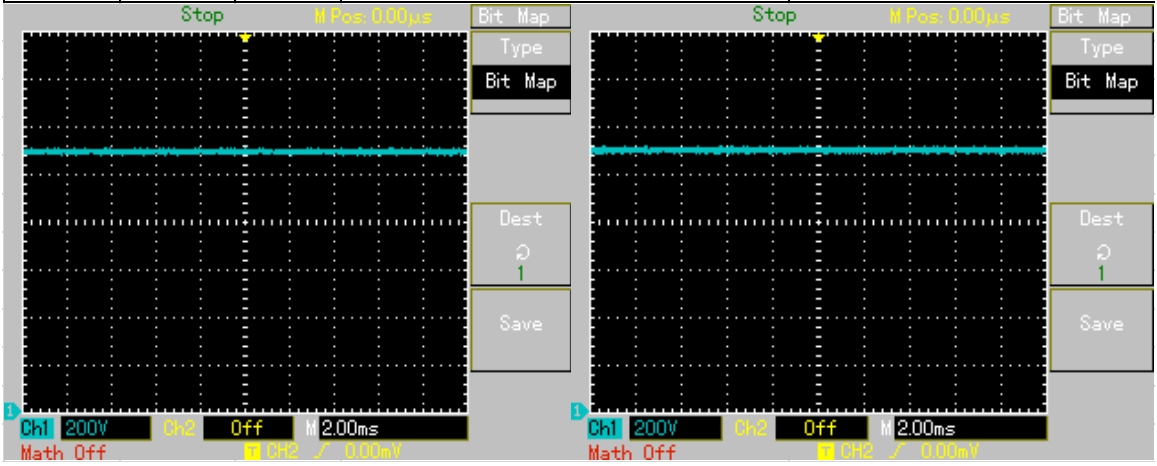


Таблица 3

Резултати за $K_П$ за всяка от изследваните лампи

модел лампа	$K_П$ - чрез измерване на E_{AV}, %	$K_П$ - съгласно ф-ла (5), %
LED 1_ студена светлина	29,79	31,03
LED 5_VIDIN_студена светлина	31,03	31,03
LED 2_топла светлина	76	76
LED 3_OPTONICA_HM-BL701_топла светлина	74,36	74,36
LED 4_V_TAC_VT-1853_топла светлина	0	0
Луминесцентна лампа 1 фаза	45	49,45
Компактна луминесцентна лампа	13,54	13,13
"Нажежаема лампа"	0	0

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съгласно стандарта БДС EN 12464-1 / 2011 г. се изисква във вътрешните осветителни уредби (ВОУ) стойностите на коефициента на пулсации $K_П$ да бъдат минимални за различните видове помещения. Стойностите на $K_П$ в този стандарт не са зададени. В стандарта БДС 1786 / 1984 г. тези стойности на $K_П$ са от 15 до 25 %.

Понастоящем във ВОУ основно се използват светлодиодни и луминесцентни лампи и направените изследвания показват, че при тях $K_П$ се изменя от 5 до 76 % (табл.3) в зависимост от вида на вградения в тях преобразувател.

За количествена оценка на стойностите на коефициента на пулсациите ($K_П$) на различните видове светлинни източници се налага използване на специални уреди за измерването им.

ЛИТЕРАТУРА

[1] С. Мамаев, ***Проблема пульсации в современном освещении***, LUMEN&EXPERTUNION, #03(6) декабрь 2013, стр. 101-109. www.LUMEN2B.RU

[2] С. Котов, ***Расчёт коэффициента пульсации в осветительных установках***, LUMEN&EXPERTUNION, #03(6) декабрь 2013, стр. 110-118. www.LUMEN2B.RU

[3] ГОСТ Р 54945-2012 ***Методы измерения коэффициента пульсации освещенности, Buildings and structures. Methods for measuring the illuminance pulsation factor***

[4] Наредба № 49 за изкуствено осветление на сградите - Приложение 7, Обн. ДВ. бр.7 от 23 Януари 1976 г., изм. ДВ. бр.64 от 10 Август 1976 г. http://kab-sofia.bg/images/stories/normi/7-v-ii-11_art_lighting.pdf

Автори: Симона Петракиева, доц. д-р, кат. „Теоретична електротехника“, Факултет „Автоматика“, Технически Университет - София, E-mail adress: *petrakievas-te@tu-sofia.bg*; Йордан Шопов, доц. д-р, кат. „Електрически апарати“, Електротехнически факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *shopov@tu-sofia.bg*; Захари Иванов, проф. д-р, кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Радослав Кючуков

РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА АВАРИЕН И ЕВАКУАЦИОНЕН ОСВЕТИТЕЛ СЪС СВЕТЛОДИОДИ

Захари Иванов

Резюме: *Разработен и изследван е авариен и евакуационен осветител със светлодиоди*
Ключови думи: *осветители, аварийно и евакуационно осветление, осветителни уредби*

THE DEVELOPMENT AND INVESTIGATION LUMINAIRE FOR EMERGENCY LIGHTING WITH LEDs

Zahari Ivanov

Abstract*: Developed and tested emergency luminaire with LEDs*
Keywords: *luminaires, emergency and evacuation lighting, lighting systems*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Системите за аварийно и евакуационно осветление са проектирани за осигуряване на лична сигурност и гарантиране на безопасната евакуация от дадена сграда при повреда или авария. Една такава система трябва да работи безотказно във всякакви ситуации, поради което са въведени големи изисквания, гарантиращи нейната надеждност. Изграждане на аварийно и евакуационно осветление е елемент от задължителните мерки за безопасност, което налага то да бъде професионално проектирано и изпълнено.

Проектирането на това осветление се осъществява на основата на приети стандарти, налагащи редица изисквания, голяма част от които са обобщени в действащите стандарти БДС EN 1838:2013 [1] и EN 60598-2-22:2002 [2]. Тези стандарти определят изискванията за осветеността, вида, местонахождението, захранването и продължителността на светене на осветителите за пожаро и евакуационно осветление, инсталирани в сгради или помещения, където се изисква наличие на такива осветителни уредби.

2. ИЗИСКВАНИЯ ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ НА ЕВАКУАЦИОННИ МАРШРУТИ

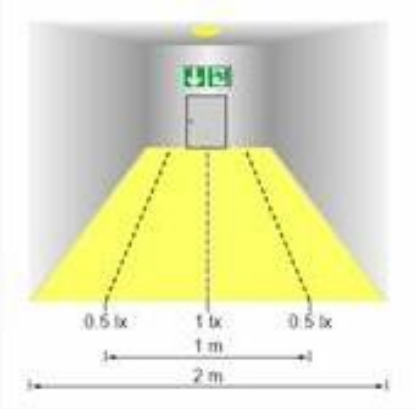
Изискванията се определят в зависимост от областта на приложение и характеристиките на заобикалящата среда. Примери за различна среда, където изискванията към осветлението са различни са: евакуационните маршрути, осветява-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

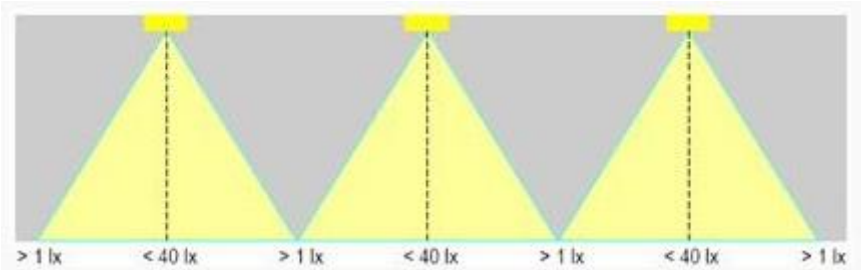
нето на зони с висок риск и осветлението против паника.
Светотехническите изисквания за осветление на евакуационни маршрути са:

- За евакуационен маршрут до 2 m широчина, хоризонталната осветеност върху пода по дължина на централната ос не трябва да е по-малко от 1 lx и 0,5 lx на разстояние 50% от широчината на маршрута. По-широки изходи могат да се разглеждат като няколко по-малки с широчина до 2 m или да се оборудват с осветител за отворено пространство.



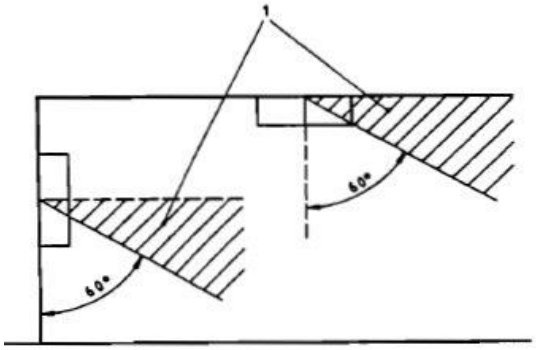
Фиг.1. Осветление на пътищата за евакуация

- Съотношението максимална към минимална осветеност да не е по-голямо от 40:1 по дължината на централната ос на евакуационния маршрут.



Фиг.2. Осветление на пътищата за евакуация

- Светлинния поток в зрителното поле трябва да бъде насочено така, че да се избягва заслепяване. Интензитетът на светлината не трябва да надвишава стойностите в табл.1 в границите от 60 º до 90 º спрямо вертикалната ос. Високият контраст между осветител и фон може да предизвика заслепяване. Проблем при евакуационното осветление е това, че яркостта на осветителя може да предизвика заслепяване и да попречи да се видят препятствията и табелите.



Фиг.3.

Табл. 1

Стойности на максимален интензитет.

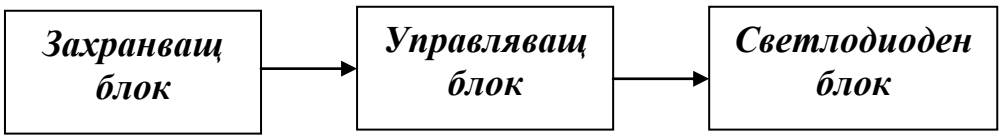
Височина на монтаж на авариен осветител, m	Максимален интензитет Imax, cd
h <2,5	500
2,5 ≤ h < 3,0	900
3,0 ≤ h < 3,5	1600
3,5 ≤ h < 4,0	2500
4,0 ≤ h < 4,5	3500
h ≥ 4,5	5000

- Индексът на цветопредаване да е не по-малък от 40 (Ra ≥ 40).
- Минималната продължителност на светене на аварийния осветител да не е по-малко от 1 h.
- Трябва да се достигне 50% от необходимия светлинен поток 5 s след включването на аварийния осветител и 100% от необходимия в рамките на 60 s. Светлинния поток не трябва да пада под 50% от началния, установен 60 s след изключване на мрежовото напрежение.

Според действащите стандарти, критичните местата, на които се поставят осветители за евакуационни маршрути са [1, 2]: а) Близо до всяка изходна врата, предназначена да бъде използвана при непредвидени обстоятелства; б)На всяко място, където се намира противопожарна екипировка или телефонна кабина; в) По отношение на стълбищата, изискванията са много строги: - Необходимо е всяко стъпало да бъде осветено от директно насочена светлина; - Означаването и осветяването е задължително и при всяка промяна в нивото на пода. г) При всяка промяна на посоката на маршрута; д) При пресичане на коридори; е) При всеки външен (последен) изход; ж) Пред вратите на асансьорни кабини; з) Ескалатори; и) Покрити паркинги; й) Тоалетни за инвалиди; к) Места със специална апаратура.

3. РАЗРАБОТВАНЕ НА МАКЕТ НА ОСВЕТИТЕЛ ЗА АВАРИЙНО И ЕВАКУАЦИОННО ОСВЕТЛЕНИЕ СЪС СВЕТЛОДИОДИ

Устройството на този осветител може да се раздели основно на следните три части (фиг4.):



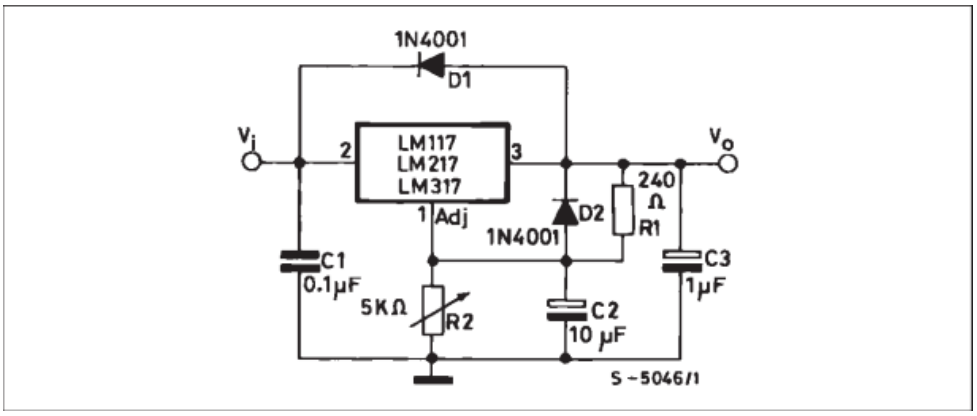
Фиг. 4. Блокова схема на макета

а) ***Захранващ блок***. Изпълнява ролята на понижаващо напрежението устройство. Съставен е от интегрална платка с нужните компоненти. Целта му е да понижи напрежението от мрежата до напрежение, необходимо за работата на управляващия блок и компонентите в него. Основен елемент на захранващия блок е трансформаторът със следните параметри: напрежение на първичната намотка 230 V; напрежение на вторичната намотка 28 V; ток на вторичната намотка 0,2 A. След трансформатора е изправителният блок или комбинирана мостова схема VD1÷VD4 (изправител-стабилизатор), изработваща правоъгълни импулси с амплитуда 5 V. В края на схемата се намира изглаждащият филтър, реализиран с кондензатора C1.

б) ***Управляващ блок.*** Функцията и предимствата на този блок са:

- Автоматично зареждане на батерията;
- Предпазване на батерията от презареждане;
- Автоматично включване на светлодиодния блок при прекъсване на основното захранване.

Осигуряване на необходимото напрежение за зареждане на батерията се осигурява от интегралната схема LM317T (фиг. 5) [3].



Фиг.5. Примерна схема на свързване на интегралната схема LM317T.

В зависимост от използваната батерия, чрез потенциометъра R_2 се регулира изходното напрежение, което може да варира в границите от 1,2 – 3,7V. При прекъсване на основното захранване, веригата на светлодиодния блок трябва да получи захранване от батерията и аварийното осветление да заработи. Това се случва благодарение на електромагнитното реле. То се захранва от 5V и е с два контакта, един нормално отворен и един нормално затворен.

Когато имаме напрежение, което да захранва уредбата, нормално затвореният контакт осигурява напрежение за зареждане на батерията. Когато нямаме мрежово напрежение релето превключва на нормално отворения контакт и батерията захранва светлинния източник.

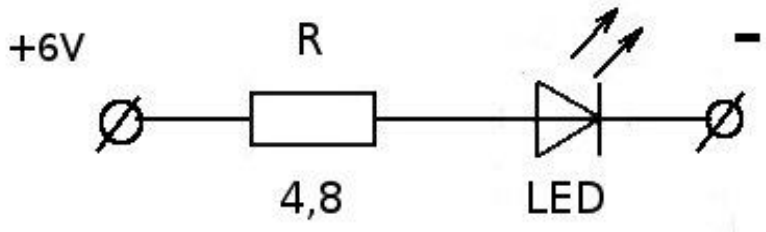
Батерията се зарежда в режим на токоограничаване. За правилното зареждане на батерията е необходимо, тя да се зарежда с ток, със стойност 1/10 от капацитета й. Този ток се осъществява от ограничаващия резистор R1 и диода D2.

Когато батерията е напълно заредена и достигне до напрежение около 4 V напрежението пада до стойности около 3,6÷3,8 V и тя остава в режим на подзаряд, тогава към нея протича достатъчно малък ток, който не може да повреди батерията.

По този начин батерията остава напълно заредена, без опасност от презареждане или повреда. Диодите D1 и D2 служат за предпазване на входа и изхода на интегралната схема от остатъчния заряд на кондензаторите C1, C2 и C3 .

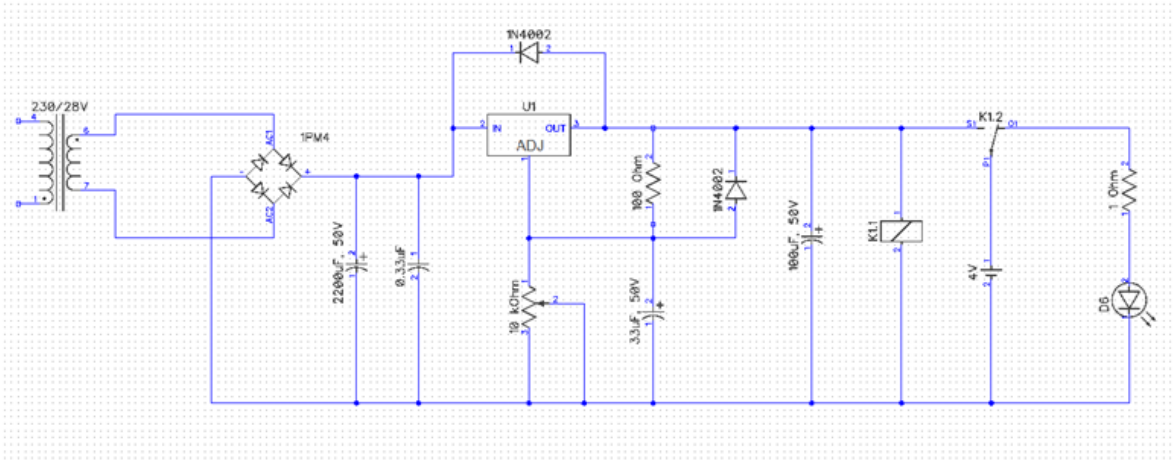
в) ***Светлодиоден блок.*** Този блок е реализиран чрез един светлоизлъчващ диод (СИД) с мощност 3W, с ъгъл на излъчване 120° и светлинен поток 180 lm. Светлодиодният блок се захранва от 3,6 V акумулаторна батерия с капацитет 2 Ah. Токът, който преминава през СИД трябва да се ограничи до 700 mA.

За реализиране на избрания работен ток е избран токоограничаващ резистор 4,8 Ω. Мощният светодиод е монтиран неподвижно в отвора на отражателя и е свързан с управляващия блок на платката.

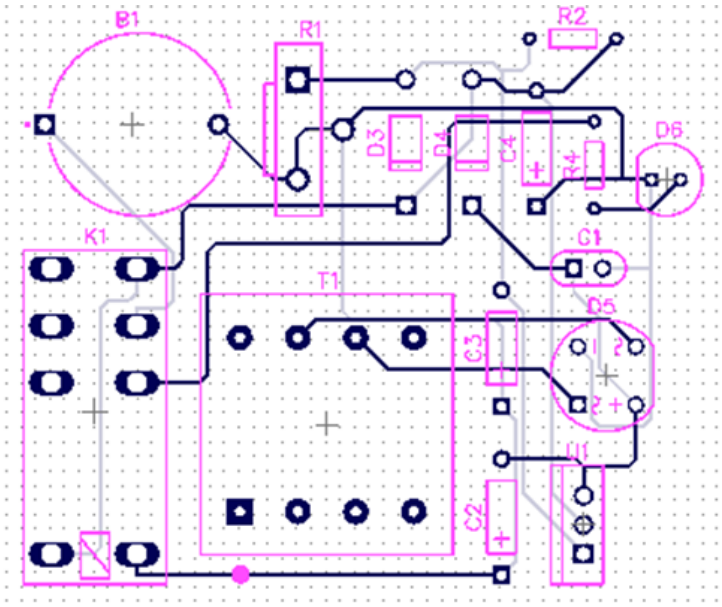


Фиг.6. Светлодиоден блок

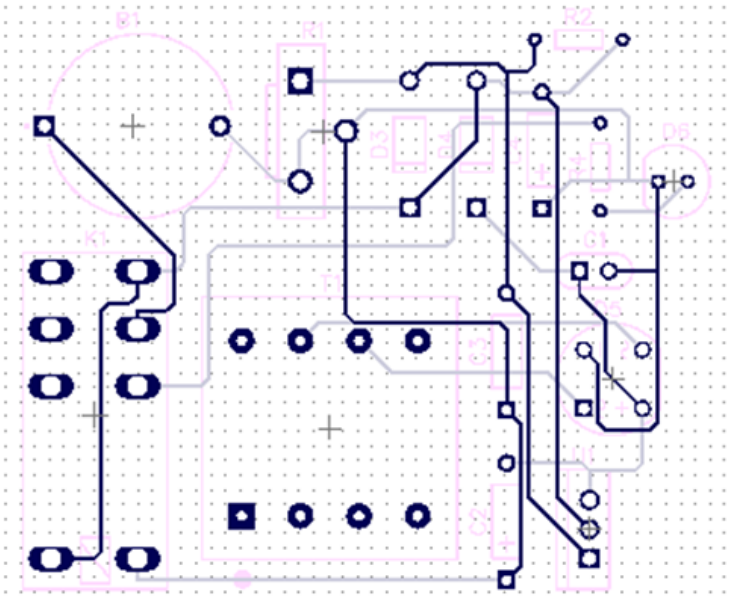
Схемите на свързване и на печатна платка са дадени на фиг.7, 8 и 9.



Фиг.7. Схема на свързване.



Фиг.8. Схема на свързване на печатна платка (*страна 1*).



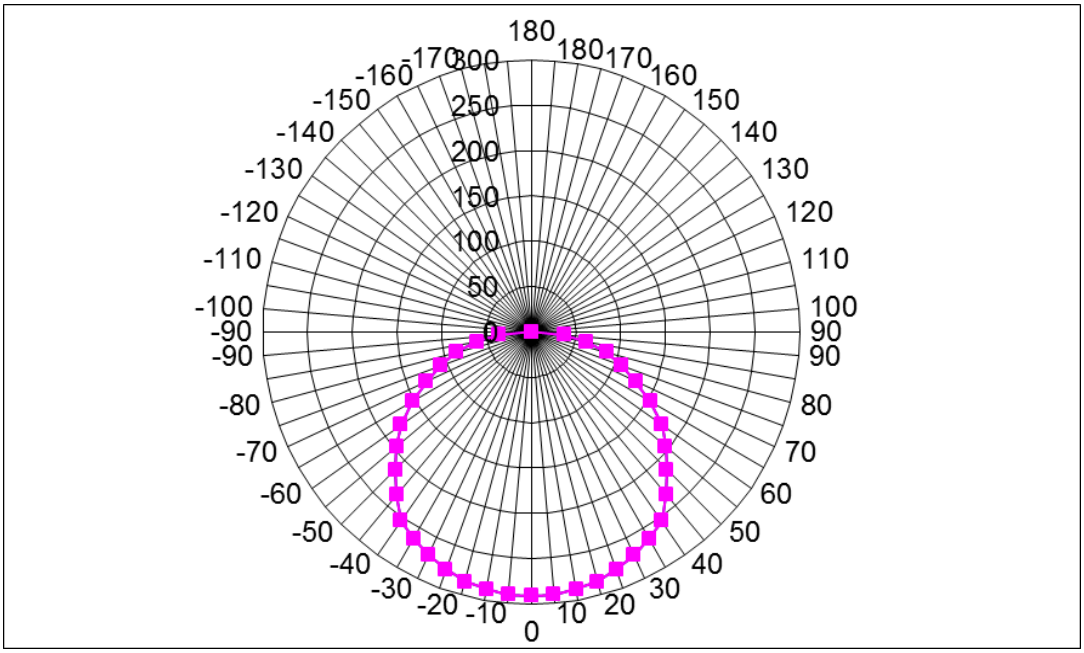
Фиг.9. Схема на свързване на печатна платка (*страна 2*).

Конструкцията на разработеният евакуационен осветител се състои от следните компоненти:

- *Отражател*, който е покрит с алуминиево фолио с проекция в хоризонталната равнина с размери 4x5 cm. Двете успоредни страни имат предназначението да насочват светлинният поток така, че да се реализира широка светлоразпределителна крива [4]. На горната страна на отражателя е пробит кръгъл отвор с диаметър 6 mm, където е поставен светлодиода.
- *Корпус и капак*. Изработен е от пластмаса. Капакът затваря корпуса от горната му страна и се закрепя към него чрез три болта с диаметър 4 mm.
- *Интегрална схема*. Изпълнява функциите на захранващ блок.
- *Батерия.* Акумулаторнатаа батерия с напрежение 3,6 V и капацитет 2 Ah. Свързвана е към управляващия блок чрез кабели и е запоена за платката.
- *Радиатор* (пасивно охлаждане). Между светлодиода и радиаторът е нанесена термо паста за по-добро отвеждане на топлината.
- *Тестов бутон*. Симулира отпадане на захранването от мрежата.

На фиг.10 е показана измерената светлоразпределителната крива (СРК) на осветителят за аварийно и евакуационно осветление, cd/klm.

Характеристиките на разработеният осветител са дадени в табл.2.



Фиг.10. Светлоразпределителната крива на осветителя.

Табл.2

Техническа характеристика на светлодиодния осветител

Режим	Автономен
Охлаждане	Пасивно, алуминиев радиатор
Мощност на осветителя	< 5 W
Номинален ток	200 mA
Номинална мощност на СИД	3 W
Номинален ток на СИД	750 mA
Номинално напрежение на СИД	3,4÷3,6 V
Номинално напрежение на батерията	3,6 V
Капацитет на батерията	2 Ah
Светлинен източник	Power LED
Цвят	Бял
Номинален светлинен поток	≥180 lm
Степен на защита	IP20

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработен и изследван е осветител със светлоизлъчващи диоди (СИД) за аварийно и евакуационно осветление. Предназначението му е да осигури необходимата осветеност върху евакуационния маршрут в случай на авария или отпадане на основното захранване. Осветителят е разработен съгласно изискванията на БДС EN1838. Той е с автономен източник на захранване, който позволява да работи в авариен режим минимум един час Осветителят включва осветлението при необходимост и автоматично зарежда акумулаторната батерия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 1838:2013, ***Приложения на осветлението. Аварийно и евакуационно осветление .***

[2] БДС EN 60598-2-22, ***Специфични изисквания за осветители за аварийно осветление.***

[3] Alldatasheet.com – ***Fairchild/STMicroelektronics***

[4] Айзенберг Ю.Б., ***Справочная книга по светотехнике М., Энергоатомиздат, 1983.***

Автор: Захари Иванов, проф. д-р, кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Радослав Кючуков

СИСТЕМА ЗА ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЕНИЕ НА ВЛАКОВОТО ДВИЖЕНИЕ

Емилия Димитрова

Резюме: *В работата е извършен анализ на особеностите на системите за контрол и управление на обекти в железопътния транспорт. Конкретизирани са структурата, функциите и апаратурата при реализация на система за дистанционно управление и мониторинг на влаковото движение. На този принцип могат да бъдат изградени и системи за дистанционно управление, базирани на съществуващите системи за локално управление на съоръженията.*
Ключови думи: *SCADA -системи, влаково движение, диспечерско управление*

SYSTEM FOR REMOTE CONTROL OF THE TRAIN TRAFFIC

Emiliya Dimitrova

Abstract: *An analysis of the specific characteristics of the systems for control and management of objects in railway transport is made in this paper. The structure, functions and equipment, which should be implemented in a system for remote control and monitoring of train movements, are specified. Systems for remote control and management based on existing systems for local control on facilities could also be built on the same principle.*
Keywords: *SCADA-systems, railway traffic, dispatcher control*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Внедряването на ERTMS/ETCS ниво 1 на железопътните линии по основните трансевропейски коридори на територията на България е от съществено значение за приобщаване на нашата страна към европейската транспортна система. За тази цел е необходимо изграждане на системи за отдалечен мониторинг и дистанционно управление на движението в железопътните участъци по основните направления.

Предмет на настоящия доклад е обстойното анализиране на особеностите на системите за контрол и управление на обекти в железопътния транспорт, разработването на конкретна система и анализ на възможностите за изграждане на системи за дистанционен мониторинг и контрол на базата на съществуващите системи за локално управление на съоръженията.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. СТРУКТУРА НА СИСТЕМИТЕ ЗА ДИСТАНЦИОНЕН КОНТРОЛ И УПРАВЛЕНИЕ

Обектите в транспорта представляват съвкупност от множество отделни елементи (подобекти), които са раздалечени един от друг на различни малки или големи разстояния. Характеризират се с физически, географски, логически и др. зависимости и с множество от взаимно въздействащи си компоненти. През последните години по целия свят рязко нарасна интересът към построяването на високоефективни и високонадеждни системи за автоматизирано управление и контрол на обектите в транспорта с ограничено участие на човека. Операторът и системите за управление се намират в Централен диспечерски пункт (ЦДП) и е необходим непрекъснат обмен на информация между тях и контролираните обекти. Предпоставки за все по-широкото внедряване на системи за дистанционен контрол и управление са значителният прогрес в областта на изчислителната техника, програмното осигуряване и телекомуникациите, което разширява сферата и увеличава възможностите за въвеждане на диспечерско управление, както и развитието на информационните технологии, повишаването на степента на автоматизация и преразпределението на функциите между човека и информационно-изчислителните комплекси, което облекчава до голяма степен взаимодействието между оператора и системата за управление.

За автоматизирано управление на сложни динамични процеси в жизнено важни области от гледна точка на безопасността и надеждността, какъвто е транспортът, се построяват високоефективни и високонадеждни SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) – системи за диспечерско управление и събиране на данни от териториално отдалечени обекти. Това са адаптивни централизирани системи – в ЦДП се извършва централизирано наблюдение и контрол на състоянието на обектите в реално време, както и обработка на алармите. Информацията се предава по комуникационна мрежа, покриваща големи разстояния [1].

Обобщената структурна схема на система за дистанционен контрол и управление включва следните основни елементи:

- полеви обекти – отдалечените устройства, които подлежат на дистанционен мониторинг и контрол. Това са сензори и интелигентни измервателни устройства (чрез тях се получава информация за състоянието на обектите), изпълнителни механизми (серводвигатели, актуатори, клапи, прекъсвачи, интелигентни управляващи устройства и др.), програмируеми логически контролери PLC.

- управляващо устройство, разположено в ЦДП;

- оптична преносна среда за осъществяване на комуникацията между полевите обекти и ЦДП. Внедряват се устройства, осъществяващи отворени комуникационни мрежи (OTN)л

PLC (Programmable Logic Controller) са програмно-управлявани електронни системи за събиране на информация и за логическо управление на технологични процеси и съоръжения чрез цифрови и аналогови входове и изходи. Съвременните PLC са сложни микропроцесорни системи, с изключителна функционал-

ност и комуникативност, реализират управление на локално ниво, изпълняват и защитни функции. Внедряват се унифицирани устройства с възможност за разширяване на конфигурацията чрез добавяне на допълнителни модули – осигурява се лесна замяна в случай на отказ или при необходимост (например при добавяне на нови информационни точки или контролируеми обекти).

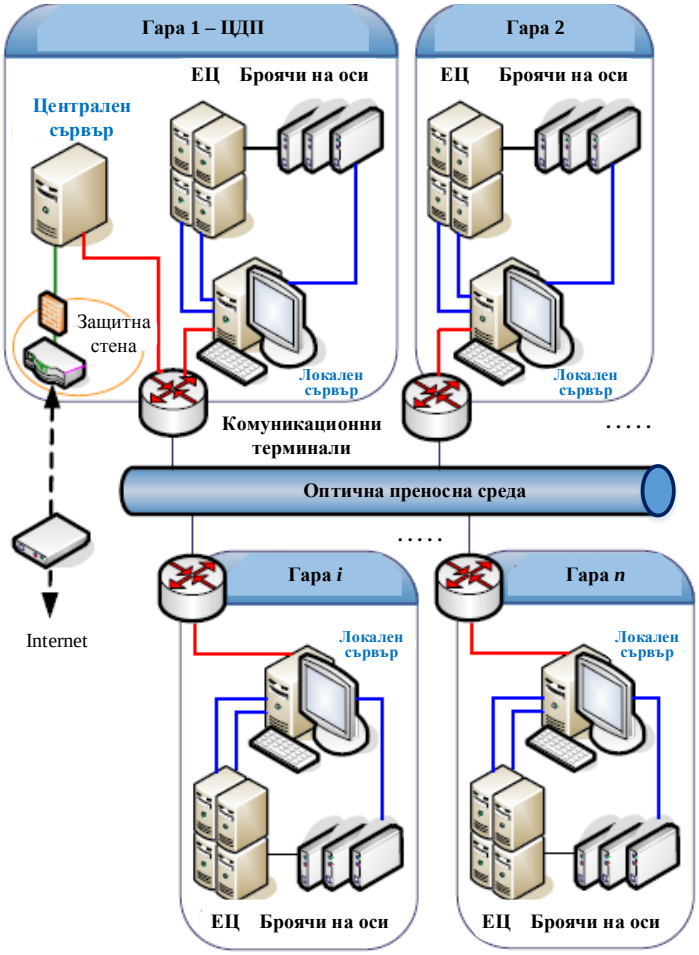
3. СИСТЕМА ЗА ДИСТАНЦИОНЕН КОНТРОЛ И УПРАВЛЕНИЕ НА ВЛАКОВО ДВИЖЕНИЕ

Реконструкцията и електрификацията на железопътната линия Пловдив – Свиленград и разработването и внедряването на система за дистанционен мониторинг и управление на влаково движение имат за цел подобряване на инфраструктурата и увеличаване на скоростта на движение до 160 км/ч за пътническите влакове (200 км/ч за влакове с накланящи кошове) и 120 км/ч за товарните влакове, както и инсталиране на оборудване за сигнализация и изграждане на целия участък (включително до границите на България с Турция и Гърция) в съответствие с принципите на ETCS, ниво 1 [2, 3]. Монтирани са SCADA-системи за управление и мониторинг на тягови подстанции в участъка и за централизиран контрол и управление на трафика. Реконструираното трасе е 96,5 км; инсталирана е 100,2 км контактна мрежа; премахнати са 20 прелеза; обновена е сигнализацията на 7 гари. Предвидена е GSM-R комуникация.

Системата за оперативно управление на влаковото движение е показана на фиг.1. Разработена е на базата на електронната гарова централизация (ГЦ) LockTrac 6131 (ELEKTRA), но работи с различни типове ГЦ (релейни и електронни). Въз основа на оперативните функции на ELEKTRA и с добавен набор от надграждащи функции е синтезирана система за централизирано управление на трафика (ELEKTRA – CTC). Тя е инсталирана в ЦДП близо до Пловдив. Нейните характеристики осигуряват висока ефективност и рационалност в работата на диспечера при организацията на движението по участъка. В ЦДП се изобразява цялата линия с всички прилежащи гари върху контролен дисплей. Местоположението на влаковете по участъка се контролира с броячи на оси.

В общия случай в гарите с отдалечено управление не са необходими контролни дисплеи, човеко-машинен интерфейс (MMI) и експлоатационен персонал (фиг.2). Към електронната ГЦ се интегрира интерфейсно устройство SSU, състоящо се от Remote Control Unit за приложения (RCU – Устройство за отдалечено управление) и Serial Control Unit за комуникация (SCU – Устройство за серийно управление). На всяка гара се инсталират Централен контролер (CC) и процесор за диагностика (DGP), както и компютър със софтуера Webride. SSU се свързва чрез локална мрежа към CC и DGP, както и чрез Ethernet – към системата в ЦДП.

Ако прилежаща гара е оборудвана с ГЦ от друг тип, към нея се интегрира специално приспособително съоръжение (AdaptationUnit), което позволява осъществяването на комуникацията с ЦДП.



Фиг.1. Структурна схема на системата за управление на влаковото движение

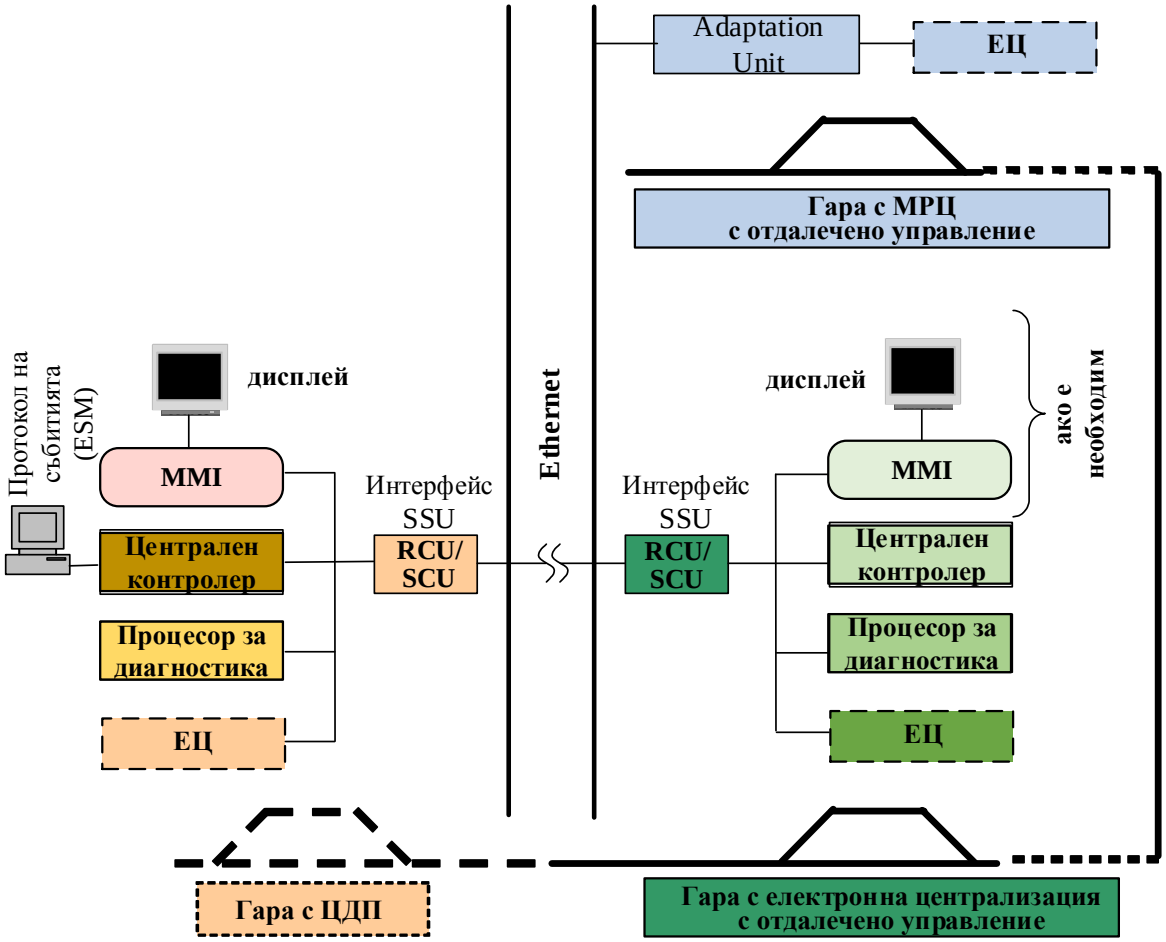
Конфигурацията на системата за дистанционно управление на отдалечени гари може да работи в два управляващи режима: местно управление (МУ) и отдалечено (диспечерско) управление (ДУ). Активният режим се изобразява чрез икона на дисплея в ЦДП и на локалния дисплей (ако е инсталиран).

В режим МУ гарата се командва чрез локалната гарова централизация посредством собствения ѝ пулт за управление (в случай на електронна централизация той се състои от ММІ с дисплей). Управлението на гарата от ЦДП не е възможно, но всички промени в състоянията на пътните елементи, влаковите маршрути и т.н. се предават от локалната гарова централизация към ЦДП и там се изобразяват на дисплея. При активен режим "МУ" само следните управляващи команди от ЦДП ще бъдат възприемани:

- Управляващи команди от системата за автоматично нареждане на маршрути (диспечерът е отговорен за евентуалното ѝ прекъсване);
- Смяна на режима на управление на "ДУ".

Всички други команди от ЦДП ще бъдат отхвърляни.

В режим ДУ гарата се командва чрез пулта за управление в ЦДП и управлението ѝ от локалния пулт е невъзможно. Всички управляващи команди от ЦДП, обаче, ще бъдат подлагани на проверка за допустимост от логиката на взаимозависимостите на локалната гаровата централизация в прилежащата гара.



Фиг.2. Системен преглед на обвръзката между гарите
(с електронна централизация или с централизация от друг тип)

Всички контролирани команди от ЦДП ще бъдат записвани на свързаната електронна система за съхранение на данни (ESM). При активен режим “ДУ” само следната управляваща команда, изпратена от някоя гара към ЦДП ще бъде възприета:

• Смяна на режима на управление на “МУ”.

Ако дадена гара няма връзка с ЦДП, на дисплеите в прилежащата гара и в ЦДП ще се появи съобщение “Нарушен интерфейс“ и местният оператор може да превключи режима на управление на “МУ”.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизацията на железопътните линии по основните трансевропейски коридори на територията на Р. България е от съществено значение за приобщаване на нашата страна към европейската транспортна система. От голямо значение е изграждане на системи за отдалечен мониторинг и дистанционно управление на движението в железопътните участъци по основните направления. SCADA – системите постепенно изместват класическите системи за дистанционно управление в транспорта. Те представляват комплекс от технически средства за водене на технологичните процеси при всички режими с определени технико-икономически показатели.

В работата е разгледана такава система, разработена за управление и контрол на влаковото движение в участъка Пловдив – Свиленград. Апаратурата се интегрира към гаровата централизация и се свързва към гаров контролер. Посредством комуникационен терминал и оптична преносна среда се предават информация и команди между ЦДП и гарите. Системата се отличава със следните характеристики:

- Висока степен на интегриране към вече съществуващите системи;
- Съхраняване, обработване, класифициране и визуализиране на голямо количество база данни в реално време;
- Съвременна диагностика, оптимална поддръжка и експлоатация на съоръженията;
- Значително намаляване на работни разходи, разходи за монтаж, окабеляване и поддръжка;
- Високо надеждна, самоосигуряваща се мощностна система – бърза реакция в реално време на събитията със съответните действия;
- Осигурява непрекъснато поддържане на технологичните показатели, повишаване на безопасността, предотвратяване на произшествия, аварии и др.

Изграждането на системи за дистанционен мониторинг и контрол на гари по даден жп участък ще позволи в бъдеще създаването на система за наблюдение на железопътната мрежа на страната.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Горанов Е., Е.Димитрова (2010), ***Системи за дистанционен контрол и управление в транспорта***, София, ВТУ, 2010

[2] Plovdiv-Svilengrad Railway Electrification & Upgrading of Corridors IV & IX Signaling, Telecommunication and SCADA Systems for the whole line, Thales – Alcatel-Lucent, Sofia, 2011

[3] ОП "ТРАНСПОРТ" 2007-2013 – приоритетни оси, available at: http://www.optransport.bg/page.php?c=24

Автор: Емилия Димитрова, доцент, д-р, кат. „Съобщителна и осигурителна техника и системи”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“-София, E-mail adress: *edimitrova@bitex.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Иван Ангелов

АРХИТЕКТУРА НА СОФТУЕРА НА СИСТЕМА ЗА ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЕНИЕ НА ВЛАКОВОТО ДВИЖЕНИЕ

Емилия Димитрова

Резюме: *В доклада са дефинирани функциите и основните задачи на система за дистанционно управление на влаковото движение, конкретизирани са изискванията и функциите на програмното осигуряване, въз основа на които е синтезирана архитектурата на софтуера. Уточнени са възможностите за обезпечаване на висока надеждност.*
Ключови думи: *SCADA -системи, влаково движение, диспечерско управление, архитектура на софтуера*

SOFTWARE ARCHITECTURE OF A SYSTEM FOR REMOTE CONTROL OF THE TRAIN TRAFFIC

Emiliya Dimitrova

Abstract: *Functions and main tasks of the system for remote control of the train traffic are defined in this paper. Requirements and functions of the software are also specified, and the software architecture is synthesized based on them. Opportunities to ensure high reliability are specified.*
Keywords: *SCADA-systems, railway traffic, dispatcher control, software architecture*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Системите за оперативно диспечерско управление по същество са автоматизирани системи за управление: успоредно с автоматичните устройства в определени моменти се налага и прякото участие на човека в управлението на процесите. Развитието на информационните технологии, повишаването на степента на автоматизация и преразпределението на функциите между човека и информационно-изчислителните комплекси при съвременните системи за дистанционно управление в транспорта облекчава до голяма степен взаимодействието между оператора и системата за управление.

Реконструкцията и електрификацията на ж.п. линията Пловдив – Свиленград по коридори IV и IX включва монтиране на SCADA -системи за централизиран контрол и управление на трафика и за управление и мониторинг на тягови подстанции в участъка. В централния диспечерски пост (ЦДП) близо до Пловдив е инсталирана SCADA -системата ELEKTRA-CTC, която осигурява оперативно дистанционно управление на влаковото движение в целия участък [1]. Базирана

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

е на електронната гарова централизация LockTrac 6131 (ELEKTRA) и осигурява висока ефективност и рационалност в работата на диспечера при организацията на движението по участъка. В настоящия доклад са дефинирани функциите и основните задачи на системата за оперативно управление на влаковото движение, конкретизирани са изискванията и функциите на програмното осигуряване, въз основа на които е синтезирана архитектурата на софтуера.

2. ФУНКЦИИ НА СИСТЕМАТА ЗА ОПЕРАТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА ВЛАКОВОТО ДВИЖЕНИЕ

Основните задачи на SCADA – системата за централизиран мониторинг и управление на трафика ELEKTRA-CTC са [2, 3]:

- Изпълнение на команди по централизацииите в прилежащите гари и обработка на техните отговори;
- Подреждане и идентификация на влакови и маневрени маршрути;
- Контрол на заетостта на стрелки и коловози;
- Управление на стрелки, сигнали и мн. др.

Дисплеят в ЦДП в Пловдив изобразява целия участък Пловдив – Свиленград и показва статуса в реално време на контролираните елементи. Създадена е възможност за извеждане на акустични и визуални аларми, както и на диагностична информация. Ниво А (гарови централизации ELEKTRA и дисплей) има само в контролните гари. Обслужваемите пунктове са оборудвани с ниво В (гарови централизации). Необслужваемите пунктове имат само външни елементи.

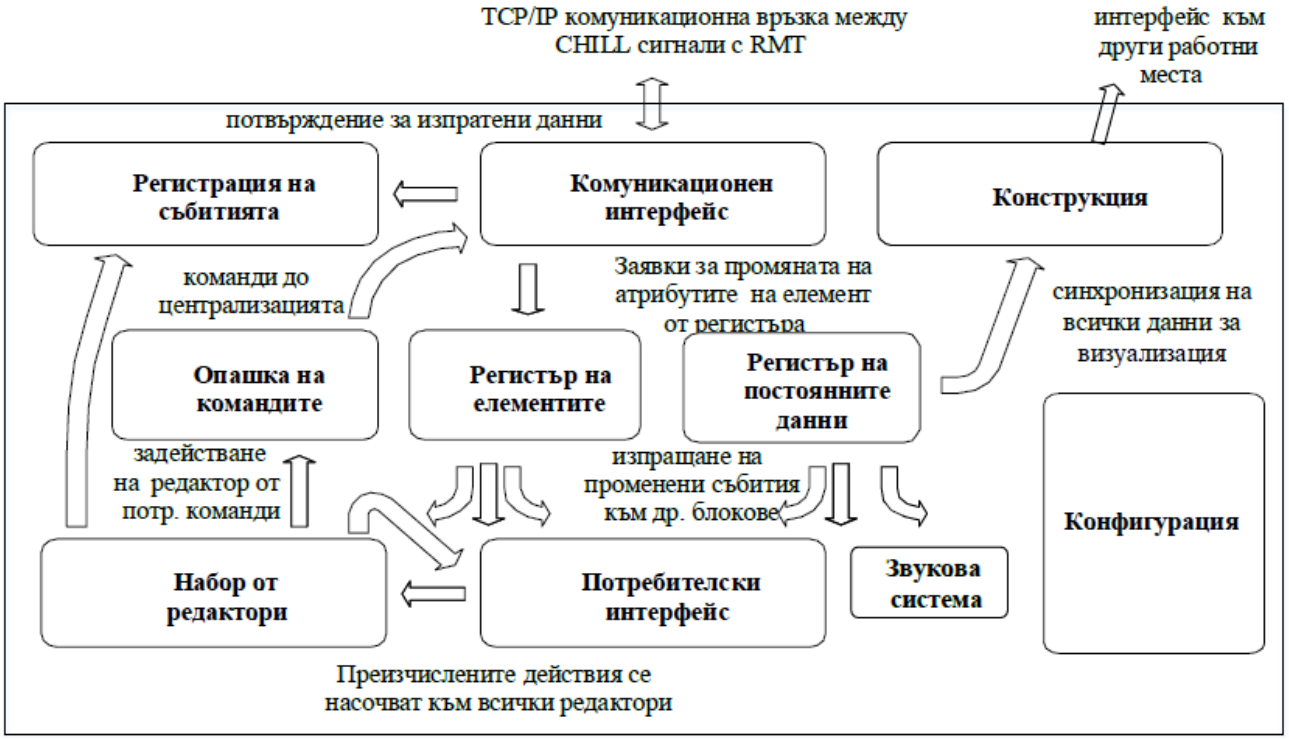
Гаровата централизация (ГЦ) позволява контролирането на всички сигнализационни функции. Може да контролира сигнали, стрелки, броячи на оси, вагоноизхвъргачки, блокове и прелези. Състои се от ядро от взаимно свързани компютри, докато експлоатационните и техническите функции се реализират от софтуера.

3. ФУНКЦИИ И АРХИТЕКТУРА НА СОФТУЕРА

Оперативните функции за дистанционно управление са проектирани чрез подходящо конфигуриране на софтуерните приложения. Използван е Chill (CCITT High Level Language) Език на високо ниво на Международния консултативен комитет по телеграфия и телефония, както и многозадачна операционна система в реално време (RMT – Real-Time Multi-Tasking Operating System) и стандартен протоколи за комуникация TCP/IP. Всички функционални компоненти са разработени на Java език, работят в Linux RTE (Real Time Environment) платформа и включват следните модули (фиг. 1):

- Конструкция – предоставя цялата необходима информация и извършва синхронизация на работните места;

- Комуникационен интерфейс – осигурява връзка между централизациите в гарите от участъка;



Фиг.1. Архитектура на софтуера.

- Регистрация на събитията – основен интерфейс за архивиране;
- Регистър на елементите – записва всички специфични данни на елементите и определя приоритета на съобщенията за статуса на съоръженията;
- Регистър на постоянните данни – съдържа данни, които трябва да се запазят след отказ;
- Потребителски интерфейс – обслужва интерфейсите с потребителите;
- Набор от редактори – графично представяне на състоянията на ГЦ;
- Звукова система – обслужва всички акустични сигнали;
- Конфигурация – специфични за системата конфигурационни данни.

SCADA-системата ELEKTRA-CTC, както и ELEKTRA във всяка прилежаща гара, отговарят на SIL 4, което осигурява еднакво безопасния характер на всички функции по управление в ЦДП и в гарите, оборудвани с ELEKTRA. Чрез този безопасен подход към всички съобщения и високоотговорни действия по управление е без значение откъде работи операторът и кой човеко-машинен интерфейс се използва за управление.

Безопасното действие на стандартен дисплей се постига чрез:

- Сравняване на графичната индикация на всеки елемент със съдържанието на текста, получен от командата “Състояние на обекта” (ASD - Alternative Status Display), което се нарича “Резултантен диверситет” (“Sequential Diversity”) или
- Изобразяване на очакваната графична индикация на елемента вследствие на действието на потребителя.

За целите на безопасността всеки елемент може да се провери по всяко време чрез командата “Състояние на обекта” (ASD).

Безопасен метод за подаване на команди: За критични команди се изобразяват текстови пояснения и (ако е необходимо) допълнително се появява подсещане с изискване за потвърждение (checkbox), които да направляват действията на оператора.

Не е необходимо да се доказва безопасността на мониторите, поради диверситетната индикация - графична и текстова.

Допълнителни функции (подсистеми) - включени са към системата със стандартни интерфейси:

- автоматично нареждане на маршрути (GRAULI),
- управление на влаковото движение (подготвяне и поддържане на разписанията - ARAMIS),
- пътническа информационна система (PIS),
- диагностичен процесор (DGP),
- Webride ПК (персоналенкомпютър с Java базирано приложение).

DGP подава диагностична информация от ГЦ към софтуера Webride ПК, инсталиран на централния и локалните сървъри. Това е платформа за събиране и съхранение на диагностична и оперативна информация от ELEKTRA и система броячи на оси. Събирането на тези данни може да послужи за тяхното възстановяване с цел дистанционно архивиране и оценка или за on-line наблюдението им с цел получаване на информация за необходимите текущи задачи по техническата поддръжка.

Функцията за автоматично нареждане на маршрути се задейства при заемане на пътен участък или от специален датчик. Функцията за идентифициране на влака се състои от индикация, обработка и предаване на номерата на влаковете. Въвеждането на номерата на влаковете може да се извършва в самата система или от външно съседно устройство, или от оперативен център от по-високо ниво. Допълнителните функции са съобразени със съвременните изисквания и намаляват напрежението при работата на оператора. Само при извънредни събития или ситуации като даване на "прозорци" се налага ръчно управление, така че нормално в ЦДП няма необходимост от разделяне на нивата на отговорност. Това гарантира бързото пренасочване на експлоатационния персонал към критични участъци без усложнени процедури за промяна на правата на управление.

Съвременните системи за мониторинг и диспечерско управление на транспортни средства са възстановими и работят в стационарен режим на откази и последващо възстановяване на работното им състояние [4, 5]. Надеждността им е висока благодарение на агрегатния принцип на изграждане, позволяващ високи показатели на унификация, технологичност в серийното производство, лесна промяна в конфигурацията и изменение на обема изпълнявани функции.

Предвид сложната многофункционална структура на такива системи е необходимо повишаване на надеждността им в две направления - на отделните компоненти и на системата като цяло. При тези системи могат да възникнат частични откази във функционирането на отделен елемент, които да не водят до отказ

на цялата система. Това често се гарантира чрез резервиране – метод за повишаване на надеждността с въвеждане на излишък [4]. Излишък е добавянето на допълнителни средства и възможности извън минималната необходимост за изпълнение на определените функции на системата. Системите се построяват по такъв начин, че никакви откази на един, два или повече елемента не довеждат до отказ на цялата система. Използва се още времево резервиране (предвижда се излишък от времето за разрешаване на даден проблем или за изпълнение на поставена задача), информационно (излишък на информация), функционално (използва възможността елементите да изпълняват допълнителни функции) и др. [4, 5].

Структурното резервиране е най-прост и ефективен метод. Различават се основен и резервен елемент. Основният е минимално необходимият за работа на системата и за изпълнение на поставените функции. Резервният елемент е предназначен да обезпечи работоспособността на системата при отказ на основния.

По начина на монтиране на резервните елементи се различават следните видове резервиране:

- Постоянно резервиране – резервните елементи участват в работата на системата наравно с основния;
- Резервиране със заместване – функциите се предават на резервния само когато основният откаже;
- Плаващо резервиране – група от основните елементи на системата се резервират с един или няколко резервни елемента, всеки от които може да замени който и да е отказал елемент от групата.

Замяната трябва да бъде автоматична. При резервирането със замяна и плаващото резервиране се различават натоварен, облекчен и ненатоварен резерв според начина на включването му:

- При натоварения резерв резервният елемент се намира в същия режим като основния, интензивността на отказите при тях е еднаква.
- При облекчения резерв резервният елемент се намира в по-малко натоварен режим, т. е интензивността на отказите при него е по–малка от тази на основния.
- Ако резервният елемент е ненатоварен, то неговата интензивност на отказите е равна на интензивността при съхранение, която обикновено е пренебрежимо малка в сравнение с тази на основния елемент.

На работното място на влаковия диспечер трябва да бъдат инсталирани два функционално независими компютъра с видеотерминали, които да работят в постоянен режим, но могат да осъществят функционално резервиране. За сметка на интензивността на работата по време на възстановяване, основните функции на управление на движението могат да се осъществят само чрез един компютър. По този начин се осъществява поелементно резервиране, горещ резерв, ограничено възстановяване (една ремонтна бригада).

4. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всички важни устройства са с излишък и не е необходимо постоянно дежурство на поддържащ персонал.

За предоставяне на доказателствен материал всички критични управляващи действия се съхраняват в електронен носител за съхранение (ESM) на СТС със съответния маркер за време и идентификатор на работната станция, за да може да се определи коя команда е била въведена и от коя работна станция.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Димитрова Е. (2010), ***Система за дистанционно управление на влаковото движение,*** VIII научна конференция ЕФ 2016, Варна, „Св. св. Константин и Елена“, 12 – 15.09.2016

[2] Plovdiv-Svilengrad Railway Electrification & Upgrading of Corridors IV & IX Signaling, Telecommunication and SCADA Systems for the whole line, Thales – Alcatel-Lucent, Sofia, 2011

[3] ОП "ТРАНСПОРТ" 2007-2013 – приоритетни оси, available at:

http://www.optransport.bg/page.php?c=24

[4] Христов Х., В.Трифонов (2005), ***Надеждност и сигурност на комуникациите***, Нови знания, София, ISBN 954-9315-43-6, 2005

[5] Сапожников В. В., Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов (2003), ***Надежность систем железнодорожной автоматики телемеханики и связи***, Москва, 2003

Автор: Емилия Димитрова, доцент, д-р, кат. „Съобщителна и осигурителна техника и системи”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“-София, E-mail adress: *edimitrova@bitex.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Иван Ангелов

ИЗРАБОТВАНЕ И ПРЕДВАРИТЕЛНИ ИЗПИТАНИЯ НА ПРОТОТИП НА ЛИНЕЕН РЕАКТОР

Васил Димитров, Веселин Донков, Гюлек Неджиб

Резюме: *В доклада е разработен прототип на линеен реактор, който ще бъде внедрен в силовата схема на мотрисен влак, захранван от контактна мрежа с напрежение 3 kV DC. Проведените предварителни изпитания са извършени и приети като успешни. Може да се пристъпи към изпитания на сглобеното изделие, съгласно съгласуваната тестова програма.*
Ключови думи: *линеен реактор, дросел, предварително тестване, тягови асинхронни задвижвания*

CONSTRUCTION AND PRELIMINARY TESTING OF A PROTOTYPE OF A LINE REACTOR

Vasil Dimitrov, Veselin Donkov, Gyulek Nedzhib

Abstract: *A prototype of a line reactor, which will be implemented in the power circuit of multiple-unit train powered by catenary 3 kV DC, was developed in the paper. Preliminary tests were carried out and accepted as successful. The testing of the assembled device can commence according to the coordinated test program.*
Keywords: *line reactor, choke, preliminary testing, traction asynchronous drives*

1. НЕОБХОДИМОСТ ОТ ИЗДЕЛИЕТО И ТЕХНИЧЕСКИ ИЗИСКВАНИЯ

Линейният реактор (дросел) ще бъде внедрен в силовата схема на локомотив или мотрисен влак, захранван чрез система за постоянен ток – контактната мрежа е с оперирщо работно напрежение от 3 kV. Задвижването ще се осъществява посредством асинхронни двигатели, управлявани с помощта на инвертори. Това са нов тип влакове за латвийските железници, които ще се използват за транспортиране на пътници на къси разстояния – от град до град.

В доклада е разработен прототип на желания тип линеен дросел по подготвена клиентска спецификация. Проведени са предварителни изпитания преди сглобяване на изделието.

Изискванията към разработката са уточнени в спецификация (табл. 1), предоставена от клиента, приложена е и програма за тестове [1-3]. Едва след успешното издържане на всички описани изпитания и одобрение от страна на клиента може да се започне серийното производство на този тип реактори.

Формата и големината на линейния реактор трябва да бъдат съобразени с мяс-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

тото, на което ще се монтира – на покрива на влака. Да се избегне възможността от попадане на сняг или вода в бобината на реактора по време на оперативен и установен режим (покой на превозното средство). Реакторът трябва да е снабден с температурен сензор, който да предотвратява нежелано прегряване. Трябва да отговаря на нормите за електромагнитна съвместимост. Диаграмата на линейния реактор при пълно натоварване е показана на фиг.1.

2. ПРЕДВАРИТЕЛНИ ИЗПИТАНИЯ ПРИ ИЗРАБОТВАНЕ НА ПРОТОТИП

След изработване на прототипа на реактора е необходимо той да бъде тестван съгласно приложената програма за тестове. Предварителните изпитания се провеждат преди импрегнация и сглобяване на изделието.

2.1. ИЗМЕРВАНЕ НА ВЪЗДУШНА ИНДУКТИВНОСТ НА БОБИНАТА

Измерването се прави преди бобината на реактора да бъде монтирана в казана, където има пакет ламели. Целта е проверка на номиналната индуктивност на реактора.

Зададените по тест програмата стойности са следните:

- Захранващо напрежение U = 315 V ± 10%; f = 50 Hz;
- Очаквана стойност на тока I = 38÷44 A;
- Очаквана стойност на индуктивността L = 25 mH ± 5 %.

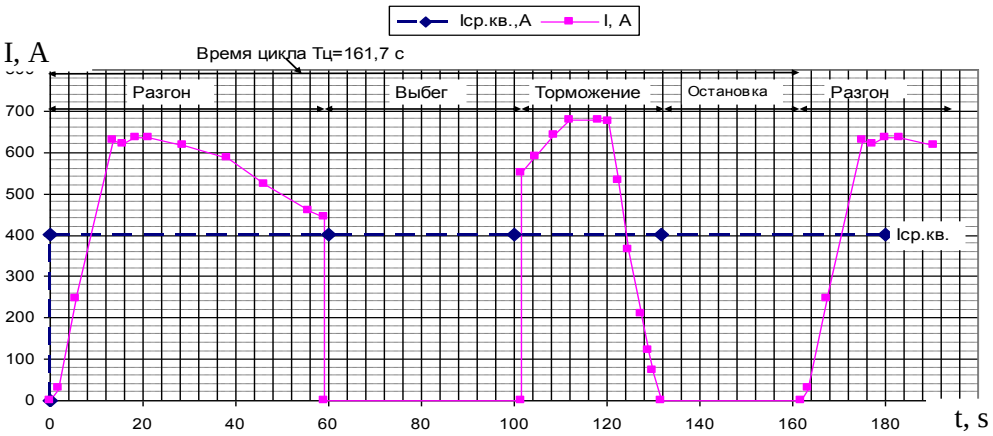
За изчисляване на индуктивноста се използва следната зависимост [1]:

$$L = \frac{U}{2\pi f I}, H \qquad (1)$$

Резултатите, получени при измерването, са показани в табл.2.

Изисквания към разработката **Таблица 1**

Параметри	Стойности
Номинално напрежение, V	3000
Върхово напрежение, V	4000
Номинално изолационно напрежение, V	4000
Постоянен ток в режим S1, A	400
Индуктивност на бобината, mH	25 (-0,5% +10%)
Инкрементал тест – стойност на тока, A	от 0 до 800
Охлаждане на реактора	Въздух– принуд.
Степен на защита на атм. смущения • Покритие на реактора • Изходи	 IP20 IP65
Външна работна температура Θ, °C, обхват	-40 ... +40
Максимална надморска височина, m	≤ 1400
Тегло на сглобен реактор, kg	≤ 800



Фиг.1. Диаграма на натоварване *I=f(t)* на линейния реактор при влак, движещ се със средна скорост $V_{техн.}$ = *82 km/h* на разстояние от *3 km*

Таблица 2

Изпитание на бобина с въздушна сърцевина

U	I	L	Θ
V	A	mH	°C
301,3	40,206	23,86	25
330,3	44,082	23,86	25
321,11	42,804	23,89	25
343,02	45,798	23,85	25

Стойностите на индуктивността при различно натоварване са в предвидените теоретично изчислени граници. Трябва да се има предвид, че това измерване е при т.нар. „въздушна индуктивност“ и е нормално да има малко отклонение от номиналната стойност на индуктивността на дросела.

2.2. ИЗМЕРВАНЕ НА ИНДУКТИВНОСТ НА БОБИНАТА ПРЕДИ ИМПРЕГНАЦИЯ

Импрегнацията на този реактор е двойна (строго определена от клиента) –два цикъла на импрегниране с лак „Долфон“ под налягане. Измерването се прави с цел проверка на индуктивността на сглобения реактор преди той да бъде импрегниран. Зададените по тест програмата стойности са следните:

- Захранващо напрежение U = 315 V ± 10%; f = 50 Hz
- Очаквана стойност на тока I = 37÷42 A
- Очаквана стойност на индуктивността L = 25 mH -0% +10%

Таблица 3

Изпитание на сглобен реактор, преди импрегнация, без вентилатор

U	I	L	Θ
V	A	mH	°C
301,34	37,575	25,54	25
315,34	39,327	25,54	25
320,49	39,987	25,52	25
331,88	41,367	25,55	25
339,16	42,3	25,53	25

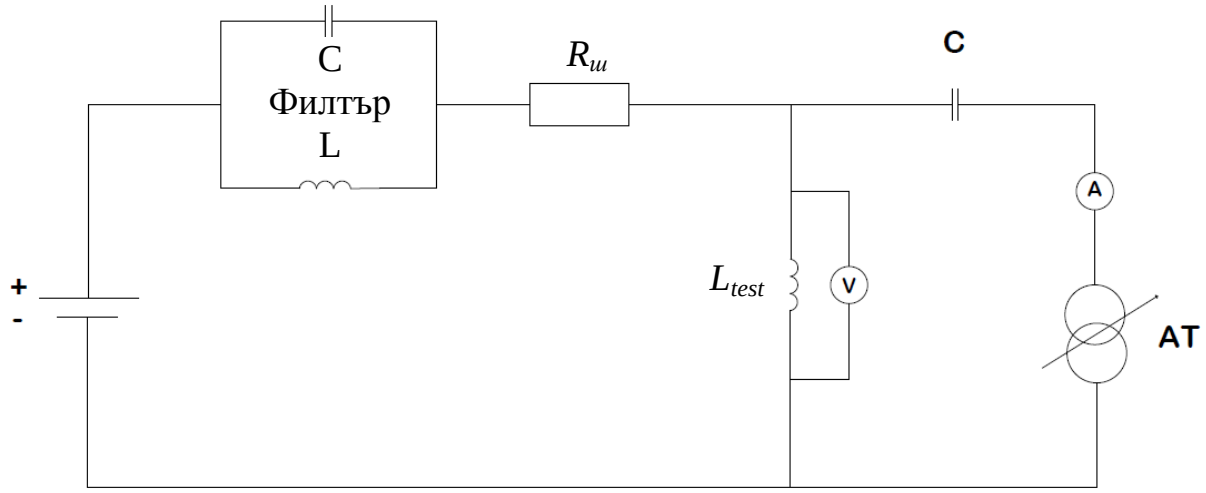
2.3. ИНКРЕМЕНТАЛ ТЕСТ НА РЕАКТОРА ПРЕДИ ИМПРЕГНАЦИЯ

Този тест се прави с цел да се провери дали е константна стойността на индуктивността L (от табл.3) при различна стойност на тока: реакторът се натоварва с ток, двойно по-голям от номиналния, на малки стъпки („инкрементал“ означава – с нарастване на стойността – фиг.2). По време на теста е необходимо реакторът да бъде охлаждан допълнително от вентилатор.

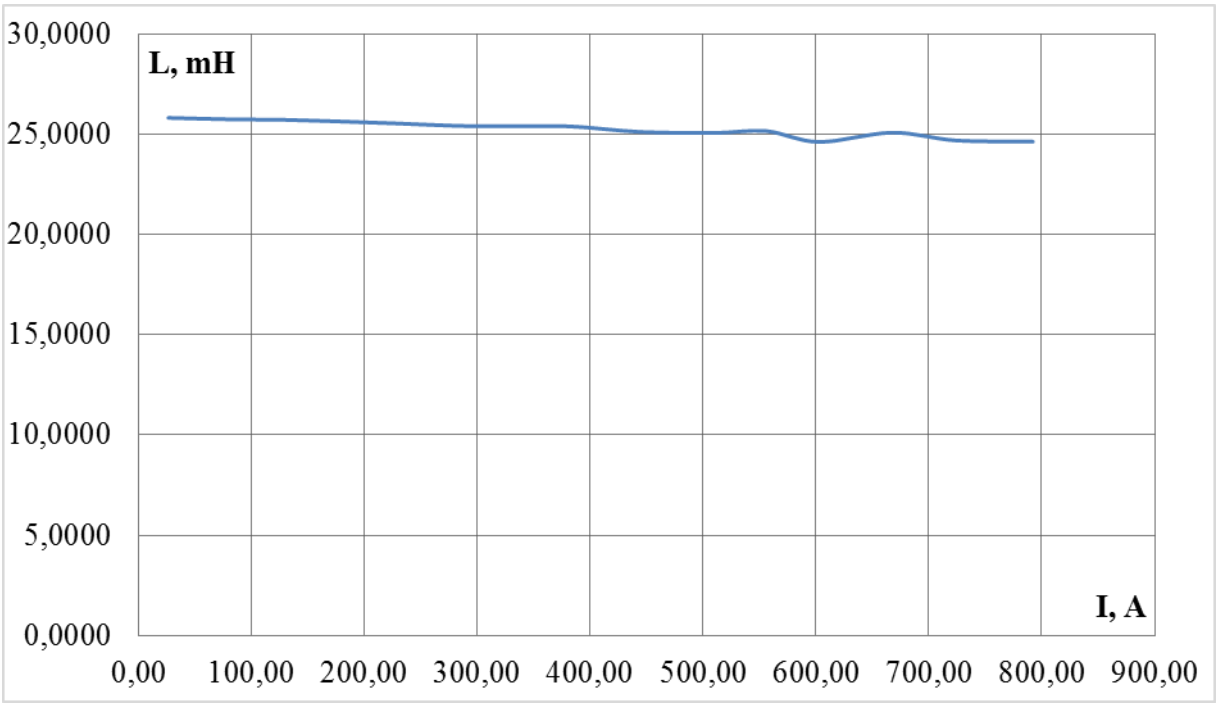
Зададените по тест програмата стойности са следните:

- Захранващо напрежение с f = 50 Hz (стойността се променя чрез автотрансформатор - латер);
- Очаквана стойност на тока I = 0 - 800 A;
- Очаквана стойност на индуктивността L = 25 mH -0% +10%.

Изменението на индуктивността в зависимост от тока е дадено на фиг.3.



Фиг.2. Схема на свързване за провеждането на „инкрементал“ тест



Фиг.3. Зависимост на индуктивността от тока преди импрегнация

Получените стойности след измерванията са приемливи и са в съответствие с предварително прогнозирания толеранс на изменение на индуктивността. От фиг.3 ясно се вижда изменението на индуктивността при различно натоварване. Не се забелязват прекалено много флуктуации. В противен случай щеше да е необходима корекция в дизайна на бобината.

2.4. Инспекция на размерите и теглото на реактора

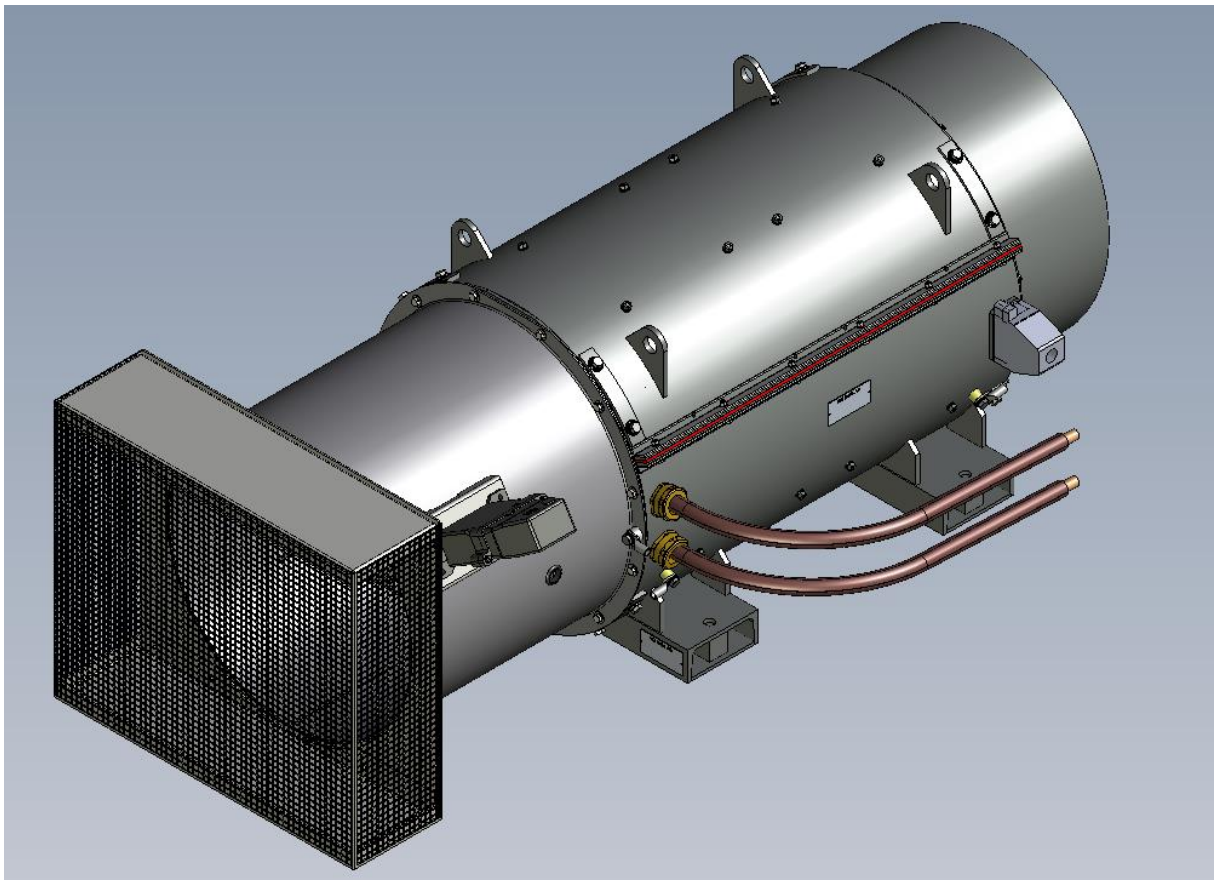
Съгласно тест програмата, следва проверка на всички размери на реактора и съ-поставка с чертежа за размерен контрол на сглобеното изделие (табл.4).

Триизмерен изглед на изпитвания прототип на линеен реактор е показан на фиг.4. Формата и размерите са съобразени с мястото, на което ще се монтира – на покрива на влака Очакваната стойност на масата на изделието е 690 кг, а действителната е доста по-ниска: 650 кг.

Таблица 3

Присъединителни и габаритни размери

1. Дистанция между присъединително отвори (широчина)	580±1 mm
2. Дистанция между присъединително отвори (дължина)	620±1 mm
3. Максимална дължина на изделието	1809±10 mm
4. Максимална широчина на изделието	605±4 mm
5. Планка „земно“/ маркировка	M10



Фиг.4. Прототип на линеен реактор

3. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изработването и монтажа на прототипа са направени незначителни корекции по разходната норма на използваните материали. Те са съгласувани със завода за мотрисни влакове, където ще бъде внедрен за производство. Проведените предварителни изпитания са извършени и приети от двете страни като успешни.може да се пристъпи към изпитания на сглобеното изделие, съгласно съгласуваната тестова програма.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Streicher J. T., ***Line Reactors and AC Drives***, Rockwell Automation, Mequon, Wisconsin, 2006

[2] ***Ръководство за тестване на индуктори и трансформатори***, ABB, 2013

[3] "Riga Electric Machine Building Works" (JSC RER) http://www.rer.lv/

Автори: Васил Димитров, доцент, д-р, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков"- София, E-mail adress: *vdimitroff@abv.bg;* Веселин Донков, инженер „АК Магнит АД"; Гюлек Неджиб, докторант, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков"- София

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Иван Костов

ИЗПИТАНИЯ НА ПРОТОТИП НА ЛИНЕЕН РЕАКТОР С ЦЕЛ ПУСКАНЕ В СЕРИЙНО ПРОИЗВОДСТВО

Васил Димитров, Веселин Донков, Гюлек Неджиб

Резюме: *В доклада е тестван прототип на линеен реактор, който ще бъде внедрен в силовата схема на мотрисен влак, захранван от контактна мрежа с напрежение 3 kV DC. Проведените изпитания след сглобяване и импрегниране на изделието са извършени и приети като успешни. Може да се пристъпи към серийно производство. Методиката за провеждане на изпитания може да бъде приложена при разработване на други изделия.*
Ключови думи: *линеен реактор, дросел, тестване, тягови асинхронни задвижвания*

TESTINGS OF A PROTOTYPE OF A LINE REACTOR AIMED AT PUTTING INTO PRODUCTION

Vasil Dimitrov, Veselin Donkov, Gyulek Nedzhib

Abstract: *A prototype of a line reactor, which will be implemented in the power circuit of multiple-unit train powered by catenary 3 kV DC, was tested in the paper. Preliminary tests before the prototype assembling and impregnation were carried out and accepted as successful. The production of the device can commence. The testing methodology can be applied in the development of other products.*
Keywords: *line reactor, choke, testing, traction asynchronous drives*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Линейният реактор (дросел) е предназначен за нов тип мотрисни влакове за латвийските железници. Серийното производство на такъв тип реактори може да започне едва след успешното издържане на всички тестове на изработен предварително прототип [1]. В доклада са представени проведените изпитания на прототипа след сглобяване и импрегниране на изделието, съгласно предварително съгласувана програма [2, 3]. Целта е да се провери дали прототипът удовлетворява техническите изисквания на завода-производител.

2. ИЗМЕРВАНЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕТО НА БОБИНАТА

Зададената по тест програмата стойност е R = 153.5 mΩ ± 5 % при околна температура $\Theta_{oc} = 20^0$C.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Действителната стойност на съпротивлението се определя по метода на амперметър и волтметър при протичане на постоянен ток през намотката. Резултатът от измерването е: I = 5 A; U = 0,75 V,

Следователно получаваме R = 150,4 mΩ при Θ_{oc} = 25^{o}C.

Съпротивлението на бобината на реактора е в норма.

3. ИЗМЕРВАНЕ НА ИНДУКТИВНОСТТА НА БОБИНАТА СЛЕД ИМПРЕГНАЦИЯ

След завършване на цикъла на импрегнация на реактора е необходимо да бъдат повторени някои от тестовете, направени преди импрегнация, с цел проверка на номиналните стойности на индуктивността на реактора за нежелани колебания след завършване на процеса по импрегниране със защитен лак.

Зададените по тест програмата стойности са следните:

- Захранващо напрежение U = 315 V $\pm$ 10%; f = 50 Hz
- Очаквана стойност на тока I = 36÷40 A
- Очаквана стойност на индуктивността L = 25 mH -0% +10%

Резултатите, получени при измерването, са показани в табл.1.

Индуктивността на реактора след импрегнацията му е без отклонение от препоръчаните стойности. Видно е, че дори при подаване на значително по-високо напрежение от допустимото индуктивността е в норма.

Таблица 1

Изпитание на сглобен реактор, след импрегнация, без вентилатор

U	I	L	Θ_{oc}
V	A	mH	^{0}C
101,37	12,626	25,56	25
200,32	24,017	25,6	25
300,83	37,49	25,55	25
315,78	39,296	25,59	25
401,48	49,961	25,59	25

4. ИНКРЕМЕНТАЛ ТЕСТ НА РЕАКТОРА СЛЕД ИМПРЕГНАЦИЯ

Този тест се прави с цел да се провери дали е константна стойността на индуктивността при различна стойност на тока (I_{DC} = 0÷800 A) и да се сравнят получените резултати с данните преди импрегнация. Отново е необходимо реакторът да бъде допълнително охлаждан по време на теста с цел предотвратяване на прегряване и пробив в изолацията

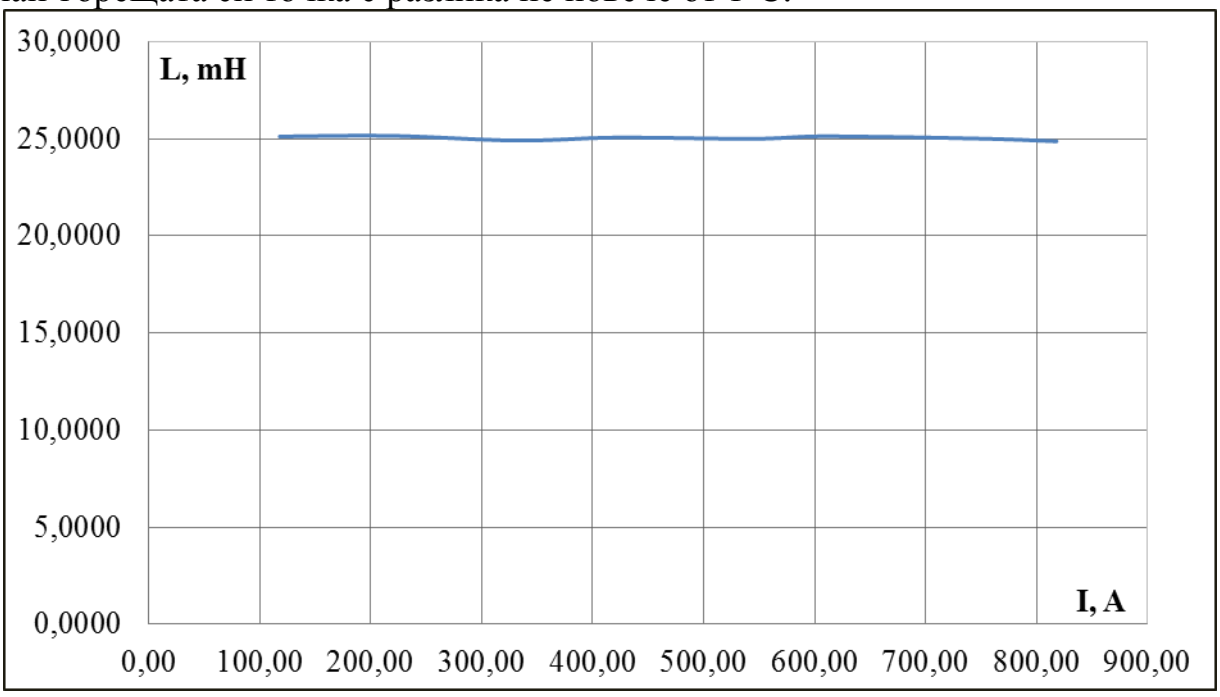
Изменението на индуктивността в зависимост от тока е дадено на фиг.1.

Получените стойности след измерванията отново са в граници, според теоретично изчислените. Тестът се счита за успешно проведен.

5. ТЕСТ НА ЗАГРЯВАНЕ НА РЕАКТОРА

При бобинирането са заложени термоелементи тип “K” в бобината, които могат

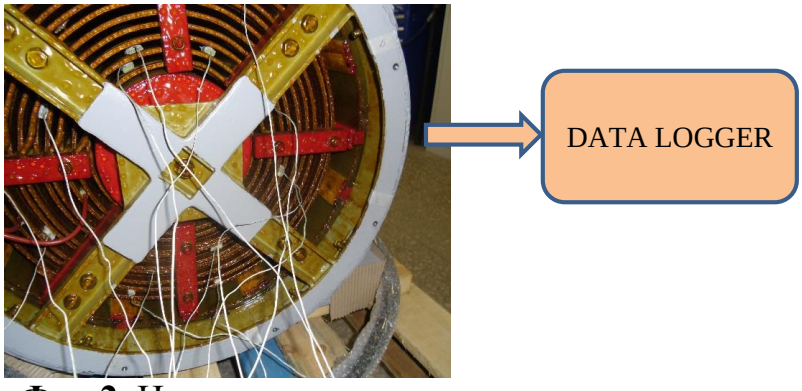
да се използват за подаване на сигнал към измервателен уред. Тестът се провежда на закрито при постоянна околна температура в помещението. Счита се за успешно проведен, ако изпитваният обект задържи за време 1h температурата в най-горещата си точка с разлика не повече от 1°C.



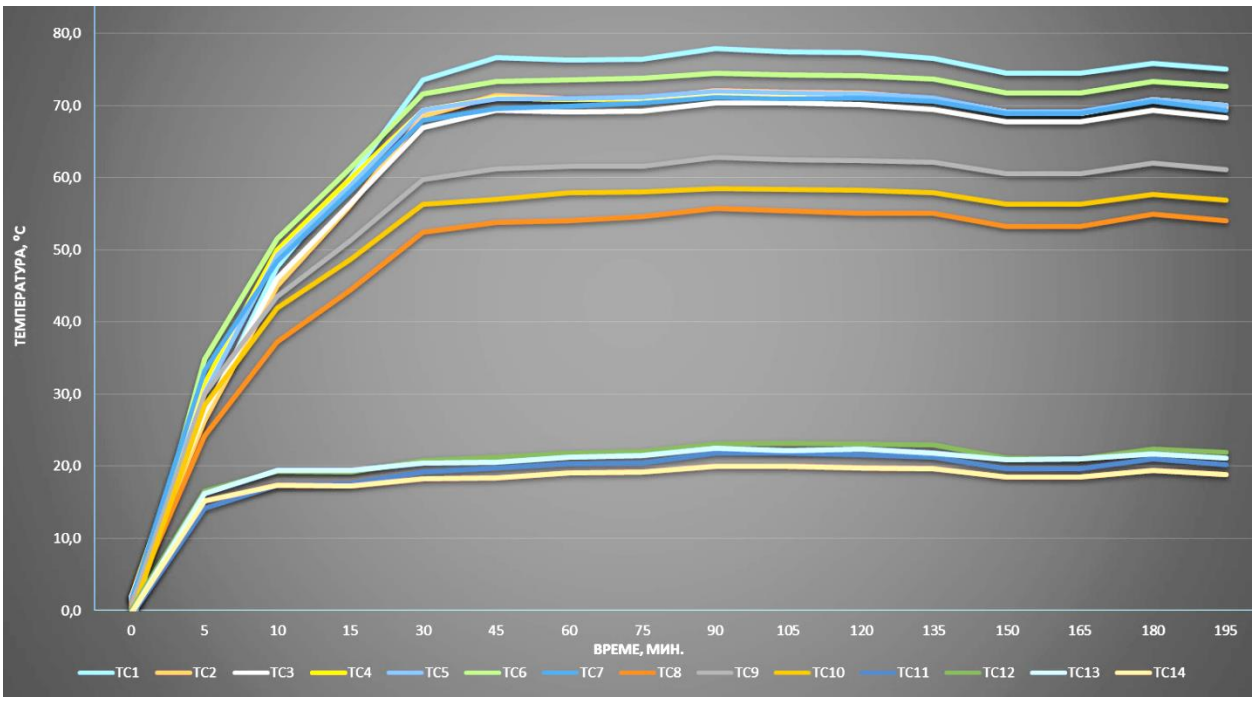
Фиг.1. Зависимост на индуктивността от тока след импрегнация

Горната граница на прегряване е строго фиксирана в клиентската спецификация. За провеждането на този тип тест се използва измервателен уред наречен „дейталогър“ (фиг.2). С негова помощ се снемат температурите от всички термоелементи в изделието. Уредът се програмира индивидуално според зададените предпочитания за измерване на температурата – честота на измерване, начин на измерване и т.н. Това програмиране се осъществява с помощта на компютър, към който е свързан дейталогърът. Веднъж настроен и пуснат в действие, той автоматично прави измервания и ги изпраща в таблица на компютъра и от стойностите автоматично се изчертава графика на покачване на температурата за всички термоелементи (thermocouple – TC – в изделието са заложени общо 14 броя).

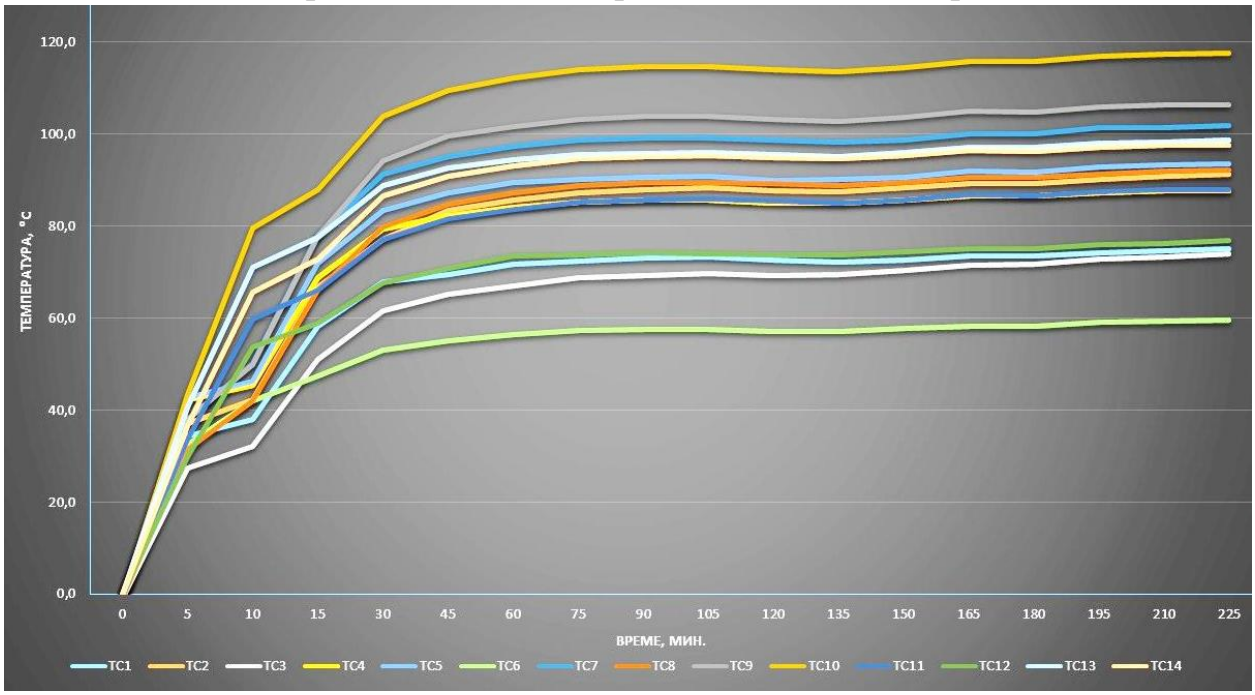
Проведени са две изпитания – с неоригинален (по-мощен вентилатор – фиг.3) и с оригиналния вентилатор (фиг.4). Температурата на реактора е в норма и в двата случая.



Фиг.2. Измерване на температурата на реактора.



Фиг.3. Изменение на температурата на реактора за 3 h. при I_n = 400 A при охлаждане с неоригинален вентилатор



Фиг.4. Изменение на температурата на реактора за 3,5 h. при I_n = 400 A при охлаждане с оригинален вентилатор

6. ТЕСТ ЗА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ СМУЩЕНИЯ

Тестът се провежда с „гаусметър“ (уред за измерване на електромагнитното поле) симетрично от двете страни на изделието, на отстояние 150 мм от пода. Прави се с цел да се предвидят електромагнитните смущения, които поражда реакторът, при стойност на тока I_{DC} = 800A.

Очаквана стойност: *6,5mT (< 10mT)*. Действителна: *6,1 mT*.

Измерването за електромагнитни смущения е в очакваните граници и тестът се счита за успешен.

7. ПРОВЕРКА НА ИЗОЛАЦИЯТА

Тестовете на изолацията се извършват с цел определяне съпротивлението на изолацията от намотките към земята, като обичайно се измерва с мегаомметър. Промени в съпротивлението на изолацията може да настъпят по причина на редица фактори, като например: конструкция, температура, изсъхване, чистота на частите, особено на втулките. Когато съпротивлението на изолацията падне под определена стойност, то често може да бъде „вкарано“ в определения толеранс (граница) след почистване и изсушаване.

7.1. ИЗМЕРВАНЕ НА ИЗОЛАЦИОННО СЪПРОТИВЛЕНИЕ СПРЯМО „ЗЕМЯ“

Съпротивлението на изолацията варира в зависимост от приложеното напрежение. Всички сравнителни измервания трябва да се правят винаги при едно и също напрежение, в продължение на 1 минута.

Зададените по тест програмата стойности са следните:

- Номинално захранващо напрежение U_n = 1000 VDC;
- Очаквана стойност: $R_{из.}$ >100 MΩ.

Резултатът от измерването е много над предписаната стойност:

$$R_{из.} = 3,16\ G\Omega.$$

7.2. ТЕСТ НА ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ

Целта е чрез високо-волтов потенциален разделител да се провери дали изолацията на изделието издържа на пробив при случайно късо съединение.

Зададени по тест програмата стойности:

- Захранващо напрежение U = 9500 V, f = 50 Hz
- Очаквана стойност на ток на утечка: $I_{ут.}$ < 0,5 mA за 1 min.

Резултат от теста, проведен за 5 min:

$I_{ут.}$ = 1.8 mA - „изтичане“ в допустимите граници, успешен тест.

7.3. ВТОРИ ТЕСТ ЗА ПРОВЕРКА НА ИЗОЛАЦИОННОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ

Целта е проверка след имитирано късо съединение в изделието.

Зададените стойности са същите.

Резултатът показва още по-голяма стойност спрямо първото измерване:

$$R_{из.} = 3,53\ G\Omega.$$

8. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разработката е разгледана методика за провеждане на тестове на разработен прототип на реактор за мотрисен влак. След провеждането на серия от типови изпитания на реактора по съгласувана предварително тест програма се взема

решение за серийното му производство – всички тестове са успешни. Методиката за провеждане на изпитания може да бъде приложена при разработване на други изделия преди пускането им в производство.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Димитров В., В. Донков, Г. Неджиб, ***Изработване и предварителни изпитания на прототип на линеен реактор,*** VIII научна конференция "ЕФ 2016", Варна, 12 - 15 септември, 2016

[2] Streicher J. T., ***Line Reactors and AC Drives***, Rockwell Automation, Mequon, Wisconsin, 2006

[3] ***Ръководство за тестване на индуктори и трансформатори***, ABB, 2013

Автори: Васил Димитров, доцент, д-р, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков"- София, E-mail adress: *vdimitroff@abv.bg;* Веселин Донков, инженер „АК Магнит АД"; Гюлек Неджиб, докторант, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков"- София

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Иван Костов

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СИСТЕМА С ТОРОИДАЛЕН ФЕРИТЕН МАГНИТОПРОВОД

Валентин Матеев, Мигленна Тодорова, Илиана Маринова

Резюме: *В тази статия е представен компютърен модел на електромагнитна система с феритен тороидален магнитопровод. Системата е изследвана в статичен и динамичен режим в среда ANSYS - MAXWELL. Получени са резултати за разпределението на интензитета на магнитното поле, магнитната индукция в обема на феритния магнитопровод и токовата плътност в намотката на електромагнитната система. Определени са динамичното изменение на индуктираното напрежение в намотката и загубите в обема на феритния магнитопровод. Направена е оценка на хомогенността на полето във феритния магнитопровод. Получените резултати са сравнени с експериментално измерени данни.*
Ключови думи: *компютърно моделиране, магнитни материали, ферит, магнитостатичен модел, квазистационарен модел*

COMPUTER MODELLING OF AN ELECTROMAGNETIC SYSTEM WITH A TOROIDAL FERRITE CORE

Valentin Mateev, Miglenna Todorova, Iliana Marinova

Abstract: *In this paper a computer model of an electromagnetic system with ferrite toroidal core is presented. Static and dynamic mode of the electromagnetic system is performed in ANSYS - MAXWELL. Results for the magnetic field intensity distribution, results for the magnetic flux density in the volume of the ferrite toroidal core and results for the electric current density distributions in the conductive domains of the electromagnetic system are obtained. The dynamical variation of the induced voltage in the current-carrying coil and the losses in the ferrite core is determined. An evaluation of the field homogeneity in the ferrite core is carried out. The results are compared with experimentally measured data.*
Keywords: *computer modelling, magnetic material, ferrite, magnetostatic model, transient model*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Феритите представляват керамични материали, съставени от химически свързани железни оксиди на един или няколко метални елемента. Магнитно меките феритни материали се характеризират с голяма индукция на насищане, малки стойности на коерцитивния интензитет и малки загуби от хистерезис. Специ-

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

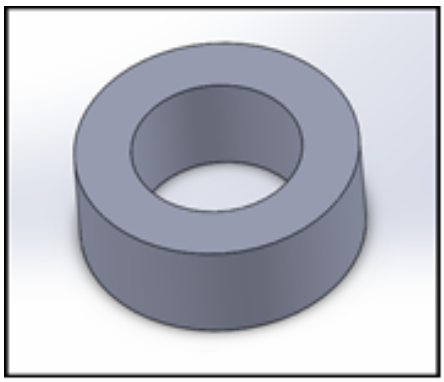
ISSN 1311-0829

фичното електрическо съпротивление на феритите е много голямо, 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 достъпно и евтино, като лесно се изготвят сложни конструкции. Феритните материали намират широко приложение при реализирането на електронни компоненти, индуктори, дросели, трансформатори, сензори и др. [1], [2].

В статията е представено компютърно моделиране на тороидална електромагнитна система с феритен магнитопровод [3]. Изследвано е разпределението на интензитета и индукцията на магнитното поле в обема на феритния магнитопровод. Също така, изследвана е динамиката на индуктираното напрежение в намотката и загубите във феритния материал. Направени са изследвания в статичен и динамичен режими със софтуерния пакет ANSYS - MAXWELL [4].

2. ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СИСТЕМА

Изследвана е електромагнитна система, съставена от тороидален феритен магнитопровод с правоъгълно сечение и равномерно навита намотка от меден проводник с диаметър 1 *mm*. Тороидът има външен диаметър *16 mm*, вътрешен диаметър *9.6 mm* и височина *6.3 mm* (**R16/9.6/6.3**) - фиг.1. На фиг.2 е показана геометрията на изследваната електромагнитна система с еднослойна възбудителна намотка с *20* равномерно разположени навивки.



Фиг.1. Тороидален магнитопровод

Фиг.2. Електромагнитна система с намотка с 20 навивки

3. ОСНОВНИ УРАВНЕНИЯ ЗА АНАЛИЗ

Променливо във времето електромагнитно поле, относно магнитния вектор-потенциал **A**, се описва с уравнение (1).

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mu \mathbf{J}\,, \tag{1}$$

където μ е магнитната проницаемост, γ е специфичната електрическа проводимост и **J** е векторът на токовата плътност на намотката.

За оценка на разпределението на токовата плътност в обема на проводника се използва *дълбочина на проникване*, която в случай на периодично синусоидално изменение на тока има вида:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}}, \tag{2}$$

където ω е кръговата честота.

При синусоидално изменение на електромагнитното поле във времето уравнение (1) може да се запише с комплексни променливи във вида [5]:

$$\nabla^2 \dot{\boldsymbol{A}} - j\omega\mu\gamma\dot{\boldsymbol{A}} = -\mu\dot{\boldsymbol{J}}. \tag{3}$$

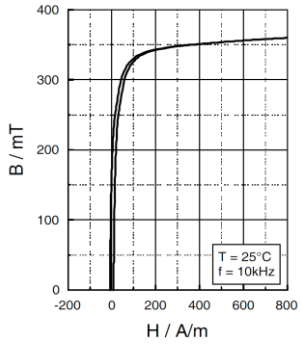
Разгледани са магнитостатичен и квазистационарен модели на тороидална електромагнитна система с помощта на ANSYS - MAXWELL. Използван е методът с крайни елементи за тримерен модел, като е приложена A-V формулировка за решението на моделите.

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ МОДЕЛИРАНЕТО

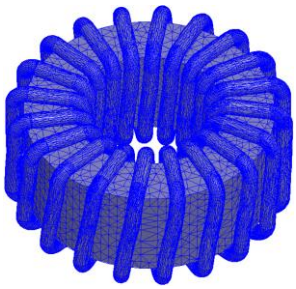
Резултатите от компютърното моделиране са получени за електромагнитна система с феритно ядро тип **R16/9.6/6.3** и намотки със съответно *5* и *20* навивки.

Амплитудната стойност на захранващия ток е *50 mA*, работната честота е *10 kHz*. На фиг.3 е показана кривата на намагнитване на материала на изследвания ферит при температура *25°C* [3].

На фиг.4 е дадена дискретизацията от крайни елементи на изследваната електромагнитна система. Броят на елементите е *367 770*.



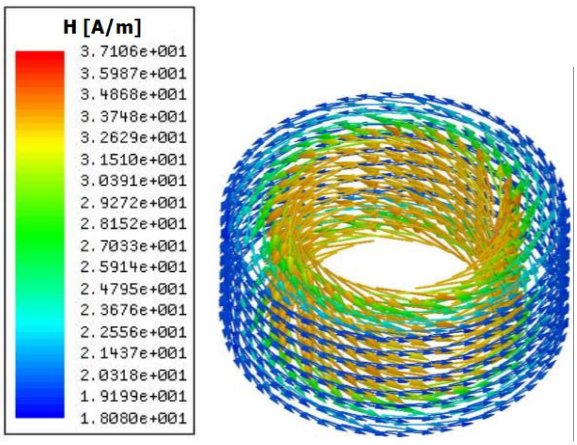
Фиг.3. Крива на намагнитване на материала



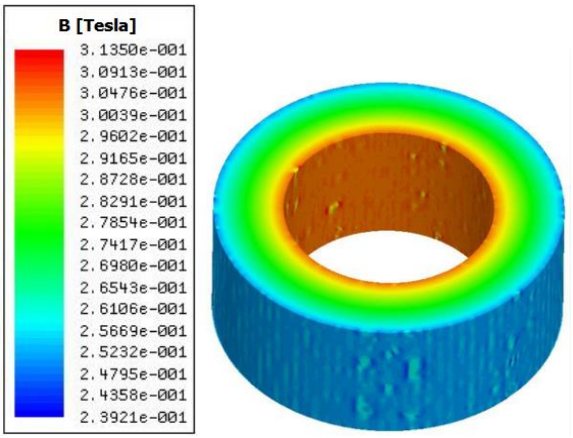
Фиг.4. Мрежа от крайни елементи на тороидалния ферит R16/9.6/6.3

С разработения магнитостатичен модел на електромагнитната система е изследвано разпределението на магнитното поле като намотката е захранена с ток 0.05 *A*.

На фиг.5 са показани векторите на интензитета на магнитното поле в магнитопровода и на фиг.6 е дадено разпределението на индукцията на магнитното поле в обема на изследвания феритен магнитопровод, като намотката е с *20* навивки.



Фиг.5. Вектори на интензитета на магнитното поле в магнитопровода

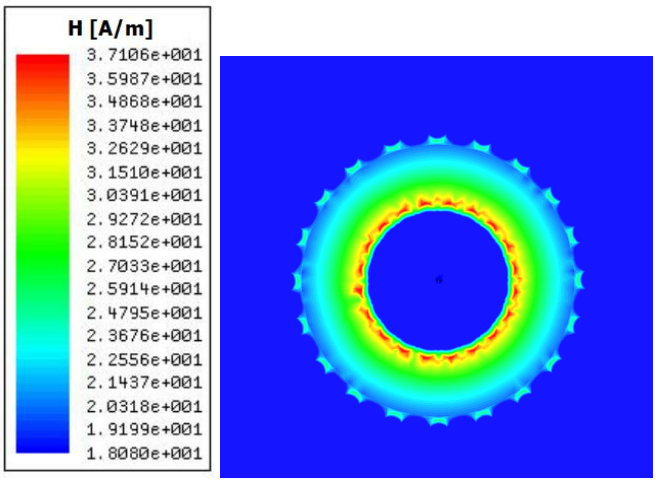


Фиг.6. Разпределение на магнитната индукция в магнитопровода

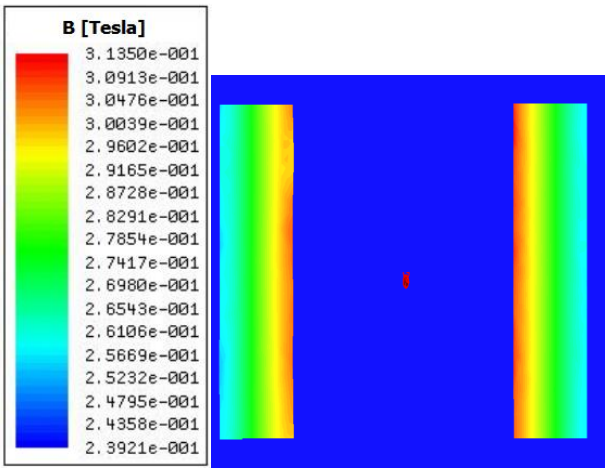
На фиг.5 интензитетът е по-голям по вътрешната повърхност на тороидалния феритен магнитопровод. Интензитетът има най-голяма стойност, когато магнитното съпротивление е най-малко, т.е. там, където магнитната силова линия е с най-малка дължина.

На фиг.6 е визуализирано разпределението на магнитната индукция в обема на магнитопровода. По вътрешния диаметър магнитната индукция е максимална.

На фиг.7 е дадено разпределението на интензитета на магнитното поле в напречното сечение на магнитопровода и на фиг.8 е дадено разпределението на магнитната индукция по надлъжното сечение на магнитопровода.

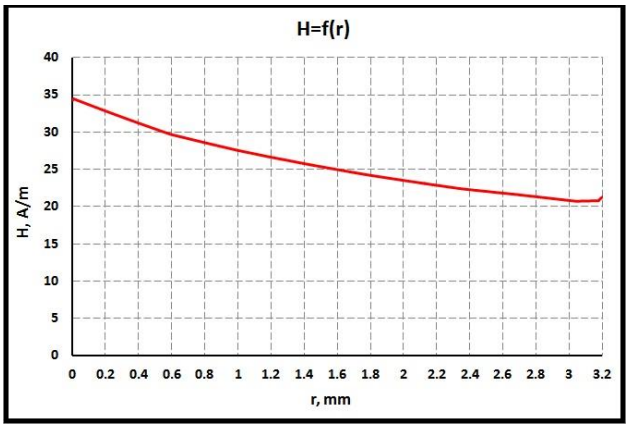


Фиг.7. Интензитета на магнитното поле в напречно сечение на електромагнитната система

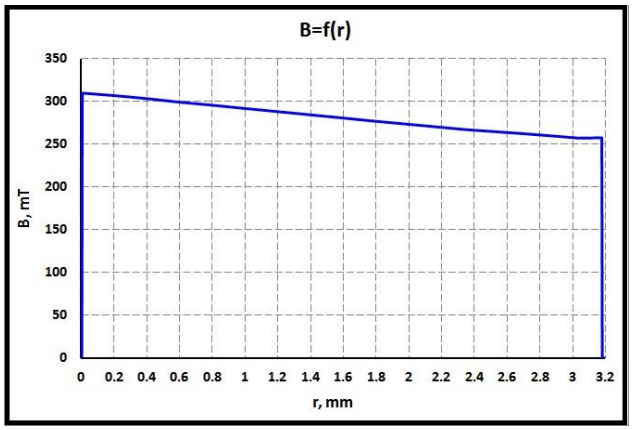


Фиг.8. Магнитната индукция в надлъжно сечение на феритния магнитопровод

На фиг.9 и фиг.10 е показано изменението на интензитета и магнитната индукция в радиално направление на тороидалния феритен магнитопровод.



Фиг.9. Интензитетът на магнитното поле по посока от вътрешния радиус към външния радиус по напречното сечение на феритния магнитопровод



Фиг.10. Магнитната индукция по посока от вътрешния радиус към външния радиус по напречното сечение на феритния магнитопровод

На фиг.9 стойностите на интензитета на магнитното поле намаляват от центъра към периферията на тороидалния феритен магнитопровод.

Неравномерността на разпределение на магнитното поле в тороидалния феритен магнитопровод в радиално направление е оценена чрез коефициентите на хомогенност на полето, h_H, %, и h_B, %, [6] по отношение съответно на интензитета на магнитното поле и на магнитната индукция. Стойностите на интензитета и индукцията за този критерий се отчитат от графиките, показани на фиг.9 и фиг.10:

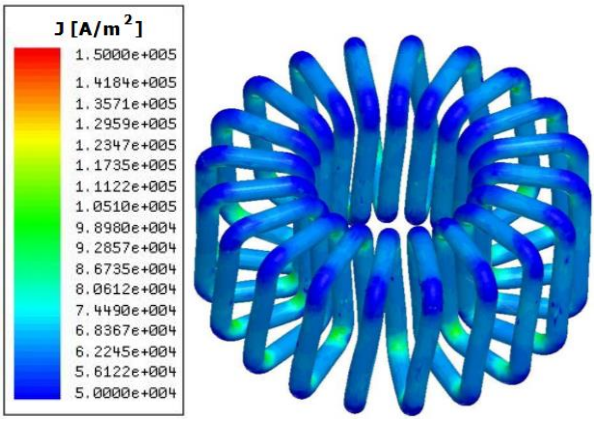
$$h_H = \frac{|H_{\max} - H_{\min}|}{H_{\max}} 100\%; \quad (4)$$

$$h_B = \frac{|B_{\max} - B_{\min}|}{B_{\max}} 100\%; \quad (5)$$

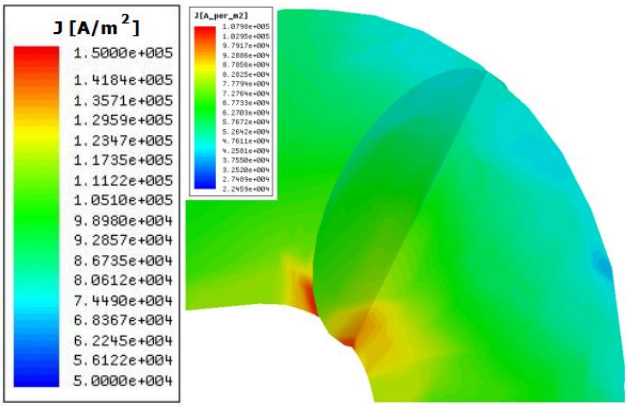
където h_H е критерий за оценка на хомогенността по отношение на интензитета на магнитното поле; H_{max} - максимална стойност на интензитета на магнитното поле; H_{min} - минимална стойност на интензитета на магнитното поле; h_B е критерий за хомогенността на магнитната индукция; B_{max} - максимална стойност на магнитната индукция; B_{min} - минимална стойност на магнитната индукция.

Хомогенността на интензитета на магнитното поле в радиално направление е *39 %*. По отношение на магнитната индукция хомогенността е *16 %*.

На фиг.11 е дадено разпределението на токовата плътност в обема на намотката, а на фиг.12 е показано разпределението на токовата плътност в надлъжно и напречно сечение на една навивка на намотката на тороида.



Фиг.11. Разпределение на токовата плътност по повърхността на намотка с 20 навивки



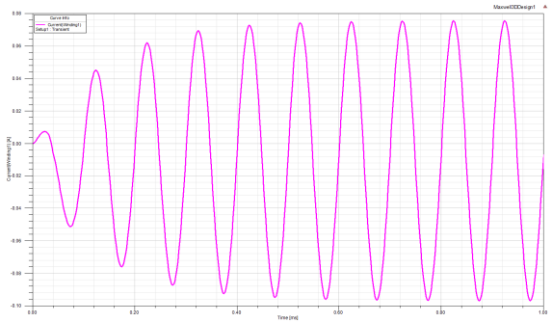
Фиг.12. Токова плътност в надлъжното и напречното сечения на проводника в областта на огъване на навивката

От фиг.11 се вижда, че неравномерното разпределение на тока води до ефективно увеличаване на активното съпротивление, поради което с отчитане на токовото изместване се получават разлики в разпределението на тока в обема на проводника.

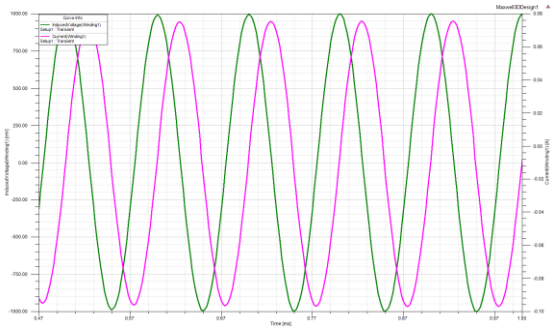
На фиг.13÷фиг.16 са показани резултати за изменението на тока и напрежението при динамичен режим на работа на тороидалния ферит. При изследването е използван квазистационарения модел, като намотката е захранена с напрежение:

$$U = (1 - e^{(-800t)}).\cos(2\pi 1000t)\,. \qquad (6)$$

Изменението на тока в намотката с *5* навивки във функция от времето е показано на фиг.13. Изменението на индуктираното напрежение и тока в намотката до достигане на установен режим е показано на фиг.14. Напрежението и токът са дефазирани приблизително на *90°*, което се дължи на пренебрежимо малкото активно съпротивление на възбудителната намотка и практическата липса на загуби от вихрови токове във феритния магнитопровод.

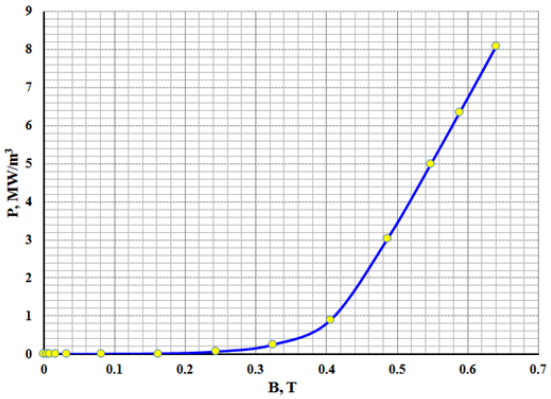


Фиг.13. Преходен процес на изменение на тока в намотката



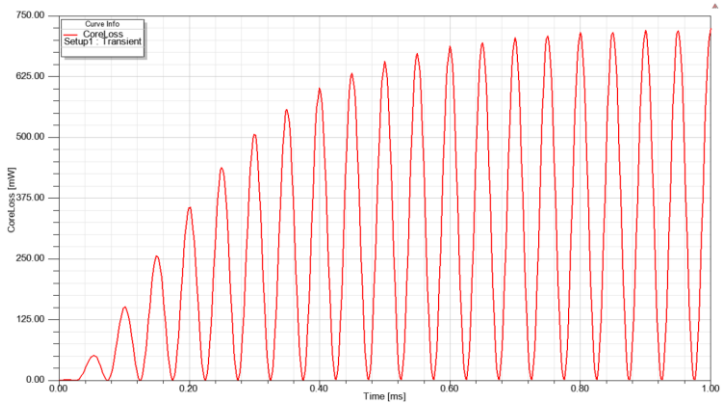
Фиг.14. Установен режим на тока и напрежението на намотката на електромагнитната система

На фиг.15 е дадена кривата на специфичните загуби P=f(B) на феритния материал [7], [8].



Фиг.15. Крива на специфичните загуби на изследвания феритен материал

Динамичното изменение на загубите в магнитопровода от времето са показани на фиг.16. Амплитудната стойност на загубите е *P=715 mW* при интензитет на полето *H=122 A/m* и индукция *B=0.413 T*.



Фиг.16. Зависимост на амплитудните стойности на загубите в обема на феритния магнитопровод

Получените резултати относно загубите може да послужат за оценка на загубите във феритния магнитопровод при динамичния режим на работа на образеца.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С разгледаната методика за анализ на тороидална електромагнитна система с феритен магнитопровод в ANSYS - MAXWELL са получени резултати за: разпределението на електромагнитното поле в обема на феритния магнитопровод; разпределението на токовата плътност, индуктираното напрежение и загубите в намотката; определени са динамичните загуби при захранване със синусоидално напрежение; оценена е хомогенността на магнитното поле в магнитопровода.

Методиката предоставя възможност за изследване на дроселни електромагнитни системи в работния честотен диапазон от *25 Hz* до *2 MHz* и оценка на работните им характеристики.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват благодарност на ANSYS Inc. и T.E.A.M. ООД за предоставения лиценз на програмата ANSYS - MAXWELL.

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] Kaschke Components GmbH, Kamafer Materials 2010.

[4] ANSYS - MAXWELL 3D User's Guide, p.1006.

[5] Ячев И., Маринова И., ***Числени методи и моделиране на вериги и полета - I част***, Издателство на Технически университет – София, 2011, сс. 9-37.

[6] Surdacki P., Montusiewicz J., ***Multicriterion designing of additional windings of the cylindrical cryomagnet***, Non-linear electromagnetic systems: advanced techniques and mathematical methods, 1998, pp. 111-114.

[7] 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.

[8] 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, доц. д-р инж., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail adress: *vmateev@tu-sofia.bg*; Мигленна Тодорова, маг. инж. асистент и докторант в катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет – София, E-mail adress: *mtodorova@tu-sofia.bg*; Илиана Маринова, проф. дтн инж., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет – София, E-mail adress: *iliana@tu-sofia.bg*.

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: проф. д-р Райна Ценева

МОДЕЛИРАНЕ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ НА МАГНИТЕН СЪЕДИНИТЕЛ

Валентин Матеев, Мигленна Тодорова, Илиана Маринова

Резюме: *В този доклад е направено моделиране на магнитното поле на магнитен съединител с постоянни магнити. Разработен е 2D модел с метода с крайни елементи. Изследването е извършено със софтуера ANSYS - MAXWELL. Получени са резултати за магнитното поле на магнитния съединител с четири вида постоянни магнити. Изследвани са хармониците на радиалната компонента на магнитната индукция във въздушните междини между роторите на магнитния съединител. За тяхното изчисление е използвано бързо преобразуване на Фурие.*
Ключови думи: *магнитен съединител, метод с крайни елементи, моделиране на магнитно поле, хармоници, постоянни магнити.*

MAGNETIC FIELD MODELLING OF A MAGNETIC GEAR

Valentin Mateev, Miglenna Todorova, Iliana Marinova

Abstract: *Magnetic field modelling of a coaxial magnetic gear with permanent magnets is carried out in this paper. A 2D finite element model has been developed. The investigation is implemented with Ansys Maxwell software. Results of the magnetic field of the magnetic gear with four types permanent magnets are obtained. The harmonics of the radial component of the flux density in the air gaps between the rotors of the magnetic gear are investigated. A fast Fourier transformation (FFT) method is applied for the calculation of the harmonics.*
Keywords: *coaxial magnetic gear, finite element method, harmonics, magnetic field modelling, permanent magnets.*

1. INTRODUCTION

Magnetic gears are devices utilized in the torque transmission. They are an analog of the mechanical gears. The magnetic gears have better performance and significant advantages over the mechanical counterparts [1]. Such gears have no friction losses, no lubrication, they have improved reliability, inherent overload protection, low maintenance, low noise [2]. They are also contactless with high efficiency [3]. Magnetic gears could be coupled together with electric machines and could operate with electric coils in combination [4], [5]. They find practical application in the wind-powered generation [6], in the electrical vehicles [7], etc.

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

This paper considers the modelling of the magnetic field of a coaxial planetary magnetic gear with permanent magnets. Four types of permanent magnets have been investigated - Alnico, ferrite, SmCo and NdFeB permanent magnets. The results of the modelling of field of the magnetic gear are visualized for 2D transient model, implemented by ANSYS - MAXWELL [8].

2. MAGNETIC GEAR CONSTRUCTION

The investigated magnetic gear has three rotors - an outer low-speed rotor with permanent magnets, an inner high-speed rotor with permanent magnets and a middle rotor with steel segments. The steel segments are attached to a mechanical structure. In some cases, the outer rotor of the gear represents the stator of the magnetic system.
A drawing of the magnetic gear is depicted in Fig.1.

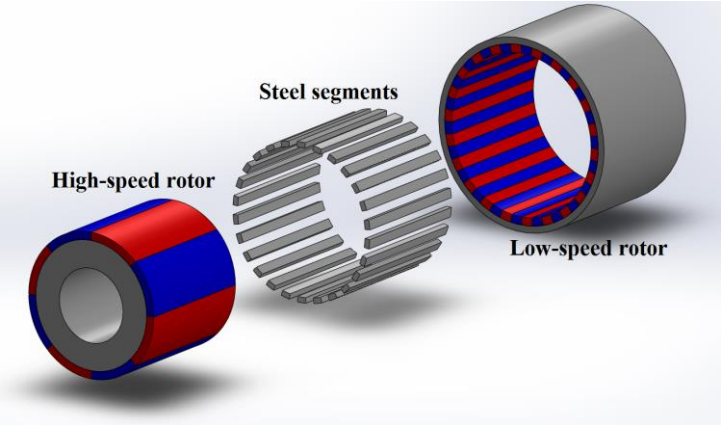


Fig.1. Magnetic gear construction.

The dimensions of the gear are shown in **Table I**.

Inner diameter of the inner rotor, mm	54
Outer diameter of the inner rotor, mm	94
Inner diameter of the outer rotor, mm	130
Outer diameter of the outer rotor, mm	140
Length of a single steel segment, mm	4
Stack (axial) length of the magnetic gear, mm	1000
Air gaps, mm	1

3. PRINCIPLE OF OPERATION - MODULATING EFFECT IN THE MAGNETIC GEAR

The magnetic and mechanical gears are analogous to each other. The teeth of the mechanical gear are replaced with permanent magnets and steel segments, respectively. The principle of operation in the magnetic gears is based on the modulation of the magnetic field. The steel segment ring is a spatial modulator. If this modulator is removed from the magnetic gear, the magnetic systems of the outer and inner rotors excite magnetic fields in the space between them. Then, the torque transmission is not possible because the pole-pair numbers of the two rotors do not match each other.

Considering that the inner rotor is removed, the outer rotor will still have pole-pair number. The modulator consists of ferromagnetic segments – steel segments, which are separated by the air-gap and the pole pinch of the modulator do not match the pole pinch of the outer rotor. Magnetic field induced by such incomplete system has a space harmonic spectrum containing a harmonic with pole-pair number equal to $\mathbf{p_i}$ that could interact with the inner rotor in the full system. If the modulator rotates with an angle θ, which angle corresponds to the pole pinch of the outer rotor, an appearance of a space harmonic will be available and the angle will be more than 180 geometrical degrees with regard to the modulator. This represents the gearing effect of the magnetic gear [9].

The middle rotor modulates the magnetic fields produced by the inner and outer rotors and creates space harmonics in the air gaps. The modulated magnetic fields via the steel segments interact with the magnetic field on the other side in order to transmit torque [10].

The distribution of the flux density at a radial distance *r* produced by either permanent magnet rotor can be written in the following form:

- for the radial component of the flux density:

$$B_{rad}(r,\theta) = \left(\sum_{m=1,3,5,\ldots} b_{(rad)m}(r) \cos(mp(\theta - \omega_r t) + mp\theta_0) \right) \times \left(\lambda_{(rad)0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\ldots} \lambda_{(rad)j}(r) \cos(jn_s(\theta - \omega_s t)) \right) \quad (1)$$

- for the tangential component of the flux density:

$$B_{\tan}(r,\theta) = \left(\sum_{m=1,3,5,\ldots} b_{(\tan)m}(r) \sin(mp(\theta - \omega_r t) + mp\theta_0) \right) \times \left(\lambda_{(\tan)0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\ldots} \lambda_{(\tan)j}(r) \cos(jn_s(\theta - \omega_s t)) \right) \quad (2)$$

where θ is the angle of rotation, p is the number of the pole-pairs on the permanent magnet rotor, n_s is the number of the steel segments, ω_r is the rotational speed of the permanent magnet rotor, ω_s is the rotational speed of the steel segments. The Fourier coefficients for the radial and the tangential components of the flux density, when the steel segments are not used, are $b_{(rad)m}$ and $b_{(tan)m}$, respectively. When a modulator is included in the system the Fourier coefficients for the radial and tangential components of the flux density are $\lambda_{(rad)j}$ and $\lambda_{(tan)j}$, respectively.

The first term of the equations (1) and (2) concerns the flux density distribution without steel segments. Thus, the second term of these expressions represents a function of modulation.

From expressions (1) and (2) we can derive the following equations for the radial and tangential components of the flux density [11]:

- for the radial component:

$$B_{rad}(r,\theta)=\lambda_{(rad)0}\sum_{m=1,3,5}b_{(rad)m}(r)\cos(mp(\theta-\omega_r t)+mp\theta_0)$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,\ldots}\sum_{j=1,2,3,\ldots}\lambda_{(rad)j}(r)b_{(rad)m}(r)\cos\left((mp+jn_s)\left(\theta-\frac{(mp\omega_r+jn_s\omega_s)}{(mp+jn_s)}t\right)+mp\theta_0\right) \quad (3)$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,\ldots}\sum_{j=1,2,3,\ldots}\lambda_{(rad)j}(r)b_{(rad)m}(r)\cos\left((mp-jn_s)\left(\theta-\frac{(mp\omega_r-jn_s\omega_s)}{(mp-jn_s)}t\right)+mp\theta_0\right);$$

- for the tangential component:

$$B_{\tan}(r,\theta)=\lambda_{(\tan)0}\sum_{m=1,3,5}b_{(\tan)m}(r)\sin(mp(\theta-\omega_r t)+mp\theta_0)$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,\ldots}\sum_{j=1,2,3,\ldots}\lambda_{(\tan)j}(r)b_{(\tan)m}(r)\sin\left((mp+jn_s)\left(\theta-\frac{(mp\omega_r+jn_s\omega_s)}{(mp+jn_s)}t\right)+mp\theta_0\right) \quad (4)$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,\ldots}\sum_{j=1,2,3,\ldots}\lambda_{(\tan)j}(r)b_{(\tan)m}(r)\sin\left((mp-jn_s)\left(\theta-\frac{(mp\omega_r-jn_s\omega_s)}{(mp-jn_s)}t\right)+mp\theta_0\right).$$

The coefficients of the time variable t in the cosine or sine functions indicate the rotational speeds of the space harmonic flux density distribution [12].

The number of the pole-pairs in the space harmonic flux density distribution produced by either permanent magnet rotor can be given by:

$$p_{m,k}=|mp+kn_s|$$

$$\text{m=1, 3, 5, …, }\infty, \quad (5)$$

$$\text{k=0, }\pm1\text{, }\pm2\text{, }\pm3\text{, …, }\pm\infty,$$

where p is the number of the pole-pairs on the permanent magnet rotor and n_s is the number of the steel segments.

The different rotational speeds of the harmonic magnetic fields can be expressed by:

$$\omega_{m,k}=(mp/(mp+kn_s))\omega_r$$

$$\text{m=1, 3, 5, …, }\infty, \quad (6)$$

$$\text{k=0, }\pm1\text{, }\pm2\text{, }\pm3\text{, …, }\pm\infty,$$

where ω_r is the rotational speed of the permanent magnet rotor.

If k=0, it is the basic harmonic magnetic field that the rotational speed is equal to that of the permanent magnet rotor where there is no modulation. When k≠0, there are modulation of the harmonic magnetic fields. In such case, the rotational speeds of the harmonic fields and of the permanent magnet rotor are different due to the introduction of the steel segments. The asynchronous space harmonic is the highest when m=1 and k=-1. The harmonic order and the rotational speed of the harmonic field are:

$$p_{1,-1} = |p - n_s|, \tag{7}$$

$$\omega_{1,-1} = (p/(p - n_s))\omega_r . \tag{8}$$

To transmit energy steadily at different rotational speeds, the pole-pairs of the two magnetic fields should be the same. Therefore, the number of the pole-pairs of the other permanent magnet rotor should be $|n_s - p|$, so the gear ratio is given in [3] and [13]:

$$G_r = \omega_r/((p/(p - n_s))\omega_r) = (p - n_s)/p . \tag{9}$$

The sign in front of the ratio depends on which direction the inner and outer rotors will rotate. If the two rotors rotate in contrary directions, this implies that the sign of the gear ratio will be negative and vice versa – the same rotation of the rotors means positive sign in front of the gear ratio.

For instance, the gear ratio of the magnetic gear is 5.5 in dynamical conditions.

4. MAGNETIC FIELD MODELING OF THE MAGNETIC GEAR

The magnetic field modeling of the magnetic gear concern a theoretical mathematical description of the distribution of the magnetic field in the so-called regions of the gear. These regions represent permanent magnets, ferromagnetic parts and air gaps.

The distinct regions of the magnetic gear are shown in Fig.2.

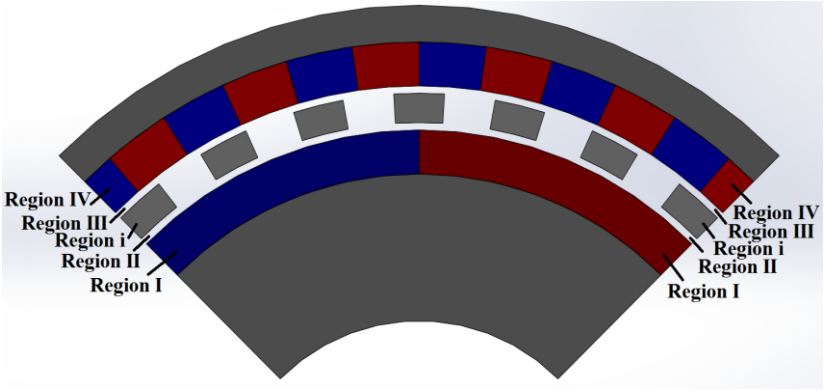


Fig.2. Regions of the magnetic gear.

The investigation is for a cylindrical coordinate system.

Regions I and IV are the mounted permanent magnets on the gear rotors, regions II and III are the two air gaps between the steel segments and the inner and outer rotors, respectively. Region *i* is the modulating rotor in the magnetic gear.

The magnetic vector potential **A** in regions I and IV in the studied magnetic gear is governed by:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \nabla \times \mathbf{M}, \tag{10}$$

where ∇^2 is Laplacian, μ_0 is the free space magnetic permeability, **M** is the magnetization vector.

The magnetic vector potential **A** in regions II, III and *i* in the studied magnetic gear is governed by:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0. \tag{11}$$

The vector of magnetization **M** is [14]:

$$\mathbf{M} = M\mathbf{e}_r = \pm \frac{B_r}{\mu_0} \mathbf{e}_r, \tag{13}$$

where B_r, M and $\mathbf{e}_r$ are the residual flux density, the scalar quantity of the magnetization and the spatial unit vector at the r axis of the cylindrical coordinate system, respectively.

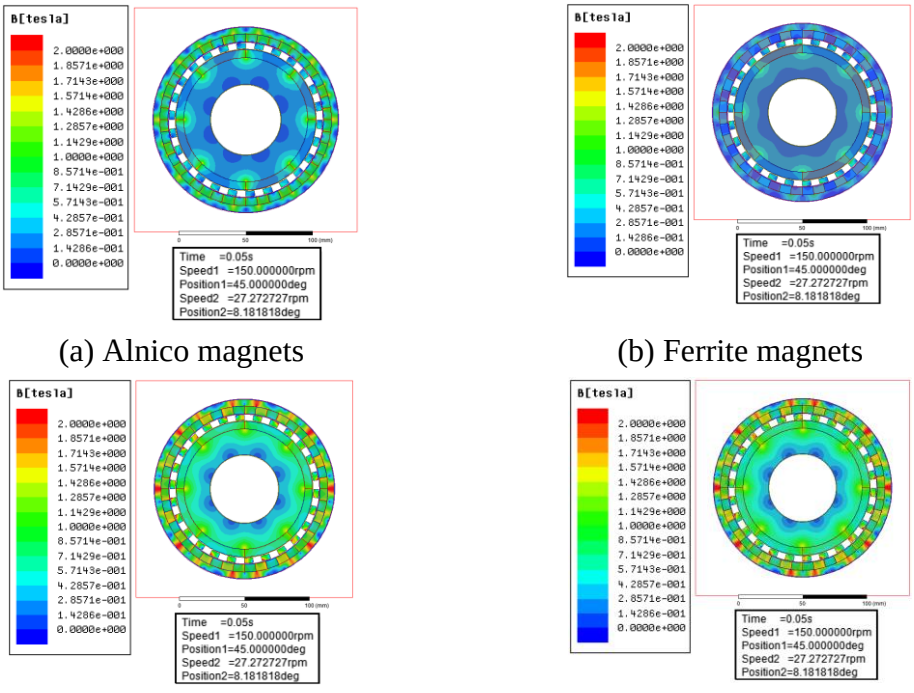
The torque is calculated using the virtual work method. The equation of the torque is given by [15]:

$$T = \frac{\partial}{\partial \theta} \sum_n \int_{Sn(\theta)} \left[\int_0^{\mathbf{H}'(\theta)} \mathbf{B} d\mathbf{H} \right] ds, \tag{14}$$

where n is the number of the section, s is the section of the distinct regions, $\mathbf{H}'$ is a column vector containing the directional components of **H**.

5. IMPLEMENTATION

The magnetic gear model has been implemented with ANSYS - MAXWELL software. The visualizations of the results are made at dynamical mode for time period of 50 ms. The dynamical mode implies that the outer rotor rotates simultaneously with the inner rotor of the magnetic gear. The rotors are rotated at 45 mechanical degrees for this time period. The inner and outer rotors rotate with 150 rpm and 27.3 rpm, respectively [16], [17].

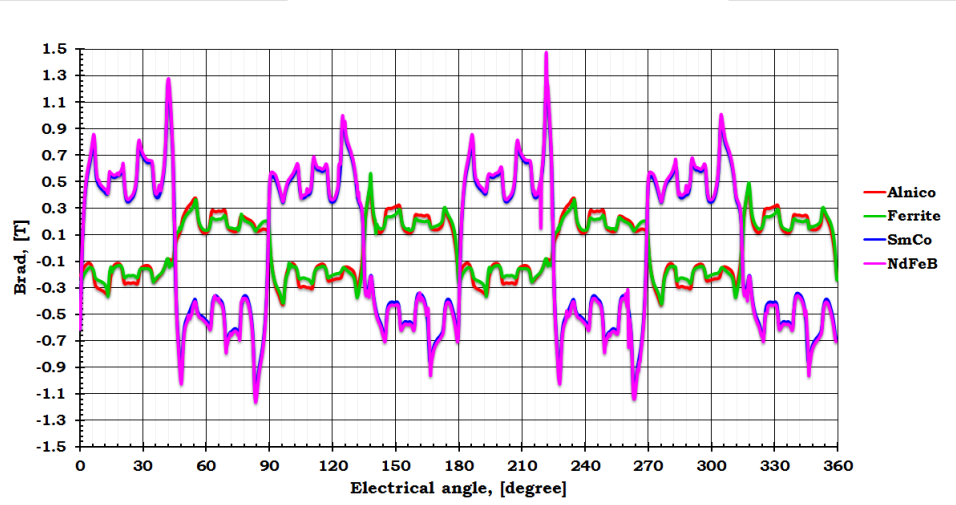


(a) Alnico magnets (b) Ferrite magnets

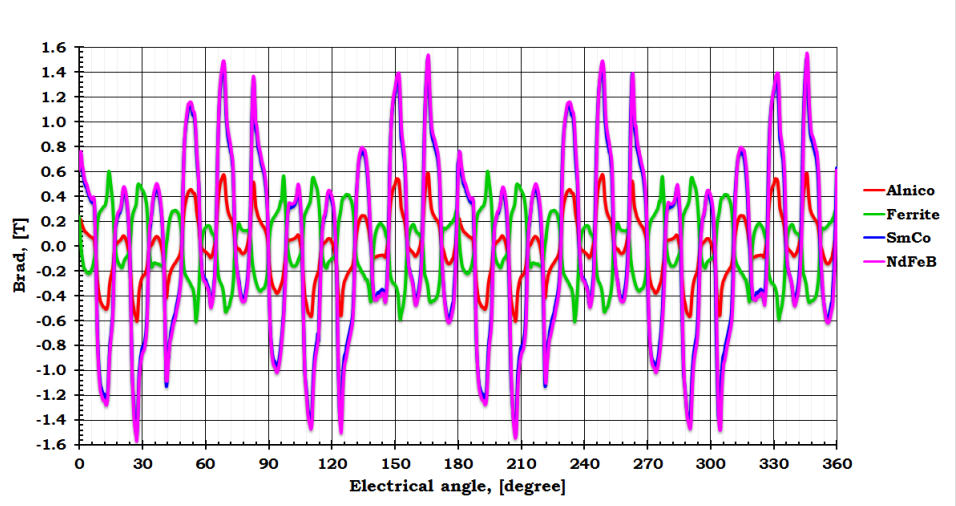
(c) SmCo magnets (d) NdFeB magnets

Fig.3. Flux density distribution in the coaxial magnetic gear.

The investigated permanent magnets are Alnico 9 LNGT80, ferrite F4450, SmCo S3410, and NdFeB 35. The flux density distribution is shown in Fig.3.
The flux density is higher in case of rare-earth magnet usage such as SmCo and NdFeB mounted on the rotors of the magnetic gear (Fig.3). In case of Alnico magnets the flux density is lower in the rotors of the magnetic gear.
The radial components of the flux density in the inner and outer air gaps of the magnetic gear with the four types of magnets are shown in Fig.4.



(a) Inner air-gap

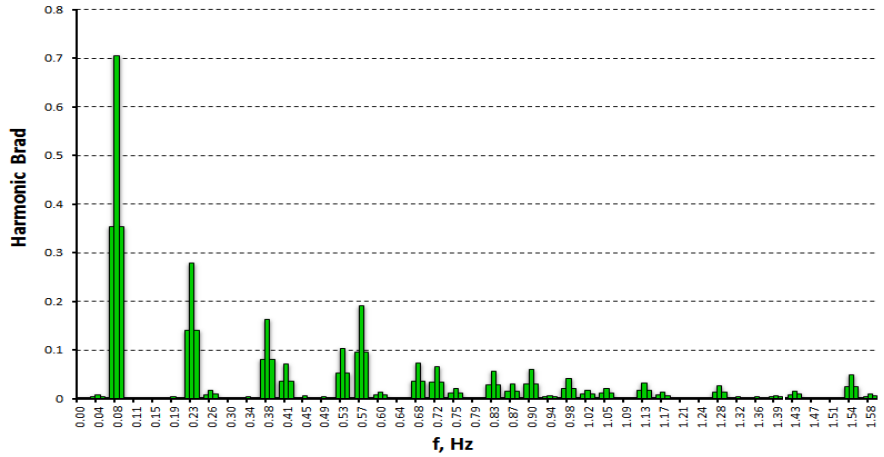


(b) Outer air-gap

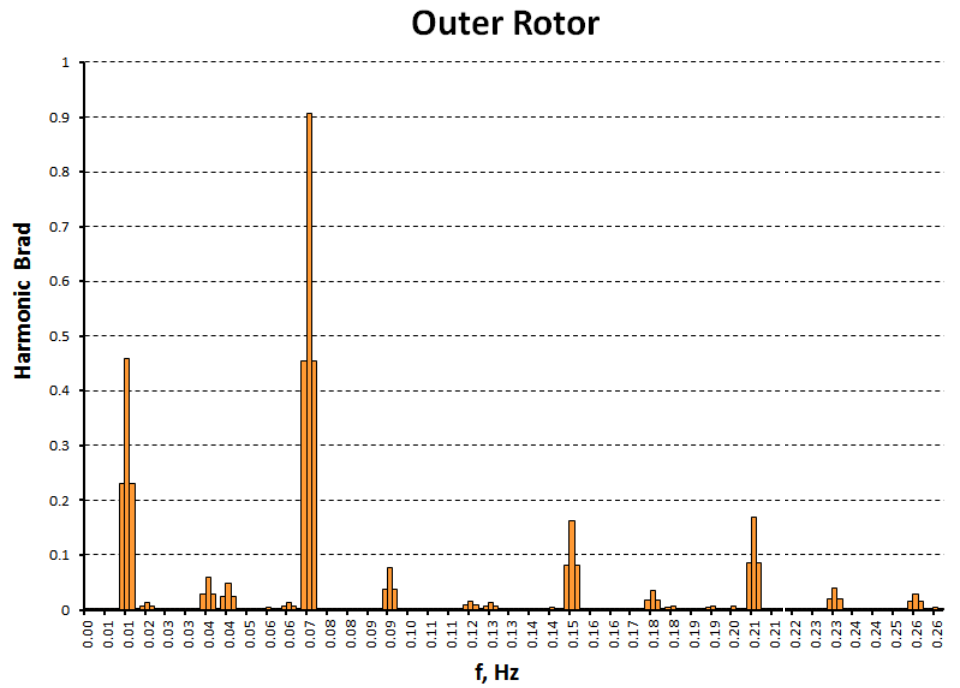
Fig.4. Radial components of the flux density in the inner and outer air gaps.

The radial component of the flux density in the inner air gap of the magnetic gear when the gear employs the SmCo and NdFeB magnets has an opposite direction in comparison with the direction of the flux density of the Alnico and ferrite magnets.

A frequency analysis of the harmonics of the magnetic flux in the considered magnetic gear has been performed. The results obtained are shown in Fig.5. The results are for the radial component of the flux density in the inner and outer air gaps.



(a) Inner air gap



(b) Outer air gap

Fig.5. Harmonic analysis of the radial components of the flux density.

The harmonic corresponds to the rotation of the outer low-speed rotor of the magnetic gear and can be found at a frequency of 0.38 Hz (23 rpm) (Fig.5-a). The harmonics which correspond to the revolutions of rotation of the inner high-speed rotor of the magnetic gear must be located of about 2.5 Hz (150 rpm). Harmonics around 0.45 Hz are produced by slug rotation (27.3 rpm). The remaining harmonics are undesirable at other angular frequencies and their appearance is due to the cyclic magnetization of the magnetic core areas around the permanent magnets.

5. CONCLUSION

In this paper a computer modelling of the magnetic field of a magnetic gear has been performed with an ANSYS - MAXWELL package using the finite element method.

In case of using Alnico permanent magnets the magnetic core of the gear is not saturated. The magnetic system of the gear is saturated when NdFeB permanent magnets are used. When the investigated magnetic gear has NdFeB permanent magnets mounted on it the flux density is higher in the rotors of the gear rather than when the other permanent magnets are utilized.

Since the torque transmission characteristic is an important characteristic of a magnetic gear, permanent magnets with high specific energy should be used in the construction of the gear. The permanent magnets must have the required energy and must provide such a torque, needed for the corresponding application, in which the magnetic gear is applied. In that case, the NdFeB permanent magnets are preferable to the construction of the magnetic gear than the Alnico magnets. That is so, because the rare-earth magnets can provide higher torque due to their higher specific energy.

The present study of the magnetic gear can be used as a comparison in the investigation of the modelling of the magnetic field in magnetic gears. Further research of magnetic gears will include analysis for the losses obtained in the rotors of the gear; analysis for the torque transmission characteristics of the gear with modified shape of the magnets and the steel segments, etc.

REFERENCES

[1] Gouda E., Mezani S., Baghli L., Rezzoug A., ***Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears***, IEEE Transactions on Magnetics, vol.47, 2011, pp.439-450.

[2] Magnomatics Company – *www.magnomatics.com*

[3] Atallah K., Howe D., ***A novel high-performance magnetic gear,*** IEEE Transactions on Magnetics, vol.37, 2001, pp.2844-2846

[4] Ho S., Niu S., Fu W., ***Transient analysis of a magnetic gear integrated brushless permanent magnet machine using circuit-field-motion coupled time-stepping finite element method***, IEEE Transactions on Magnetics, vol.46, issue 6, 2010, pp.2074-2077

[5] Liu C., Chau K., ***Electromagnetic design of a new electrically controlled magnetic variable-speed gearing machine***, Energies-MDPI, Open Access Journal, vol.37, 2014, pp.1539-1554

[6] Padmanathan P., Bird J., ***A continuously variable magnetic gear***, Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International, pp.367-373

[7] Ho S., Niu S., Fu W., ***Design and analysis of a novel axial-flux electric machine***, IEEE Transactions on Magnetics, vol.47, 2011, pp.4368-4371

[8] Ansys Maxwell User's Guide, ANSYS, 2012

[9] Molokanov O., Dergachev P., Kiruhin V., Kurbatov P., ***Analyses and experimental validation of coaxial magnetic planetary gear***, Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 18th International Symposium, 2014, pp. 145-148

[10] Paudel N, ***Modelling magnetic gears in COMSOL Multiphysics***, 2016

[11] Atallah K., Calverley S., Howe D., ***Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear***, IEEE Proc.-Electr. Power Appl., vol.151, 2004, pp.135-143

[12] Chen Y., Fu W., ***A novel hybrid-flux magnetic gear and its performance analysis using the 3-D finite element method***, Energies-MDPI, Open Access Journal, vol.8, 2015, pp.3313-3327.

[13] Chen Y., Fu W., Li W., ***Performance analysis of a novel triple-permanent-magnet-excited magnetic gear and its design method***, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, issue 7, 2016

[14] Lubin T., Mezani S., Rezzoug A., ***Development of a 2D analytical model for the electromagnetic computation of axial-field magnetic gears***, IEEE Transactions on Magnetics, vol.49, issue 1, 2013, pp.5507-5521

[15] Wang R., Furlani E., Cendes Z., ***Design and analysis of a permanent magnet axial coupling using 3D finite element field computation***, IEEE Transactions on Magnetics, vol.30, 1994, pp.2292-2295

[16] Mateev V., Todorova M., Marinova I., ***Torque transmission characteristics of a coaxial magnetic gear***, 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2016, Symposium Proceedings, 2016, pp.223-226

[17] Todorova M., Mateev V., Marinova I., ***Permanent magnets for a magnetic gear***, 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2016, Symposium Proceedings, 2016, pp.338-341

Authors: Valentin Mateev, Assoc. prof. PhD Eng., Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *vmateev@tu-sofia.bg*; Miglenna Todorova, Ass. Eng., PhD student, Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *mtodorova@tu-sofia.bg*; Iliana Marinova, Prof. D.Sc. Eng., Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *iliana@tu-sofia.bg*.

Received 15 December 2016 **Reviewer:** Prof. PhD Raina Tzeneva

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА УПРАВЛЕНИЕТО НА БЕЗЧЕТКОВ ПОСТОЯННОТОКОВ (BLDC) ДВИГАТЕЛ

Любомир Секулов, Мартин Златков, Мартина Томчева

Резюме: *В момента конкурентни двигатели в областта на електротранспорта са постояннотоковите безчеткови (BLDC) синхронни двигатели с постоянни редкоземни магнити. Те имат нужните характеристики да заменят асинхронните двигатели, но основният проблем при тях е изграждането на електрозадвижваща (ЕЗ) система с оптимално управление, осигуряваща висока енергийна ефективност, безпроблемно приложение при високи мощности, както и ниска цена.*

В разработката е представено изследването на основните параметри и характеристики на проектирана микропроцесорна система за управление (МСУ) на BLDC двигатели. Разработката е оригинална, асемблирана е със съвременен тип управляващ микропроцесор, датчици определящи положението на ротора, с цел максимална ефективност при управлението.

Ключови думи: *безчеткови постояннотокови двигатели, редкоземни магнити, микропроцесорно управление, сензори на Хол, електрически транспортни средства*

TESTING AND ANALYSIS OF THE CONTROLS OF BRUSHLESS DC MOTOR

Lubomir Sekulov, Martin Zlatkov, Martina Tomcheva

Abstract: *At present, the motors competing in the electric transport sector are the brushless DC (BLDC) synchronous motors with permanent rare-earth magnets. They have all features required to replace asynchronous drives, but the main issue with them is the need to construct of an electric traction system (TS) of optimised control ensuring high energy efficiency and smooth running with high-power applications at a low cost.*

This report presents the testing of the key parameters and characteristics of the designed microprocessor control system (MCS) of BLDC motors. This is an original design, which was assembled with contemporary-type control microprocessor and sensors detecting the position of the rotor for attaining maximum effectiveness of control.

Key words: *brushless DC motors, rare-earth magnets, microprocessor control, sensors Hall, electric means of transport*

© 2017 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 масово навлязоха в експлоатация асинхронните електрозадвижвания, управлявани от трифазни DC/AC инвертори. Управлението на всички 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 електрозадвижвания се поставят много сериозни изисквания за качество на входните и изходните параметри. В тази връзка повишаването на енергийната им ефективност се постига основно чрез реализация на ефективно микропроцесорно управление, по зададени алгоритми, в зависимост от конкретните изисквания и специфичните особености на схемното решение.

През последните години като конкурентни на познатите постояннотокови и променливотокови трифазни двигатели в транспортните ЕЗ се прилагат двигатели от типа BLDC. Те имат качествата да изместят АД, но засега основните проблеми при тях са изграждането на цялостно ЕЗ с оптимално управление, осигуряващо висока енергийна ефективност, безпроблемно приложение при високи мощности, както и ниска цена. Микропроцесорното управление трябва да реализира оптимално управление на момента и скоростта на BLDC-двигателя в реално време, като това изисква използването на подходящи датчици и микроконтролери, осигуряващи необходимите параметри и характеристики на ЕЗ в тягов и спирачен режим.

Имайки предвид сложността на тези системи от една страна и от друга спецификата на професионалното обучение, което дава катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта” 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 съвременното техническо развитие в тази сфера.

В тази връзка се проектира и разработи стенд за изследване на основните параметри и характеристики на МСУ на BLDC-двигатели. Системата е асемблирана със съвременен тип управляващ микропроцесор и сензори от дискретен тип, контролиращи положението на ротора на BLDC-двигателя в реално време, с цел реализация на висока ефективност при управлението.

При реализацията на тази задача е направено предварително проучване на прилаганите в техниката схеми, алгоритми и методи за управление на трифазните на този тип двигатели. Анализът на тази предварителна информация даде възможност за проектиране на силова схема на захранване на двигател от типа BLDC и МСУ, с възможност за провеждане на изследвания на основните параметри и характеристики на подобен тип ЕЗ.

2. СИСТЕМИ ЗА ЕЗ И УПРАВЛЕНИЕ НА BLDC-ДВИГАТЕЛИ

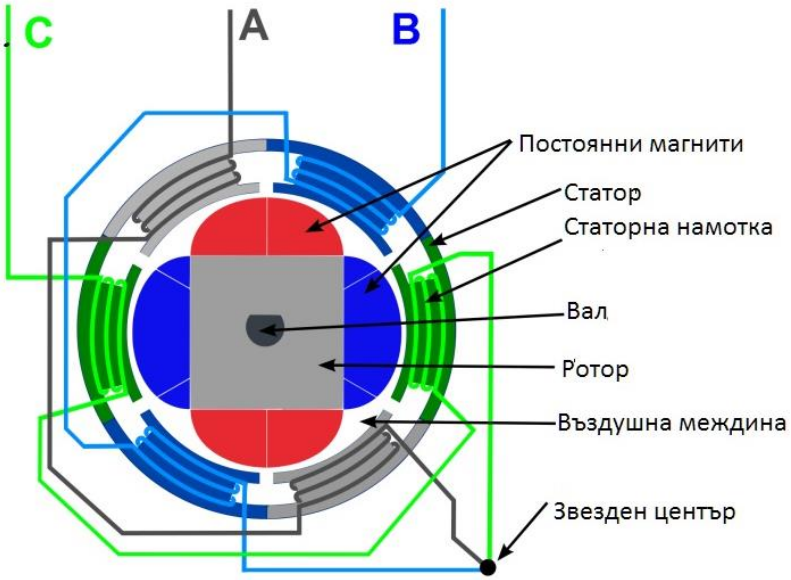
Асинхронните двигатели поради редица конструктивни предимства са предпочитани и приоритетно използвани в съвременните ЕЗ, но те имат съществени недостатъци - ограничен обхват на скоростта и сложно управление. Конвенционалните ПТД имат много привлекателни свойства като висока ефективност, подходящи тягови характеристики и много просто управление на режимите на работа. Съществените им недостатъци са свързани наличието на четки и колектор и всички възникващи от това проблеми. Недостатъците на коментираните двигатели могат да бъдат решени чрез използването на BLDC двигатели. Техните предимства могат да се систематизират по-следният начин:

- дълъг живот на експлоатация;
- висока енергийна ефективност и широк диапазон на скоростта;
- по-добри механични и електромеханични характеристики;
- безшумен режим на работа;
- много по-добро съотношение въртящ момент/тегло в сравнение с другите двигатели.

Коментираните (BLDC) двигатели се управляват с постоянно напрежение под формата на импулси, които се реализират посредством полупроводникови транзисторни ключови елементи. Това управление е възможно, както беше казано, само ако е известно точното положение на ротора, което се контролира от бързи и прецизни сензори. [1]

Двигателят от типа BLDC е въртяща се електрическа машина, при която статора е изпълнен като класически трифазен статор, а роторът има повърхностно монтирани постоянни редкоземни магнити. Статорът може да бъде изпълнен като еднополюсен или многополюсен, като броят на полюсите за всяка фаза определя основните електрически и механични параметри на двигателя.

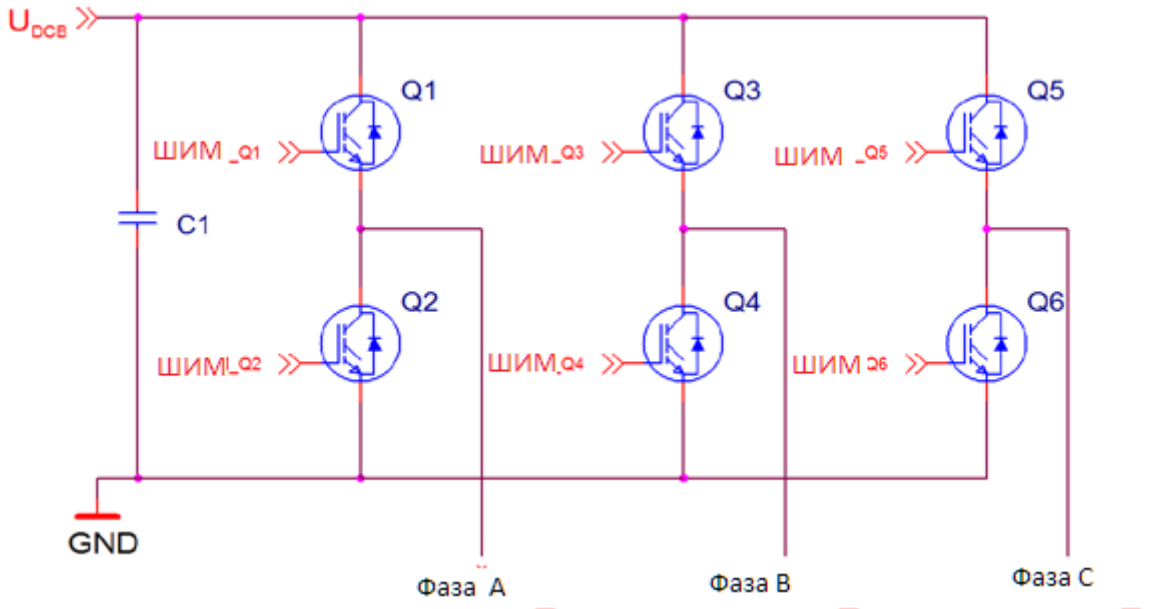
На фиг.1 е показан BLDC-двигател с един полюс на фаза.



Фиг.1. BLDC-двигател с един полюс на фаза.

BLDC-двигателите използват електрически ключове (транзистори), за да реали-

зират необходимата импулсна комутация на тока през трите фази на двигателя, и по този начин да създадат необходимият въртящ момент и обороти. Тези електрически ключове обикновено са свързани в структурата на Н-мост за еднофазни BLDC-двигатели, и мостова трифазна структура за трифазни BLDC-двигатели. На фиг.2 е показана схемата на свързване на инвертора, състоящ се от шест мощни транзистора Q1÷Q6, към постояннотоковия източник на захранване U_{DCE} и трифазната намотка на двигателя. Използва се широчинно-импулсна модулация (ШИМ), която преобразува постоянно захранващо напрежение в модулирано напрежение. По този начин лесно и ефективно се ограничава пусковия ток, контролира се скоростта и въртящия момент.[2]

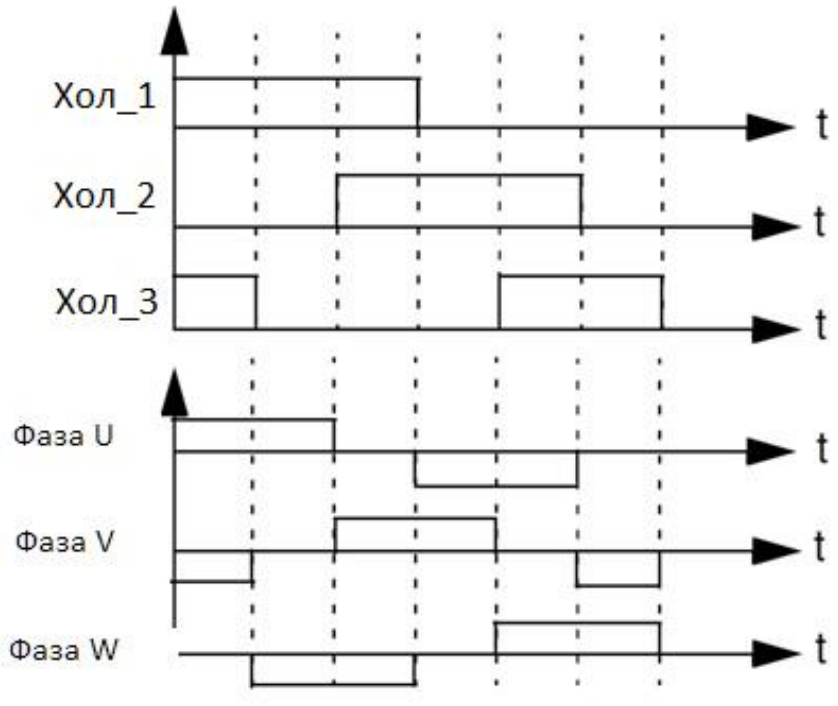


Фиг.2. Силова схема на захранване на BLDC-двигател.

Комутацията на тока във BLDC-двигателите се осъществява благодарение на обратната връзка за позицията на ротора, от която се определя момента на превключване на съответните транзистори, свързани към отделните фази на двигателя, с цел постигане на максимален въртящ момент. Най-лесният и прецизен начин за точното определяне на позицията на ротора е използването на подходящи сензори за положение. Най-използваният в техниката е сензори на Хол вградени в статора на подходящо място.

BLDC-двигателите се управлява с правоъгълни напреженови импулси, съчетани с дадена позиция на ротора. Генерираният статорния поток взаимодейства с потока на ротора, който се генерира от постоянните магнити монтирани на ротора. Прецизното управление на този динамичен процес определя големината на въртящият момент и скоростта на двигателя. Управляващите напреженови импулси трябва да се подават в подходящ момент към двете работещи фази на трифазната система така, че ъгълът между потока на статора и потока на ротора да е приблизително 90°, като това гарантира максимален въртящ момент и мощност на двигателя. Поради този факт, двигателят изисква микропроцесорен контрол и подходящи сензори на положението на ротора при всички работни режими и

покой. На фиг.3 е показана диаграмата на изменение на управляващите напрежения на трите фази на двигателя. [1, 2]



Фиг.3. Напреженията на трите фази в зависимост от сигналите на датчиците.

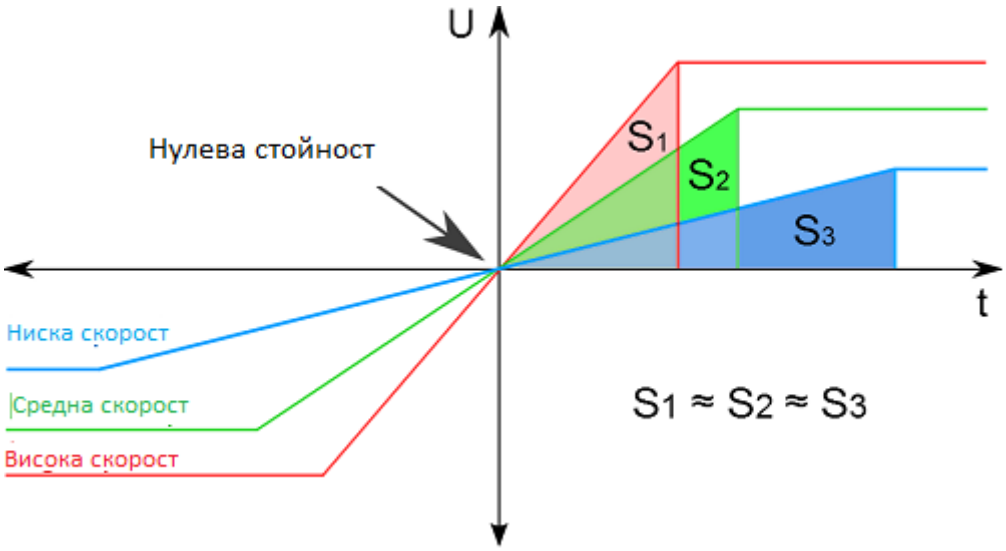
При BLDC-двигателите във всеки момент от времето са натоварени само две от фазите на статора, а през третата токът има нулева стойност.

По този начин се получават шест възможни вектора на напрежение, които се прилагат към BLDC, като контролът на този процес, както беше казано по-горе се осъществява с помощта на подходящи сензори и микропроцесорно управление.

В техниката се използва и безсензорно управление на базата на сигнала от незахранената фаза, по която се определя местоположението на ротора. Но този начин на управление притежава редица недостатъци и намира ограничено приложение в техниката, при специфични условия (силно замърсена и запрашена среда, течна среда и др.).

Най-често използваното управление в тяговите електрозадвижвания в ЕТС е сензорното управление, поради редицата предимства, свързани със специфичните изисквания на управлението на двигателите, използвани в ЕТС[4,5,6].

Един от безсензорните методи за управление включва итерация на противо е.д.н. на двигателя. Тя се основава на прост принцип, интегрираната стойност (с площ на триъгълник) на противоелектродвижещото напрежение на незахранената фаза след нулевата стойност е приблизително една и съща при всички скорости (S1, S2, S3), както е показано на фигура 4. [1, 2]



Фиг.4. Графика на управление при безсензорен метод.

Интегрирането започва, когато противо-е.д.н. на незахранената фаза пресече нулевата стойност. Определянето на точното време на нулева пресечна точка не е много важно, тъй-като противо-е.д.н. е сравнително ниско и влияе слабо върху точността на крайният изчислителен резултат. Комутацията се извършва, когато интегрираната стойност достигне предварително определена прагова стойност. Недостатъкът на този метод на управление е, че той е по-прецизен при ниските скорости на въртене на двигателя, докато при високите скорости неговата ефективност намалява. [3]

Както беше обсъдено, основната задача за безсензорното управление на двигатели от типа BLDC е точната оценка на позицията на ротора. Преди развъртане на двигателя, обаче, позицията на ротора не е известна. Целта на управлението е роторът да се приведе до известна позиция. Тази позиция позволява стартиране на развъртането на вала в желаната посока и генериране на максимален въртящ пусков момент. По време на състоянието на подравняване, трите фази се захранват, за да се получи необходимата роторна позиция. Фаза U и фаза W се захранват с положително напрежение, а фаза V се захранва с отрицателно напрежение. Времето за подравняване зависи от механичната константа на двигателя и натоварването. В това състояние тока на двигателя (въртящият момент) се контролира от микропроцесора.

В разработката са показани част от проведените експериментални изследвания на реализирания стенд при различни алгоритми на управление на BLDC-двигател, куплиран към центробежен вентилатор. Основните алгоритми за управление се реализират от специално разработена за целта МСУ, реализирана с микроконтролер PIC16F1786 и *Хол* сензори с изразен голям хистерезис, контролиращи положението на ротора на двигателя в реално време. Реализираното ЕЗ е внедрено в експлоатация (от 1 година) в съвременни ЕТС, експлоатирани в "Столичен електротранспорт" ЕАД, като реализира управление при конкретни алгоритми на вентилаторните уредби на климатичните им инсталации.

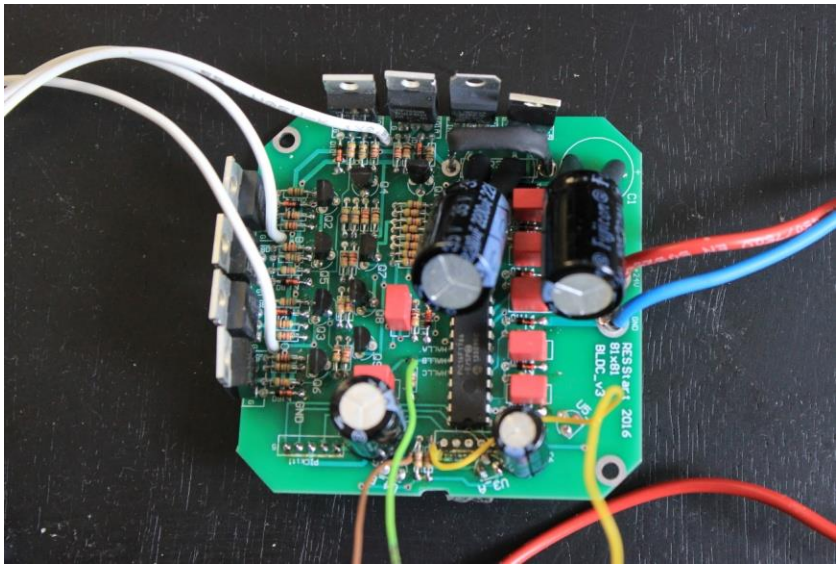
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕАЛИЗИРАНОТО ЕЗ С BLDC-ДВИГАТЕЛ

На фиг.5 е показана блоковата схема на реализираното ЕЗ с BLDC- двигател.

Блоковата схема съдържа захранване, което осигурява работа на ЕЗ в диапазон от 9 V до 35 V. Микропроцесор, който формира импулсите за драйверите и обработва сигналите от обратните връзки. Драйвери, които осигуряват необходимия ток за задвижване на двигателя. Обратна връзка, която е реализирана със сензори на Хол и индицира положението на ротора спрямо статора във всеки един момент.

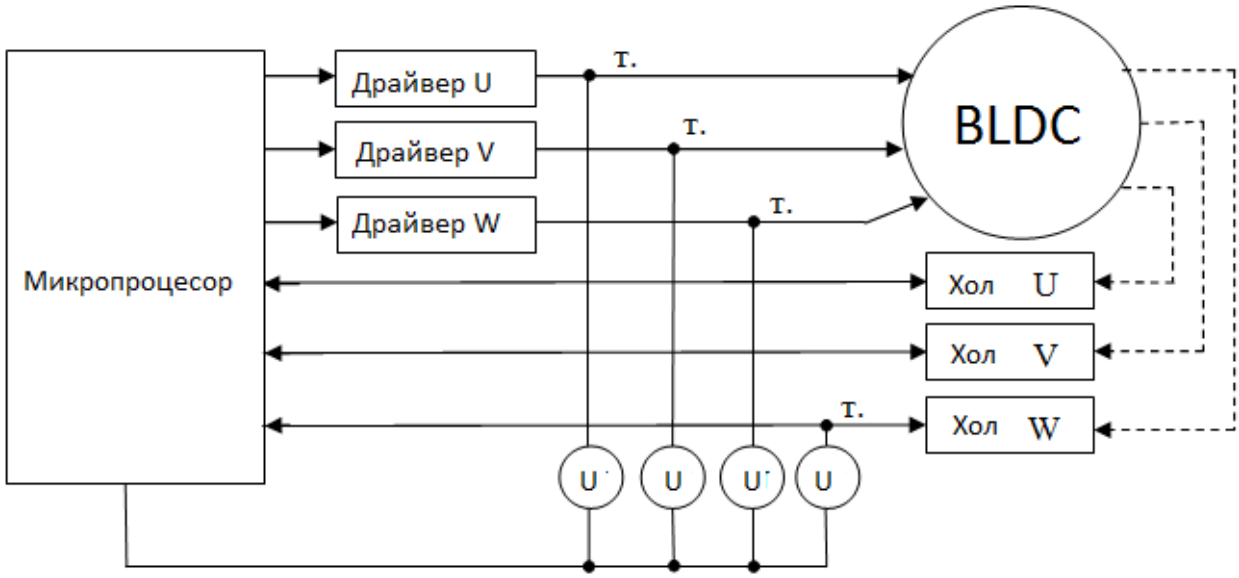
Фиг.5. Блокова схема на МСУ на ЕЗ на BLDC-двигател.

На фиг.6 е показан общият вид на проектираната платка за управление.



Фиг.6. Изработената платка за управление на BLDC двигателя.

На фиг.7 е показана схемата на опитната постановка съответно точките 1-4 на снемане на осцилограмите на напреженията. Двигателят е с максимална мощност 200 W и максимални обороти 2750 min^{-1}. Със 6 полюса на ротора и 4 полюса на всяка фаза на статора. Захранването е нестабилизирано постояннотоково 24 V. Драйверите осигуряват импулсен ток до 37 A, който е достатъчен за този тип двигател. Напреженията се снемат с четириканален цифров осцилоскоп спрямо минуса на захранването с постояннотокови напрежителни сонди 1:1. Сензорите на Хол, както и микропроцесорът са захранени със стандартно стабилизирано напрежение 5V. Драйверите и датчиците са съгласувани по входно-изходни параметри с процесора. На схемата с пунктирани стрелки е показан магнитният поток от постоянните магнити, който влияе на обратните връзки.

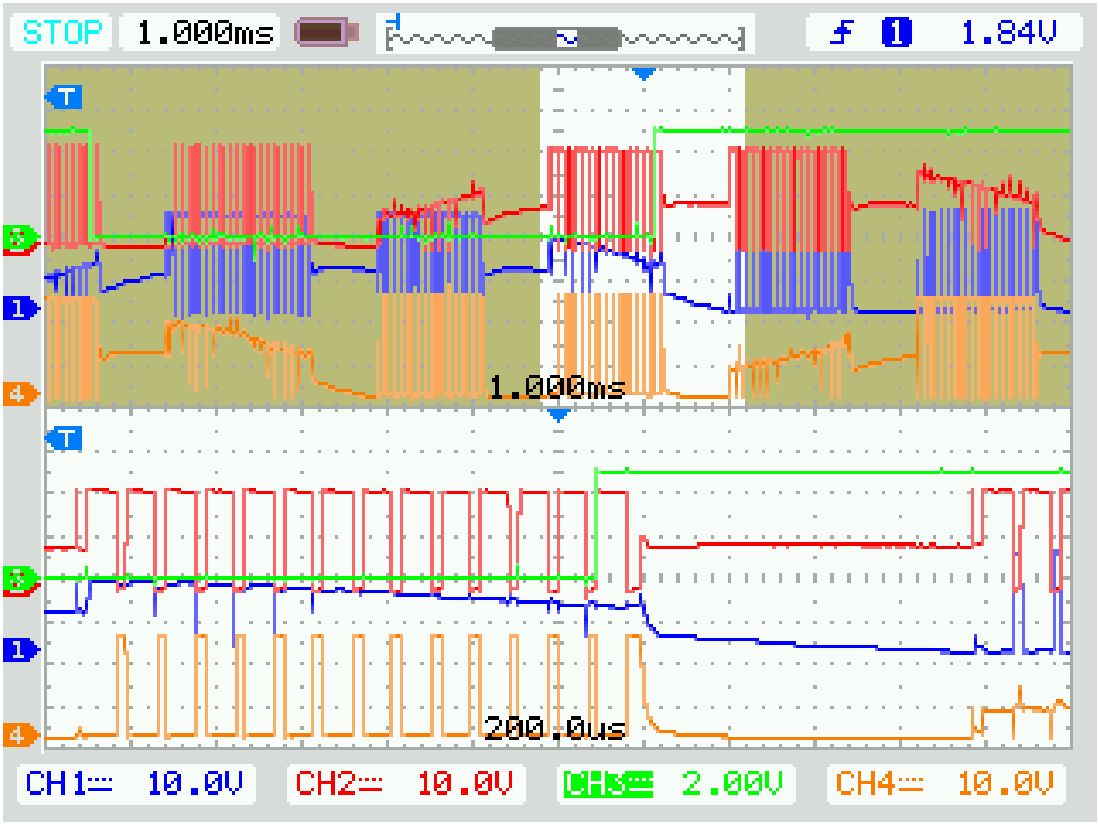


Фиг.7. Схема на опитната постановка.

На фиг.8 е показана една от снетите осцилограми на напреженията на трите фази, CH1, CH2, CH4, и сигналът CH3 от един от трите сензора на Хол, осигуряващ обратната връзка. Осцилограмата е снета при развъртане на двигателя, където ясно се вижда синхронизацията по заден фронт на обратната връзка, реализирана от сензора на Хол. Пакетът от импулси е с определен брой и конкретен ШИМ за зададените обороти. В случая 14 импулса с ШИМ 15% и обороти на двигателя 415 min^{-1}.

При увеличаване на оборотите броят на импулсите намалява, а ШИМ-ът се увеличава. На осцилограмата ясно се вижда, че пакетите с импулси прекъсват, като по този начин се регулират оборотите на двигателя. Т.е. осигурява се плавно развъртане на двигателя при линейно изменящ се ток.

Оборотите достигат максимална стойност при липса на прекъсване между трите напрежения на фазите, т.е. максимален момент и максимални обороти се постигат при показаните на фиг.3 напрежения.



Фиг.8. Измерване на напреженията на трите фази в зависимост от обратната връзка при 415 min^{-1}.

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.

Изследването и анализът на режимите на работа и управлението на двигатели от типа BLDC, дава възможност да се определя ефективно алгоритъма на управление и да се адаптира и приложи при по-големи мощности в тяговите електрозадвижвания в ЕТС.

Актуалността на тази разработка е свързана със създаване на възможности за провеждане на цялостни изследвания в тази актуална и перспективна област на техниката, свързана с ЕЗ от нов тип и възможностите за приложение в ЕТС.

Това ще актуализира и разшири възможностите за обучение, ще повиши качеството на подготовка по редица основополагащи дисциплини, ще създаде условия за разширяване на научноизследователската дейност в областта ЕЗ на управлението и защитата на тяговите BLDC-двигатели.

ЛИТЕРАТУРА

[1] P. Straszko. Three-Phase BLDC Sensorless Motor Control Application, *Freescale Semiconductor, Inc.,Desing Reference Manual, Dokument Nomer DRM 144, Rev. 0,02/2014*

[2] Zhao J.,Yangwei Y. *Brushless DC Motor Fundamentals, July 2011, AN047*

[3] *Muhammad Mubeen, "Brushless DC Motor Primer," Motion Tech Trends, July, 2008.*

[4]T. Furuhashi, S. Sangwongwanich, and S. Okuma, *"A position and velocity sensorless control of brushless DC motors using an adaptive sliding observer,"* in Proc. IEEE IECON'90, 1990

[5] N. Matsui and M. Shigyo, *"Brushless DC motor control without position and speed sensors,"* IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 28, pp. 120–127, Jan./Feb. 1992

[6] S. Ostlund and M. Brokemper, "*Sensorless rotor-position detection from zero to rated speed for an integrated PM synchronous motor drives*," Sept./Oct. 1996

Автори: Любомир Симеонов Секулов, асистент, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков" - София, E-mail adress: *res_start@abv.bg ;* Мартин Димитров Златков, асистент, докторант, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков" - София; Мартина Райчинова Томчева, асистент, докторант, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", Висше транспортно училище „Тодор Каблешков" - София,

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Валентин Матеев

ДИНАМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТ С ФЕРОФЛУИД

Анелия Терзова, Валентин Матеев, Илиана Маринова

Резюме: *В работата са изследвани динамичните характеристики на електромагнит за задвижване с ферофлуид. Разработен е двумерен модел по метода с крайни елементи за изследване на разпределението на магнитното поле. Електромагнитната сила е определена по метода с тензор на напреженията на Максуел. Преходният режим на включване на електромагнита е моделиран чрез система обикновени диференциални уравнения. За решаването на системата е използван метода на Рунге Кута. Направен е тримерен модел по метода с крайни елементи за получаване на налягането във флуида. Определена е съпротивителната сила на ферофлуида, като е отчетена скоростта на движение на котвата. Разработеният модел използва софтуерния продукт ANSYS 12.1 - Mechanical APDL, Fluent.*
Ключови думи: *динамични характеристики, противодействаща сила, електромагнит, ферофлуид, метод с крайни елементи.*

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ACTUATOR WITH FERROFLUID

Aneliya Terzova, Valentin Mateev, Iliana Marinova

Abstract: *In this work dynamic characteristics of solenoid type electromagnetic actuator with ferrofluid are investigated. Transient mode of actuator switching is modeled by system of ordinary differential equations solved by Runge Kutta method. 2D finite element method model is applied and magnetic field distribution is analyzed. Electromagnetic force is calculated by Maxwell stress tensor method. The pressure of ferrofluid is obtained and considering the speed of electromagnetic actuator plunger, the drag force of ferrofluid is calculated. Dynamic characteristics of solenoid electromagnetic actuator with air gap and with working gap with ferrofluid are determined. The developed models use software product ANSYS 12.1 - Mechanical and ANSYS-Fluent.*
Keywords: *Dynamic characteristics, drag force, electromagnetic actuator, ferrofluid, finite element method*

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. INTRODUCTION

Dynamic characteristics are very important because they describe completely the performance of actuator. The dynamic characteristics of the electromagnetic actuator are very sensitive to core shape, electric elements, mechanical elements, magnetic elements as well as magnetic materials. In order to obtain accurate dynamic characteristics of the electromagnetic actuator, it is necessary to perform a transient analysis. To take into account all physical phenomena, it is necessary to coupled electromagnetic field analysis, electric circuit analysis, mechanical movement and fluid flow [1, 2, 3].

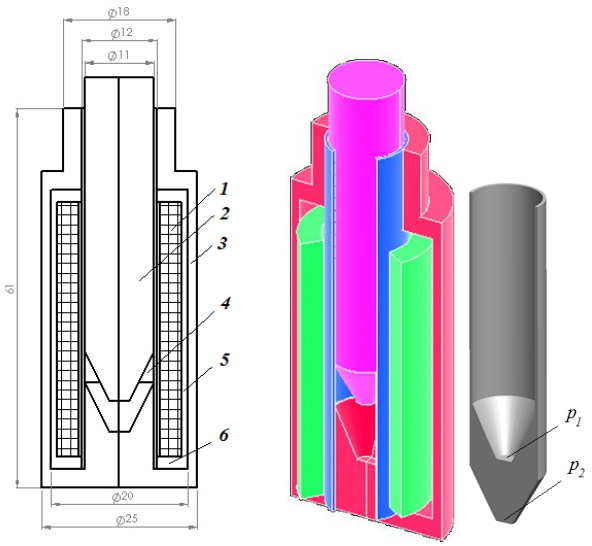
In recent years, growing interest elicit electromagnetic systems with ferrofluid nanoscale materials [4-11]. These systems have many advantages. Electromagnetic actuators with ferrofluid in the working gap are characterized with better operational characteristics compared with those with air gaps, such as reduced energy consumption, compact in size and etc.

Ferrofluid is a colloidal stable suspension of ferrite nanoparticles in liquid and surfactant. The surfactant molecules covered the solid particles and the fluid behaves as a homogeneous system even in the presence of external forces. The nanoparticles are usually iron oxides or different compounds as manganese-ferrite, zinc-ferrite, manganese-zinc-ferrite, cobalt-ferrite, copper-ferrite, and nickel-ferrite. The liquids are deionized water or a mixture of organic solvents or synthetic oils. The sizes of nanoparticles can vary from 1 nm to 100 nm and determine the properties of ferrofluid. In addition there are two other key parameters used to specify ferrofluids, namely the saturation magnetization and viscosity. By varying the constituents, a wide diversity of ferrofluids with different properties can be created [5-8].

In this work, the dynamic characteristics of solenoid type electromagnetic actuator are determined. 2D finite element model of solenoid actuator is implemented to obtain the electromagnetic force and the distribution of magnetic field in the actuator. 3D finite element model of ferrofluid volume is developed and pressure of ferrofluid is obtained. The drag force is calculated. Dynamic behavior of electromagnetic actuator is modeled by coupled approach including magnetic field model, electric circuit model, mechanical movement and ferrofluid flow.

2. ELECTROMAGNETIC ACTUATOR

The electromagnetic actuator under consideration is solenoid type construction. In Fig.1 a) are shown dimensions of electromagnetic actuator, b) - the scheme and c) - the modeled volume of ferrofluid. The material of core and plunger is electrical steel with B-H characteristic, shown in Fig.2. The air gap is filled with ferrofluid and is considered as a magnetic gap. The coil consists of 632 turns, copper wire with diameter 0.5mm is used. Average current density at coil region is $J = 7.5\times10^6$ A/m^2. The mass of the plunger is m = 0.042 kg. Ferrofluid, used in the model, is with relative magnetic permeability $\mu = 3$; saturation magnetization Bs = 44 mT (± 10%), viscosity < 6 mPa.s; density 1.1 g/cm^3; boiling point 230 °C (± 10 %) [11].



a) b) c)

Fig.1. Electromagnetic actuator: 1 – coil; 2 – brass tube; 3 – plunger; 4 – insulation of the coil; 5 – magnetic gap; 6 -ferro-magnetic core.

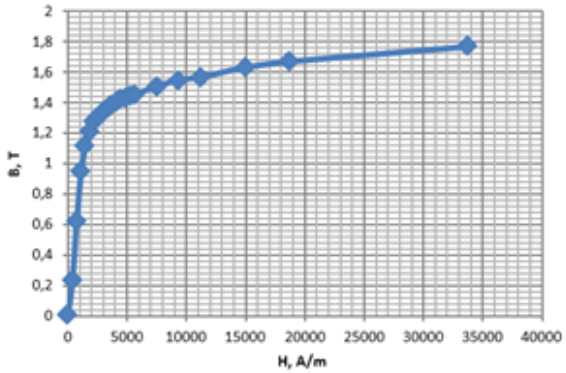


Fig.2. B-H curve of electrical steel.

3. MAGNETIC FIELD MODELING

Magnetic field distribution in electromagnet actuator is described by Poison's equation

$$rot(\frac{1}{\mu} rot\mathbf{A}) = \mathbf{J}\,, \tag{1}$$

where **A**, **J** and μ are the magnetic vector potential, the source current density and the magnetic permeability, respectively.

Homogeneous Dirichlet's boundary conditions are imposed over the boundary of buffer zone surrounding the actuator.

Electromagnetic force acting on plunger is calculated by Maxwell stress tensor method

$$\mathbf{F} = \iint_s \left((\mathbf{n}\cdot\mathbf{B})\mathbf{H} - \frac{1}{2}(\mathbf{B}\cdot\mathbf{H})\mathbf{n} \right) dS\,, \tag{2}$$

where **B**, **H**, **n**, s are the vector of magnetic flux density, vector of magnetic field intensity, unit vector to normal and closed surface, respectively [1].

4. DYNAMIC CHARACTERISTICS

At the plunger of solenoid electromagnetic actuators under consideration, act different forces as the electromagnetic force, force of gravity, forces dependent on friction caused by the initial viscosity of the fluid, hydrostatic forces, depending on the movement of fluid and others.

Dynamic characteristics are determined in switching - transient mode. The system of equations which describes the process of switching the electromagnetic actuator is composed of the electric circuit equation of the coil and motion equation.

$$\begin{cases} U = Ri + L\dfrac{di}{dt} + i\dfrac{dL}{dx}\dfrac{dx}{dt} \\ m\dfrac{d^2x}{dt^2} + F_d = F_{em} + F_{em_f} + F_v \end{cases}, \tag{3}$$

where U, R, L, x are supply voltage, resistance of the coil, inductance of the coil and displacement of the plunger, respectively.

In the (3) m, F_d, F_{em}, F_{em_f}, F_v are mass of the plunger, drag force, electromagnetic force, electromagnetic force from ferrofluid and vertical compressive force, respectively .

Vertical force against the fluid in the cylinder is

$$F_v = (p_1 - p_2)\pi r^2, \tag{4}$$

where p_1 and p_2 is the pressure of the fluid under the plunger (Fig.1 - c), r is the radius of the plunger. This force is in the direction of movement of the fluid. Because the pressure at both ends is almost constant vertical compressive force can be ignored.

The force of internal friction F_d, which is directed in the opposite and tries to slow fluid movements and plunger, is defined by

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho S v^2, \tag{5}$$

where ρ is the fluid density; S - cross-sectional area of the body relative to the direction of movement; v - the speed of the plunger relative to the fluid. In fluid dynamics to quantify the resistance of the object moving in an environment of a fluid, is used the drag coefficient C_d. With the smaller value of this ratio, the less drag force on the object is achieved. The drag coefficient can be divided into two components of the pressure coefficient c_p and a coefficient of friction c_f [10,12,13].

$$C_d = c_p + c_f \tag{6}$$

$$c_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho v^2} \tag{7}$$

$$c_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho v^2} \tag{8}$$

where p is the surface tension, p_0 - static pressure of the free stream, τ - shear stress.

After introducing velocity v the system of equations becomes

$$\begin{cases} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{1}{L}\left(U - Ri - i\dfrac{dL}{dx}\dfrac{dx}{dt}\right) \\ \dfrac{dx}{dt} = v \\ \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{1}{m}\left(F_{em} + F_{em_f} - kx - F_d\right) \end{cases} \tag{9}$$

The value of electromagnetic force F_{em} and electromagnetic force caused by ferrofluid F_{em_f} is determined from the model of the magnetic field by the finite elements method. To solve the system the Runge Kutta method is used [1].

5. FERROFLUID FLOW

Because the diameter of the plunger is much greater than the gap filled with ferrofluid, the flow is consider as laminar. In the laminar flow of the fluid particles are separated into individual layers, which only sliding relative to one another without mixing.

The movement of ferrofluid in the gap causes a pressure which is composed of two components - pressure caused by the initial viscosity of the fluid P_η and pressure caused by the magnetic field P_M

$$P = P_\eta + P_M \tag{10}$$

The equation of Navier-Stokes describing the laminar flow of incompressible fluid is

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}\right) = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho \mathbf{f}\,, \tag{11}$$

where p is the pressure, v - velocity vector, ρ and η - are the density and the viscosity of the ferrofluid respectively, f - the sum of the forces applied by volume of ferrofluid [12, 13].

6. RESULTS

From the developed 2D model for calculating the magnetic field of the electromagnet with ferrofluid are determined characteristics of the electromagnet. To obtain accurate dynamic characteristics coupled field analysis is solved, including a magnetic field, the electric circuit, the movement of the armature and the movement of ferrofluid. To determine the drag coefficient and the resistive force of ferrofluid is created a model of the volume of the fluid in which the plunger is moving.

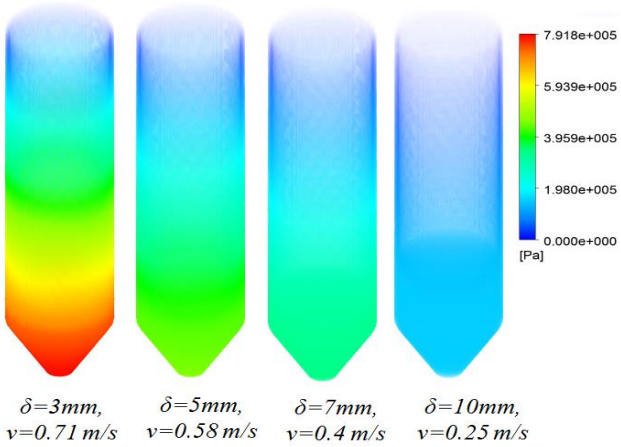


Fig.3. The distribution of pressure in the volume of fluid in the conical plunger.

In Fig.3 is shown the distribution of pressure in the fluid volume at different speeds v and δ working gap between the pole and plunger. Obtained pressure is used to determine the drag coefficient C_d.

In Fig.4 are shown the change of the drag coefficient of the fluid C_d depending on the speed. The drag force of the ferrofluid (5) is given in Fig.5.

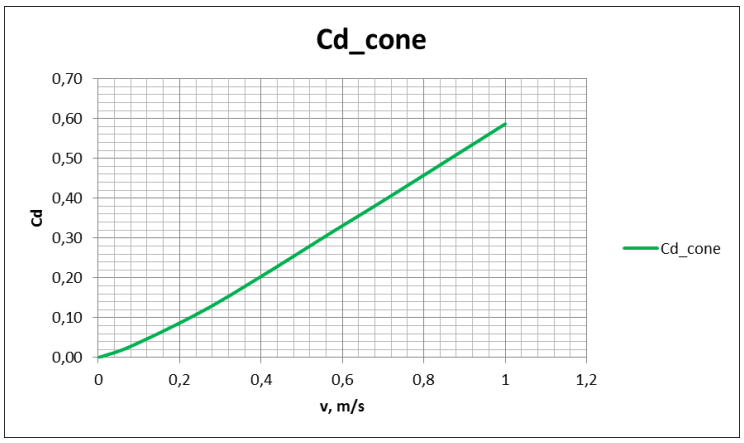


Fig.4. Drag coefficients of fluid depending on the speed.

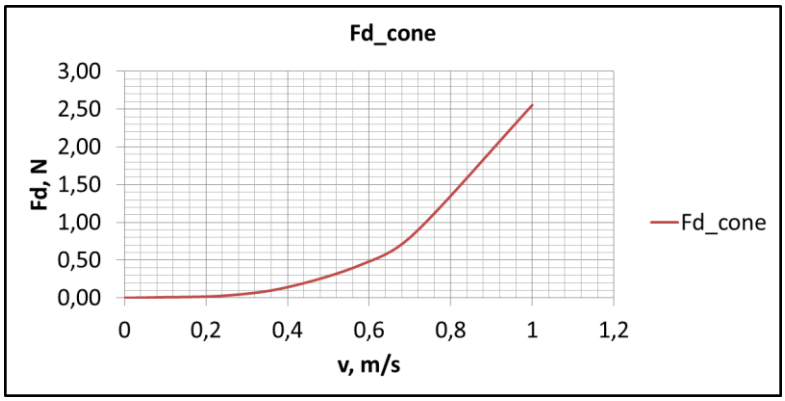


Fig.5. Drag force of the ferrofluid depending on the speed.

The dynamic characteristics of the electromagnet with conical plunger are calculated. The obtained system of equations is solved by the method of Runge Kutta. The values of the electromagnetic force and inductance are calculated from the model of the magnetic field by the finite elements method. The initial conditions for time $t_0 = 0$ are $\delta_0 = \delta_{in}$, $x_0 = 0$, $i_0 = 0$, $U = 6V$, $R = 3.7\Omega$. The calculation process is automated using Matlab and ADPL (ANSYS Parametric Design Language).

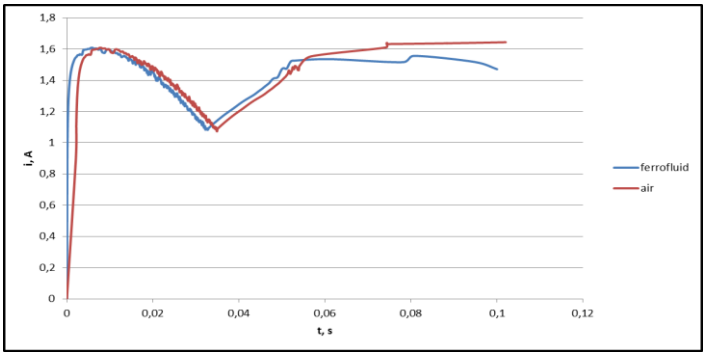


Fig.6. Time dependence of current in coil

In Fig.6 are given the dynamic characteristics of the current changing with time in switching mode of the electromagnet. The calculation are made for electromagnet

with air gap and with working gap filled with ferrofluid, having a relative magnetic permeability $\mu_r = 3$. In Fig.7 are presented characteristics of speed changing with time and in Fig. 8 are shown characteristic of motion changing with time.

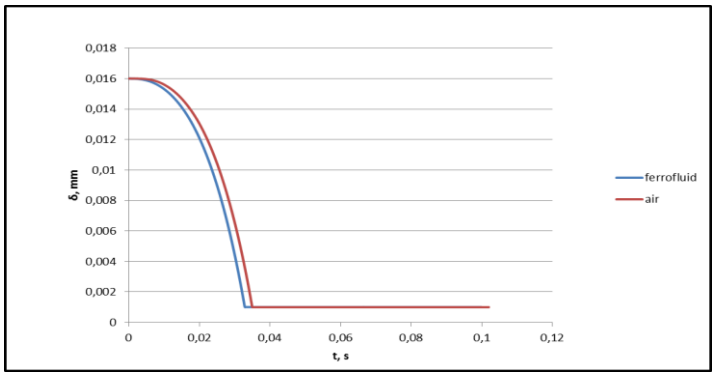


Fig.7. Time dependence of motion of plunger

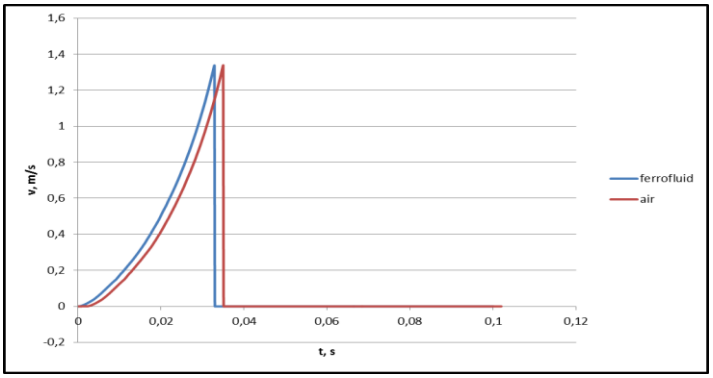


Fig.8. Time dependence of speed plunger

7. CONCLUSIONS

Solenoid type electromagnetic actuator is investigated for calculation of the dynamic characteristics. For accurate analysis, the drag coefficient of electromagnetic actuator with ferrofluid is determined. Drag force of ferrofluid increases with the speed. For small magnetic gaps the speed and the drag force are higher. Dynamic characteristics of the electromagnetic actuator with air gap are compared with those of the electromagnetic actuator with working gap with ferrofluid, which shows that in switching mode the current in actuator with ferrofluid is lower than in electromagnet with air gap. The plunger velocity of actuator with ferrofluid is lower than actuator with air gap. The switching time of solenoid almost not influenced.

The obtained results could obtained results be used in design, analysis and optimization of electromagnetic obtained results systems working with ferrofluid materials.

REFERENCES

[1] I. Yatchev, I. Marinova, ***Numerical Analysis and modeling of circuits and fields***, Technical University of Sofia, 2007. (in Bulgarian)

[2] V. Mateev, I. Marinova, A. Terzova, ***Transient electromagnetic modeling of electromagnetic system***, Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 61, book 2, 2011, pp. 113 – 121

[3] Dong-Kyu Shin, Myung-Jun Choi, Jung-Lok Kwon and Hyun-Kyo Jung, ***Analysis of an Electromagnetic Actuator for Circuit Breakers***, Journal of Electrical Engineering and Technology, 2007, pp. 346-352

[4] B. Sreedhar, R. Kumar, P. Sharma, S. Ruhela, J. Philip, S. Sundarraj, N. Chakraborty, M. Mohana, V. Sharma, G. Padmakumar, B. Nashine, K. Rajan, ***Development of active magnetic bearings and ferrofluid seals toward oil freesodium pumps***, Nuclear Engineering and Design, 4 May 2013, p.9.

[5] B. Andò, S. Baglio, A. Beninato, ***A ferrofluid inclinometer with a time domain readout strategy***, Proc. Eurosensors XXVI, Kraków, Poland, 2012, pp. 586 – 589

[6] K. Raj, B Moskowitz and S. Tsuda, ***New commercial trends of nanostructured ferrofluids***, International Journal of Engineering and Materials Sciences, 2004, pp. 241-252

[7] C. Scherer, A. M. Figueiredo Neto, ***Ferrofluids: Properties and Applications***, Brazilian Journal of Physics, 2005, pp. 718-727

[8] W. Horak, M. Szczęch, ***Experimental and numerical determination of the static critical pressure in ferrofluid seals***, Journal of Physics: Conference Series 412, 2013, pp. 1-6

[9] T. Yoon, J. Lee, D. Kim, Y. Lee, M. Park, ***Experimental Investigation of Magnetic Fluid used in Tandem mode for Underwater Vehicle System***, 16th International Conference on Mechatronics Technology, Tianjin, China, 2012, pp. 59-61.

[10] T. Schultheis, D. Hoheisel, W. Xiao, L. Molella, E. Reithmeier, L. Rissing, S. Hardt, ***Performance of an adaptive liquid microlens controlled by a microcoil actuator***, Microfluid Nanofluid, vol. 13, 2012, pp. 299–308

[11] V. Mateev, I. Marinova, Y. Saito, ***Coupled Field Modeling of Ferrofluid Heating In Tumor Tissue***, IEEE Transactions On Magnetics, 2013, pp. 1793 – 1796.

[12] R. E. Rosensweig***, Ferrohydrodynamics***, Dover Publications, 2014

[13] G.S avioz, V. Ruchet, Y. Perriard, ***Study of a Miniature Magnetorheological Fluid Actuator for Haptic Devices***, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Canada, 2010, pp.1197-1202

Автори: Aneliya Terzova, Mag. Eng., Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *aterzova@tu-sofia.bg*; Valentin Mateev, Assoc. prof. PhD Eng., Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *vmateev@tu-sofia.bg*;; Iliana Marinova, Prof. D.Sc. Eng., Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *iliana@tu-sofia.bg*

Received 15 December 2016 **Reviewer:** Prof. PhD Raina Tzeneva

ПРОБЛЕМИ ПРИ РАБОТА НА ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН КОНТАКТОР И СЕНЗОР С МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛНИ ЕЛЕМЕНТИ

Иван Костов

Резюме: *В работата е извършен анализ на надеждността във вериги, комутиращи маломощни сигнали. Показана е схема за магниточувствителен сензор на положение на котвата на електромагнитен контактор с удвоена чувствителност и с многократно увеличение на средното време между възникване на отказите.*
Ключови думи: *електромагнитен контактор, магнитодиод, магниточувствителен сензор,*

PROBLEMS AT WORK ON ELECTRICAL CONTACTOR AND MAGNETIC-SENSITIVE SENSOR ELEMENTS

Ivan Kostov

Summary: *The work has an analysis of reliability in circuits, switching low power signals. A scheme for a magnetic-sensitive position sensor armature electromagnetic contactor with doubled sensitivity and repeated increase in the mean time between failures (MTBF).*
Keywords: *electromagnetic contactor, magnetodiod, magneto-sensitive sensor.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Известно е, че при контактна апаратура на повърхността на контактите се появява окисен непроводящ слой дори и при затворени щепселни и щекерни контакти на електронни платки, особено при транспортни средства и широк диапазон на околната температура. В някои случаи повърхностният слой се разрушава механично, но част от разрушения материал, оставяйки между контактите, намалява контактното петно, съответно се увеличава контактното съпротивление и следват нови нарушения в контактуването.

При експлоатация се появяват частични и пълни нарушения на контактуването в маломощни управляващи вериги като: закъснения при включването; понижен ток в управляващата верига; липса на контакт.

Практиката показва, че такива частични нарушения са неизбежни, а тяхното появяване има случаен характер. Интензивността на отказите λ е обратнопропорционална на напрежението и тока във веригите за управление, следователно тя се увеличава на няколко порядъка при напрежения под 12V и токове, помалки от 100 mA. [1,2,3].

© 2017 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

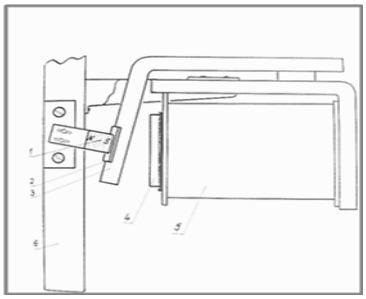
$$\lambda = \frac{8.10^{-6}}{U.I}$$

С други думи, средното време между възникване на отказите (*MTBF- Mean time between failures*) рязко намалява.

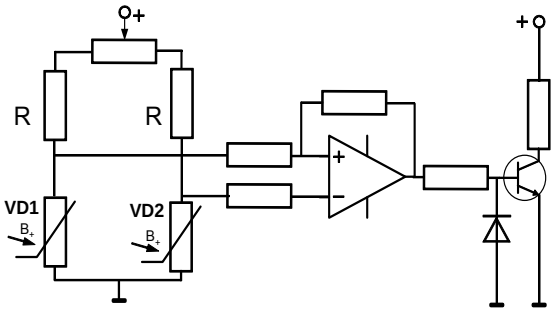
2. СЪЩИНСКА ЧАСТ

С цел повишаване на надеждността на работа трябва: да се сведе до минимум използването на контакни блокировки в системите за управление с импулсно регулиране на електрозадвижването на транспортни средства; да се използва резервиране на най-отговорните информационни вериги; да се заменят с безконтактни блокировки, използващи магниточувствителни елементи като магниторезистори, Хол-преобразуватели, магнитодиоди, магнитотранзистори.

В работата се описва магниточувствителен сензор (МЧС) за положението на котвата на електромагнитен контактор тип TLb. (фиг.1).



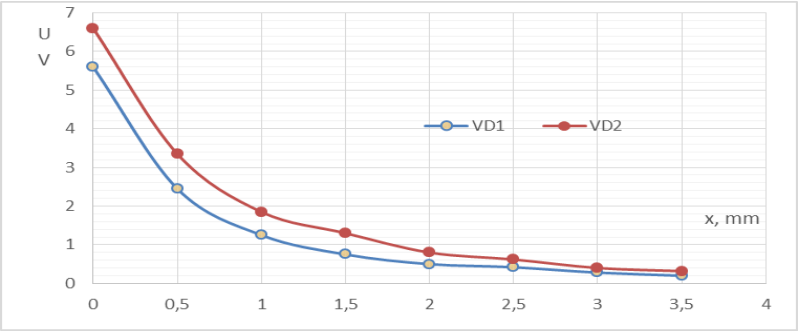
Фиг.1. Схематично изображение на конструкция със сензор за положение
1-сензор, 2- пластина, 3- котва, 4- сърцевина, 5- намотка, 6- неподвижна част.



Фиг.2. Принципна схема на сензора.
(VD1-основен магнитодиод, VD2-спомагателен магнитодиод)

Сензорът за положение е изпълнен с малък постоянен магнит и два магнитодиода, основен и спомагателен (фиг.2). Последният може дори да е извън магнитното поле на постоянния магнит, тогава служи само като терморезистор, компенсиращ температурната зависимост на основния магнитодиод. Двата магнитодиода са свързани в мостова схема с два резистора с една и съща стойност и коригиращ тример потенциометър. Такава схема позволява също да се увеличи

два пъти чувствителността на сензора. Предавателната характеристика е напрежението на диагонала след усилване от операционен усилвател с хистерезис. Измененията на напреженията на двата магнитодиода $U = f(x)$ са показани на графиката (фиг.3).



Фиг.3. Зависимост на напреженията от преместването *x*.

Увеличената чувствителност позволява да се опрости конструкцията и настройката на сензора, да се избегнат вероятни удари на котвата по магнитната му система. При включване на контактора котвата се отдалечава от сензора, транзисторът на изхода се отпушва. Такава „отрицателна“ логика е необходима, за да се предотврати едновременното включване на други контактори от силовата схема, с друга функция. Това не трябва да става и при прекъсване захранването на сензора, при размагнитване на постоянния магнит, при късо съединение на магнитодиодите, при залепване на котвата.При всички тези неизправности на изхода на сензора се получава сигнал, че контакторът е „включен“, което предотвратява възможни аварии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контактните блокировки могат успешно да се заменят с бесконтактни сензори за положение на подвижната част на контактора.

Използването на схема с два магнитодиода дава възможност да се компенсира температурната им зависимост и повишава чувствителността на сензора два пъти при преместване около 2 мм .

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] A.Albers, P.Martin, B.Lorentz. Modeling and design of contacts in electrical connectors. ICED11,2011

[2]http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-013-electromagnetics-and-applications-spring-2009/readings/MIT6_013S09_notes.pdf

[3] Philips Semiconductors Technical Note, ”*Magnetic Field Sensors “*, 1999, 8p.

Автор: Иван Костов, доц. д-р, кат. Обща електротехника, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София; E-mail adress: *igkostov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2016 г. **Рецензент**: доц. д-р Калинка Тодорова