ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

Том 63, книга 6, 2013

V-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2013“

2 - 5 септември 2013 г., Созопол, България

PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 63, Issue 6, 2013

V-th CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING “EF 2013”

September 2 - 5, 2013, Sozopol, Bulgaria

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. дтн Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. дтн Елена ШОЙКОВА

членове

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

секретар-организатор

инж. Мария ДУХЛЕВА

EDITORIAL BOARD

Editor -in -Chief

Prof. D.Sc. Emil NIKOLOV

Editor -in -Vice -Chief

Prof. D.Sc. Elena SHOYKOVA

Editors

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

Organizing Secretary

Eng. Maria DUHLEVA

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

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

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

ISSN 1311-0829

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

форум
„ДНИ НА НАУКАТА НА ТУ-СОФИЯ“ Созопол’2013

V-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2013“

2 - 5 септември 2013 г., Созопол, България

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

председател

проф.	дтн	**Иван**	**Ячев**

членове

доц.	д-р	**Вълчан**	**Георгиев**
доц.	д-р	**Ангел**	**Цолов**
доц.	д-р	**Петър**	**Наков**
доц.	д-р	**Владимир**	**Лазаров**
проф.	дтн	**Илиана**	**Маринова**
доц.	д-р	**Андрей**	**Крумов**
доц.	д-р	**Светлана**	**Цветкова**
доц.	д-р	**Стефчо**	**Гунински**
проф.	дтн	**Ганчо**	**Божилов**

Научен секретар

гл. ас.	д-р	**Николай**	**Матанов**

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Forum
„DAYS OF SCIENCE OF TU-SOFIA“ Sozopol’2013

V-th CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING “EF 2013”

September 2 - 5, 2013, Sozopol, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEEE

chair of PC

Prof. DSc **Ivan Yatchev**

members of PC

Assoc. Prof. PhD **Vulchan Gueorgiev**

Assoc. Prof. PhD **Angel Tzolov**

Assoc. Prof. PhD **Peter Nakov**

Assoc. Prof. PhD **Vladimir Lazarov**

Prof. DSc **Iliana Marinova**

Assoc. Prof. PhD **Andrey Krumov**

Assoc. Prof. PhD **Svetlana Tzvetkova**

Assoc. Prof. PhD **Stefcho Guninski**

Prof. DSc **Gantcho Bojilov**

scientific secretary

Assist. Prof. PhD **Nikolay Matanov**

СЪДЪРЖАНИЕ том 63, книга 6

ЕЛЕКТРОТЕХНИКА

01. **Кръстьо Хинов, Йоско Балабозов, Иван Ячев, Димитър Карастоянов** 17
Влияние на несиметрии в конструкцията върху задвижващата сила на електромагнит за Брайлов дисплей

02. **Калинка Тодорова, Стефчо Гунински**. 25
Място на импулсните вихровотокови методи в съвременния безразрушителен контрол

03. **Калоян Бурванов**. 31
Изпитване на твърда ошиновка за разпределителни уредби високо напрежение

04. **Камелия Николова, Николина Янева, Петя Джановска**. 41
Фотобиологично действие на светлодиодни източници за приложение в бита

05. **Кирил Стойков**. 49
Програмна реализация на алгоритъм за автоматизирано пресмятане на трансформатори за електродъгови пещи

06. **Костадин Миланов, Райна Ценева** 59
Изследване процесите на намагнитване на магнитни системи с редкоземни магнити

07. **Людмил Стоянов**. 67
Моделиране на автономна фотоволтаична система

08. **Людмил Стоянов, Захари Зарков, Християн Кънчев, Владимир Лазаров**. 77
Оценка на производителността на фасадни фотоволтаични инсталации

09. **Милко Йовчев, Стойо Платиканов** 85
Изследване на режимите на работа на автономна фотоволтаична система за улично осветление

10. **Марин Вълков, Иван Петров**. 95
Иновативен метод за добиване на възобновяема електрическа енергия

11. **Мария Кънева, Николина Петкова**. 103
Изследване на българския електроенергиен пазар

12. **Милена Недева**. 111
Изследване на светлоразпределението на осветители, комплектовани с ретрофит лампи

13. **Михаела Славкова, Костадин Миланов, Минчо Минчев**. 119
Изследване на магнитни ключове с аморфни и нанокристални материали

14. **Михо Михов, Пламен Накев, Младен Сариев** 125
Замяна на възбудителна намотка на постояннотоков двигател с последователно възбуждане с възбуждане с постоянни магнити

15. **Михо Михов, Димитър Сотиров, Адриан Иванов** 133
Индуктивности по осите d, q на синхронен реактивен двигател с разпределена статорна намотка -опитно и числено изследване

16. **Михо Михов, Ганчо Божилов, Адриан Иванов** 141
Електромагнитен момент на еднофазен синхронен двигател с постоянни магнити в ротора

17. **Николай Василев, Николина Янева, Марин Вълчев**. 151
Ретроспекция на светлодиодното външно осветление в Европа

18. **Никола Николов, Димо Стоилов**. 161
Участие на производители използващи възобновяеми източници в електроенергийните пазари

19. **Николай Караджов** 169
Ограничител на ток на късо съединение

20. **Николай Матанов**. 177
Оценка на колебанието на напрежение в електроснабдителни системи на промишлени предприятия при пускане на мощни АД

21. **Петър Калейчев**. 187
Друг подход за оценка ефективността на заземителни инсталации

22. **Петър Маноилов, Ганчо Ганчев, Христо Василев** 195
Приложение на фотоволтаично електрозахранване на тунелно осветление

23. **Петър Матов** 203
Влияние на напрежението на опън на контактния проводник върху високоскоростните показатели на контактни мрежи

24. **Пламен Парушев**. 211
Микропроцесорно управление на корабен палубен кран

25. **Пламен Парушев, Валентин Гюров, Владимир Чиков, Росен Василев, Никола Македонски** 219
Изследване показателите на качеството на електрическата енергия в условията на несиметрично и нелинейно натоварване

26. **Пламен Парушев, Владимир Чиков, Валентин Гюров, Росен Василев, Никола Македонски**. 229
Относно възможностите за постигане на електромагнитна съвместимост при потребители, работещи в режим на понижено натоварване

27. **Пламен Ризов, Адриан Иванов**. 237
Изследване на магнитното поле в синхронен турбогенератор при накъсо съединени навивки във възбудителната намотка

28. **Пламен Ризов, Адриан Иванов**. 247
Изследване влиянието на скосяването на статорните канала върху хармоничния състав на индукцията във въздушната междина в синхронен хидрогенератор

29. **Пламен Ризов, Станимир Вичев**. 255
Съотношение между напреженията при късо съединение в първичните намотки на напреженови трансформатори

30. **Рад Станев**. 263
Стратегии за регулиране на напрежението в разпределителни мрежи с разпределени енергийни източници

31. **Рад Станев, Анастасия Кръстева, Карло Торнели, Карло Сандрони**. 273
Квазидинамичен подход за анализ на бавни преходни процеси в областта на времето в електрически мрежи с разпределени енергийни източници

32. **Рад Станев, Мартин Райков** 281
Математическо моделиране на акумулаторни батерии за нуждите на квазидинамичния анализ на хибридни микро EEC

33. **Росен Танев, Валентин Матеев, Илиана Маринова** 289
Моделиране на електрическа дъга

34. **Светлана Цветкова** 297
Изследване на качеството на електрическата енергия захранваща битови консуматори в затворен жилищен комплекс

35. **Светлана Цветкова, Николай Стоманярски, Ангел Петлешков, Ваня Петрова** 307
Прекъсвания в електрически мрежи - оценка и анализ

36. **Светлана Цветкова, Ангел Петлешков, Николай Стоманярски** 317
Изследване на качеството на електрическата енергия на помпена станция на затворен жилищен комплекс

37. **Симона Петракиева, Галя Георгиева-Таскова, Захари Иванов** 327
Моделиране на електрически вериги с разрядни лампи

38. **Станимир Вичев, Анна Иванова** 337
Изследване на входен трансформатор от защитни прекъсвачи за ниско напрежение при различна форма на захранващото напрежение

39. **Станимир Вичев, Пламен Ризов** 345
Излишно заработване на релейните защити на синхронни генератори при повреди в напреженовите им трансформатори

40. **Станимир Стефанов, Николай Бърдарски, Ива Драганова, Ради Пипев** 351
Осветяване на конфликтни зони в уличното осветление

41. **Станимир Стефанов, Христо Василев, Ива Драганова, Пламен Цанков** 361
Как се определя експлоатационния фактор mf при проектирането на улични осветителни уредби със светодиодни осветители

42. **Станимир Стефанов, Ива Петринска, Ива Драганова, Христо Василев** 371
Оптимална спектрална крива на излъчване на светодиоди и ниски разходите за осветление

43. **Стефчо Гунински, Валери Иванов** 381
Разпределение на вихровите токове в проводящи плоски обекти при безразрушителен контрол с некласически електромагнитни преобразуватели

44. **Стойо Платиканов, Петър Цвятков, Цветозар Петков, Милко Йовчев** 387
Изследване на електромагнитната съвместимост на електрическите двигатели и трансформатори

45. **Стойо Платиканов, Пламен Цанков, Николай Бърдарски, Дешка Маркова, Милко Йовчев, Петър Цвятков, Емил Станев** 397
Енергийно обследване и енергийно-ефективна модернизация на осветлението в Технически Университет-Габрово

46. **Теодора Терентева, Мария Кънева, Димо Стоилов** 407
Концепции и цели на управление на потреблението на електрическа енергия

47. **Теофана Пулева** 415
Адаптивна компенсация на смущения в енергийна система с ограничена мощност

48. **Тодор Лалев**. 425
Изследване и анализ на преходни процеси при аварийни режими в тяговите електрозахранващи вериги на „метрополитен“ ЕАД

49. **Христо Василев**, **Вълчан Георгиев**, **Ива Драганова**, **Станимир Стефанов** 435
Капсулована оптична система за светодиодни улични осветители

50. **Чавдар Джамбазки**. 441
Електрически източници на енергия за електромобили - сравнение, условия за избор, анализ

CONTENTS volume 63, Issue 6

ELECTRICAL

01. Krastyo Hinov, Iosko Balabozov, Ivan Yatchev, Dimitar Karastoyanov 17
Influence of Asymmetry in the Construction On the Static Force Characteristics of a Permanent Magnet Linear Actuator for Braille Screen

02. Kalinka Todorova, Stefcho Guninski. 25
Place of Pulsed Eddy Current Methods in the Modern NDT

03. Kaloyan Burvanov. 31
Testing of Rigid Busbars for High Voltage Switchyards

04. Kamelia Nikolova, Nikolina Yaneva, Petya Djanovska. 41
Photobiological Impact of LED Lamps for Domestic Applications

05. Kiril Stoykov. 49
Program Realization of the Algorithm for Automatic Calculation of the Behaviour of Furnace Transformers

06. Kostadin Milanov, RainaTzeneva. 55
Investigation of the Magnetization Processes of Magnetic Systems with Rare Earth Magnets

07. Ludmil Stoyanov. 67
Autonomous Photovoltaic System Modeling

08. Ludmil Stoyanov, Zahari Zarkov, Hristian Kanchev, Vladimir Lazarov. 77
Facade Photovoltaic Installation Productivity Estimation

09. Milko Yovchev, Stoyo Platikanov. 85
Study of Operating Modes of Stand-Alone Photovoltaic System for Outdoor Lighting

10. Marin Valkov, Ivan Petrov 95
Innovative Method for Generating Renewable Energy

11. Maria Kaneva, Nikolina Petkova. 103
Study of Bulgarian Electricity Market

12. Milena Nedeva. 111
Study Light Distribution for Lighting, Complete with Retrofit Lamps

13. Michaela Slavkova, Kostadin Milanov, Mintcho Mintchev. 119
Study of Magnetic Switches with Amorphous and Nanocrystalline Materials

14. Miho Mihov, Plamen Nakev, Mladen Sariev 125
Replacement of Brushed DC Motor`s Stator Series Excitation Winding With a Permanent Magnet Excitation

15. Miho Mihov, Dimitar Sotirov, Adrian Ivanov. 133
d, q Axes Inductances of Synchronous Reluctance Motor with Distributed Stator Winding - Experimental and Numerical Research

16. Miho Mihov, Gancho Bojilov, Adrian Ivanov 141
Electromagnetic Torque of Single-Phase Synchronous Motor with Permanent Magnets in the Rotor

17. Nikolay Vassilev, Nikolina Yaneva, Marin Valchev 151
Retrospection of LED Outdoor Lighting in Europe

18. Nikola Nikolov, Dimo Stoilov. 161
Participation of Renewable Sources Generators in Electricity Markets

19. Nikolay Karadzhov 169
Fault Current Limiter

20. Nikolay Matanov 177
Estimation of Voltage Sags in Industrial Supply Systems During Powerful Induction Motors' Starting

21. Petar Kaleychev 187
Other Approach for Assessment of the Effectiveness of Grounding Systems

22. Petar Manoilov, Gancho Ganchev, Hristo Vassilev. 195
Application of Photovoltaic Power Supply in Tunnel Lighting

23. Petar Matov. 203
Impact of the Tensile Stress of the Contact Wire on the High Speed Performance of the Catenary

24. Plamen Parushev. 211
Microprocessor Control of Ship Deck Crane

25. Plamen Parushev, Valentin Gurov, Vladimir Chikov, Rosen Vasilev, Nikola Macedonski. 219
Study on Power Quality Indexes in Case of Asymmetric and Non-Linear load

26. Plamen Parushev, Vladimir Chikov, Valentin Gurov, Rossen Vassilev, Nikola Macedonski. . . 229
On Opportunities for Achieving the Electromagnetic Compatibility to Users Working Under Reduced Pressure

27. Plamen Rizov, Adrian Ivanov. 237
Study of the Magnetic Field in Synchronous Turbo Generator at Short-Circuited Turns in Excitation Winding

28. Plamen Rizov, Adrian Ivanov. 247
Study of the Influence of Chamfering of Stator Channels onto Harmonic Composition of Induction in the Air-Gap of a Synchronous Hydrogenerator

29. Plamen Rizov, Stanimir Vichev 255
Short Circuit Voltages Correlation in Voltage Transformer Primary Windings

30. Rad Stanev 263
Voltage Control Strategies for Distribution Networks with Distributed Energy Resources

31. Rad Stanev, Anastassia Krusteva, Carlo Tornelli, Carlo Sandroni. 273
A Quasi-Dynamic Approach for Slow Dynamics Time Domain Analysis of Electrical Networks with Distributed Energy Resources

32. Rad Stanev, Martin Raykov. 281
Mathematical Modeling of Storage Batteries for the Needs of Quasi-Dynamic Analysis of Hybrid Micro Electric Systems

33. Rosen Tanev, Valentin Mateev, Iliana Marinova. 289
Electric Arc Dicscharge Modeling

34. Svetlana Tzvetkova. 297
Study of the Electrical Energy Quality Supplied Domestic Consumers in Closed Housing Estate

35. Svetlana Tzvetkova, Nikolai Stomaniarski, Angel Petleshkov, Vania Petrova 307
Interruptions in Electrical Nets - Estimation and Analysis

36. Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov, Nikolai Stomaniarski 317
Study of the Electrical Energy Quality in Pump Station of Closed Housing Estate

37. Simona Petrakieva, Galia Georgieva-Taskova, Zahari Ivanov. 327
Calculation of Circuits with Discharge Lamps

38. Stanimir Vichev, Anna Ivanova 337
Study of the input Transformer of Safety Circuit-Breakers for Low Voltage under Different Forms of Supply Voltage

39. Stanimir Vichev, Plamen Rizov 345
Synchronous Generator Relay Protection Redundant Trip by Voltage Transformer Fault

40. Stanimir Stefanov, Nikolay Bardarski, Iva Draganova, Radi Pipev 351
Illumination of Conflict Areas in Street Lighting

41. Stanimir Stefanov, Hristo Vasilev, Iva Draganova, Plamen Tsankov 361
How to Define the Maintenance Factor mf in the Design of Street Lighting Systems of LED Luminaires

42. Stanimir Stefanov, Iva Petrinska, Iva Draganova, Hristo Vasilev 371
Optimal Spectral Curve of Emission of LEDs and Low Cost for Lighting

43. Stefcho Guninski, Valeri Ivanov. 381
Eddy Current Distribution in Plane Conductive Objects in Nondestructive Testing with a New Electromagntic Transducers

44. Stoyo Platikanov, Petar Tsvyatkov, Tsvetozar Petkov, Milko Yovchev 387
Study on the Electromagnetic Compatibility of Electric Motors and Transformers

45. Stoyo Platikanov, Plamen Tsankov, Nikolai Burdarski, Deshka Markova, Milko Yovchev, Petar Tsvyatkov, Emil Stanev. 397
Energy Audit and Energy Efficient Modernization of the Lighting in Technical University of Gabrovo

46. Teodora Terenteva, Maria Kaneva, Dimo Stoilov 407
The Concepts and Aims of Demand Side Management of Electric Power

47. Teofana Puleva 415
Adaptive Disturbance Rejection in Power Limited Energy System

48. Todor Lalev 425
Study the Transient Processes at Failure Modes of Traction Power Supply of „Metropolitan“JSC

49. Hristo Vasilev, Vulchan Gueorgiev, Iva Draganova, Stanimir Stefanov 435
Capsulated Optical System for Road Lighting Luminaire

50. Chavdar Djambazki. 441
Electrical Energy Sources for Electric Vehicles - Comparison Terms of Choice Analysis

Author's Index Volume 63 Issue 6

№		author	page
1.	Adrian	Ivanov	237 ; 247 ; 133 ; 141
2.	Anastassia	Krusteva	273
3.	Angel	Petleshkov	307 ; 317
4.	Anna	Ivanova	337
5.	Carlo	Sandroni	273
6.	Carlo	Tornelli	273
7.	Chavdar	Djambazki	441
8.	Deshka	Markova	397
9.	Dimitar	Karastoyanov	17
10.	Dimitar	Sotirov	133
11.	Dimo	Stoilov	161 ; 407
12.	Emil	Stanev	397
13.	Galia	Georgieva-Taskova	327
14.	Gancho	Bojilov	141
15.	Gancho	Ganchev	195
16.	Hristian	Kanchev	77
17.	Hristo	Vasilev	361 ; 371 ; 435 ; 195
18.	Iliana	Marinova	289
19.	Iosko	Balabozov	17
20.	Iva	Draganova	351 ; 361 ; 371 ; 435
21.	Ivan	Petrov	95
22.	Ivan	Yatchev	17
23.	Iva	Petrinska	371
24.	Kalinka	Todorova	25
25.	Kaloyan	Burvanov	31
26.	Kamelia	Nikolova	41
27.	Kiril	Stoykov	49
28.	Kostadin	Milanov	55 ; 119
29.	Krastyo	Hinov	17
30.	Ludmil	Stoyanov	67 ; 77

№		author	page
31.	Maria	Kaneva	103 ; 407
32.	Marin	Valchev	151
33.	Marin	Valkov	95
34.	Martin	Raykov	281
35.	Michaela	Slavkova	119
36.	Miho	Mihov	125 ; 133 ; 141
37.	Milena	Nedeva	111
38.	Milko	Yovchev	85 ; 387 ; 397
39.	Mintcho	Mintchev	119
40.	Mladen	Sariev	125
41.	Nikola	Macedonski	219 ; 229
42.	Nikola	Nikolov	161
43.	Nikolay	Bardarski	351 ; 397
44.	Nikolay	Karadzhov	169
45.	Nikolay	Matanov	177
46.	Nikolay	Stomaniarski	307 ; 317
47.	Nikolay	Vassilev	151
48.	Nikolina	Petkova	103
49.	Nikolina	Yaneva	41 ; 151
50.	Petar	Kaleychev	187
51.	Petar	Manoilov	195
52.	Petar	Matov	203
53.	Petar	Tsvyatkov	387 ; 397
54.	Petya	Djanovska	41
55.	Plamen	Nakev	125
56.	Plamen	Parushev	211 ; 219 ; 229
57.	Plamen	Rizov	237 ; 247 ; 255 ; 345
58.	Plamen	Tsankov	361 ; 397
59.	Rad	Stanev	263 ; 273 ; 281
60.	Radi	Pipev	351
61.	Raina	Tzeneva	55
62.	Rosen	Tanev	289
63.	Rosen	Vassilev	219 ; 229
64.	Simona	Petrakieva	327
65.	Stanimir	Stefanov	351 ; 361 ; 371 ; 435
66.	Stanimir	Vichev	255 ; 337 ; 345
67.	Stefcho	Guninski	25 ; 381

№		author	page
68.	Stoyo	Platikanov	85 ; 387 ; 397
69.	Svetlana	Tzvetkova	297 ; 307 ; 317
70.	Teodora	Terenteva	407
71.	Teofana	Puleva	415
72.	Todor	Lalev	425
73.	Tsvetozar	Petkov	387
74.	Valentin	Gurov	219 ; 229
75.	Valentin	Mateev	289
76.	Valeri	Ivanov	381
77.	Vania	Petrova	307
78.	Vladimir	Chikov	219 ; 229
79.	Vladimir	Lazarov	77
80.	Vulchan	Gueorgiev	435
81.	Zahari	Ivanov	327
82.	Zahari	Zarkov	77

Volume 63 Issue 6

pages	articles	authors
434	50	82

ВЛИЯНИЕ НА НЕСИМЕТРИИ В КОНСТРУКЦИЯТА ВЪРХУ ЗАДВИЖВАЩАТА СИЛА НА ЕЛЕКТРОМАГНИТ ЗА БРАЙЛОВ ДИСПЛЕЙ

Кръстьо Хинов, Йоско Балабозов, Иван Ячев, Димитър Карастоянов

Резюме: *В статията се изследва влиянието на несиметрии в конструкцията на поляризиран изпълнителен електромагнит за Брайлов екран върху силата на тръгване с цел подобряване на някои негови характеристиките при намаляване на размерите му.*

Ключови думи: *поляризиран електромагнит, постоянни магнити, задвижваща сила, метод с крайни елементи, Брайлов екран.*

INFLUENCE OF ASYMMETRY IN THE CONSTRUCTION ON THE STATIC FORCE CHARACTERISTICS OF A PERMANENT MAGNET LINEAR ACTUATOR FOR BRAILLE SCREEN

Krastyo Hinov, Iosko Balabozov, Ivan Yatchev, Dimitar Karastoyanov

Abstract: *The influence of asymmetry in the construction over the static force characteristics of a recently developed permanent magnet linear electromagnetic actuator for Braille screen is studied. The purpose is to reduce the size of the screen and to achieve better force-stroke characteristics.*

Keywords: *Actuators, permanent magnets, finite element method, driving force, Braille screen*

1. Въведение

Непрекъснато увеличаващите се изисквания за подобряване на условията и качеството на живот на хората и новите съвременни материали и технологии са предпоставка за търсене на нови възможности за възприемане на по-голям обем информация и от хората с увредено зрение. Една такава възможност предоставят т.н. Брайлови екрани – обект на изследване от редица автори [1-7]. В поредица от предишни работи [8-11] се разглеждат възможностите за използване като базови елементи за изграждане на Брайлов екран с намалена консумация на поляризирани изпълнителни електромагнити. В тях се изследват влиянието на различни геометрични размери върху основните им характеристики при различни режими на работа. Получените резултати показват, че работоспособността им най-общо зависи от два основни показателя – силата на тръгване от крайно долно положение и силата на задържане в крайно горно положение. В настоящата работа се изследват възможностите за повишаване на силата на

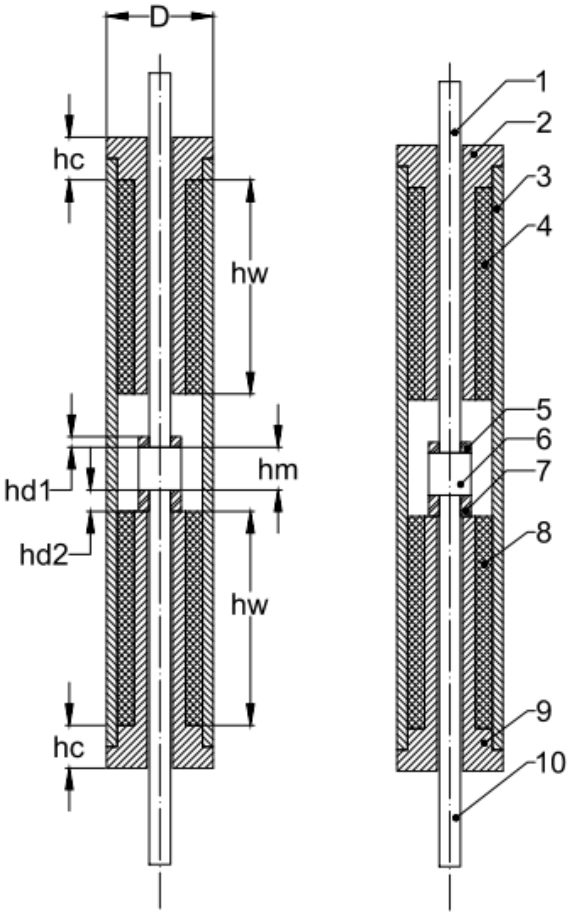
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

тръгване от крайно долно положение чрез въвеждане на несиметрия в конструкцията на задвижващия електромагнит. По този начин се създава възможност да се увеличи тази сила без да се използва допълнителна електроенергия чрез намаляване на създаваната от постоянния магнит в долно положение задържаща сила.

2. Изследван електромагнит

Изследваната конструкция е показана на фиг.1. Тя се състои от външен магнитопровод *3*, управляващи намотки *4* и *8* с магнитопроводи *2* и *9*. Котвата представлява аксиално намагнитен постоянен магнит *6* с феромагнитни шайби *5* и *7* и немагнитни оси *1* и *10* от двете му страни. Задвижването към двете крайни положения се осъществява с помощта на електрически импулси, подавани на управляващите намотки, а задържането на котвата в крайните положения (горно и долно) – от постоянния магнит. Основната и особеност е в използването на различни по височина феромагнитни шайби (горна – *5* и долна – *7*).

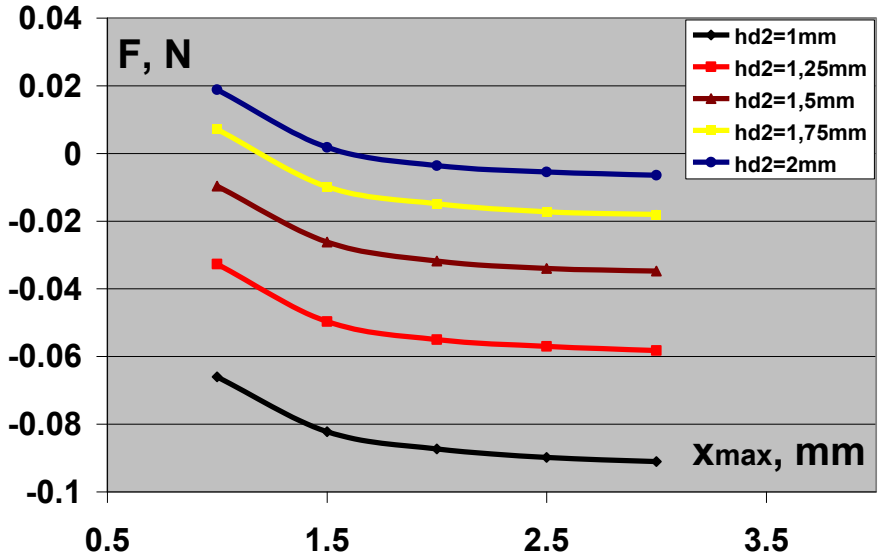


Фиг.1. Конструкция на изследвания електромагнит: 1 и 10 – оси; 2 и 9 – магнитопроводи; 3 – външен магнитопровод; 4 и 8 – управляващи намотки; 5 – горна феромагнитна шайба; 7 – долна феромагнитна шайба; 6 – постоянен магнит; hc – височина на магнитопроводите; hd1, hd2 – височини съответно на горната и на долната феромагнитни шайби; hm – височина на постоянния магнит; hw – височина на управляващите намотки; D –външен диаметър.

3. Моделиране чрез метода с крайни елементи

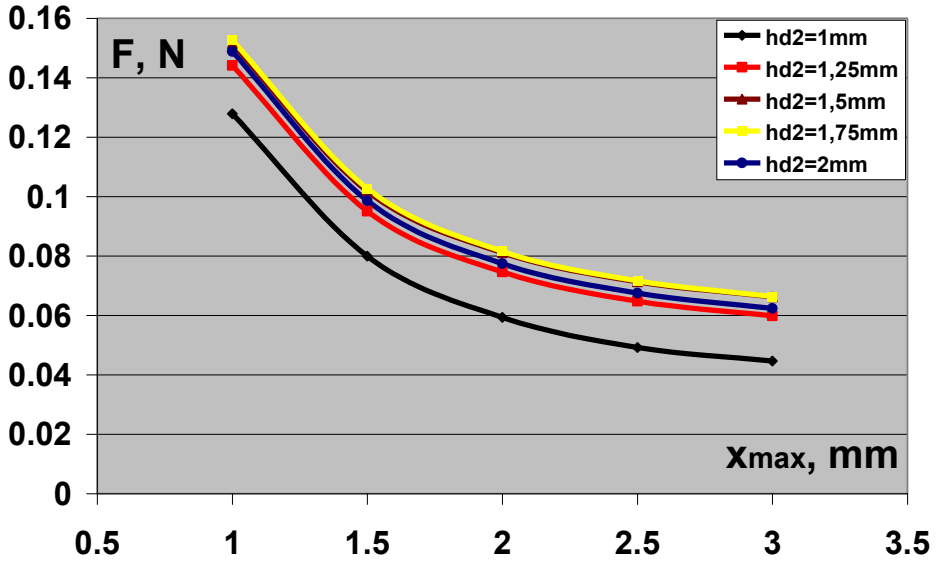
Определянето на електромагнитната сила е осъществено чрез метода с крайни елементи. С помощта на компютърната програма Femm [12], с използване на подход с тензор на напреженията на Максуел за изчисляване на силата и разработен за целта алгоритъм са определени характеристиките $F = \varphi(x_{max})$, където x_{max} е максималният ход на котвата, а F – силата на тръгване от крайно долно положение на котвата (за да се задвижи котвата нагоре е необходимо силата на тръгване да е с положителен знак). Изследванията са направени за: четири външни диаметъра *(D=4, 5, 6, 7 mm*); пет височини на управляващите намотки (*hw =5; 7,5; 10; 12,5; 15 mm*); пет височини на долната феромагнитна шайба $(hd2 = 1;1,25;1,5;1,75;2mm)$; една и съща плътност на тока тока $(J = 20A/mm^2)$; една и съща височина на горната феромагнитна шайба $(hd1 = 1mm)$ и на постоянния магнит $(hm = 1mm)$ при захранени намотки за движение на котвата нагоре.

Получени са значителен по обем резултати, част от които са показани по-долу. Получените характеристики $F = \varphi(x_{max})$ при височина на управляващите намотки *hw =12,5 mm,* за външни диаметри *4* и *5 mm* са показани съответно на фиг.2 и фиг.3.



Фиг.2. Зависимост на силата на тръгване от крайно долно положение от максималния ход на котвата при външен диаметър 4 mm.

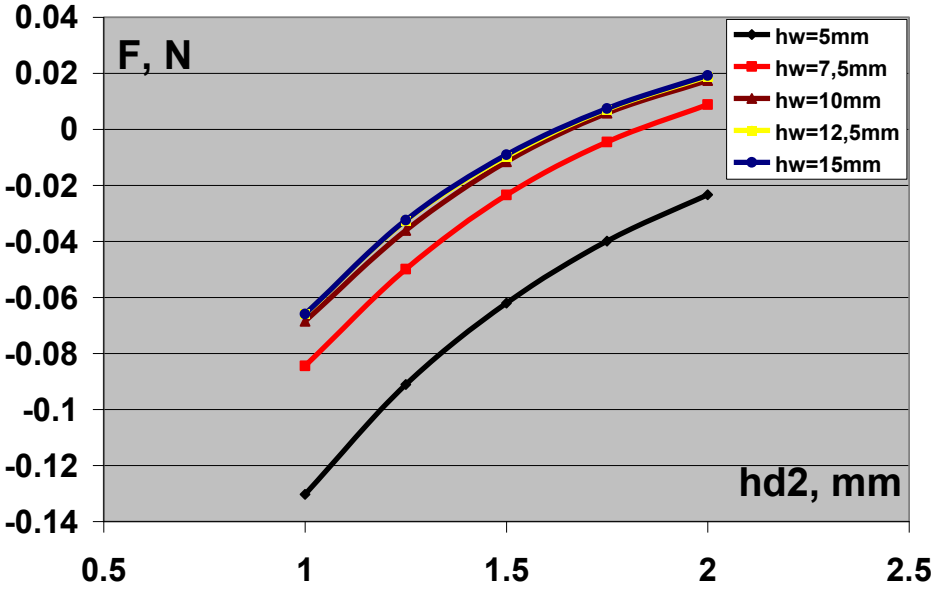
Получените резултати показват, че с увеличаване на максималния ход на котвата над 1mm силата на тръгване намалява значително, което прави практически неподходящо използването на по-голям ход за разглежданата конструкция, като същевременно увеличаването на височината на долната феромагнитна шайба има положителен ефект до около 1,5 mm.



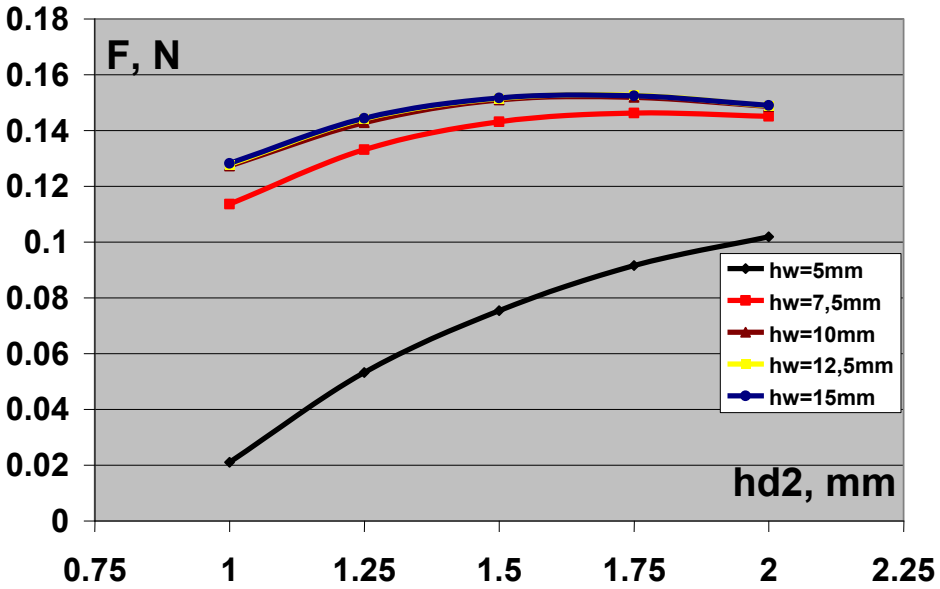
Фиг.3. Зависимост на силата на тръгване от крайно долно положение от максималния ход на котвата при външен диаметър 5 mm.

Ето защо по-нататъшните изследвания са направени за максимален ход на котвата 1mm.

Зависимостите на силата на тръгване от крайно долно положение на котвата от височината на долната феромагнитна шайба hd2 за максимален ход на котвата $x_{\max} = 1mm$ при различни височини на управляващите намотки hw за външни диаметри *4* и *5 mm* са показани съответно на фиг.4 и фиг.5.



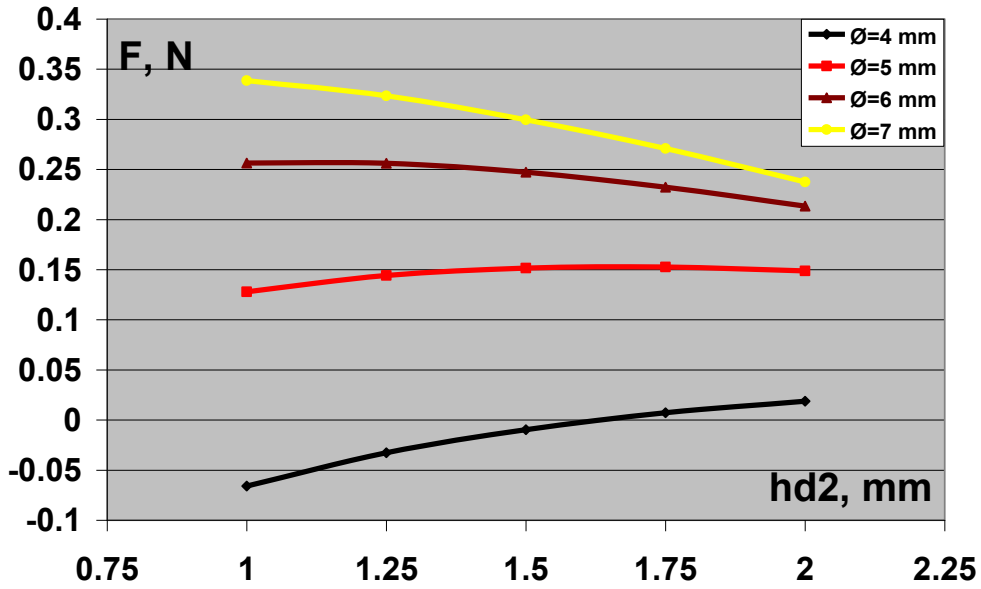
Фиг.4. Зависимост на силата на тръгване от крайно долно положение от височината на долната феромагнитна шайба hd2 за максимален ход на котвата $x_{\max} = 1mm$ и външен диаметър *4 mm*.



Фиг.5. Зависимост на силата на тръгване от крайно долно положение от височината на долната феромагнитна шайба hd2 за максимален ход на котвата $x_{\max} = 1mm$ и външен диаметър *5 mm*.

Получените резултати показват, че увеличаването на височината на долната феромагнитна шайба има положителен ефект до около 1,5 mm. Същевременно, с нарастване на височината на управляващите намотки hw, силата на тръгване нараства значително до около hw=12,5 mm.

Зависимостите на силата на тръгване от крайно долно положение на котвата от височината на долната феромагнитна шайба hd2 за максимален ход на котвата $x_{\max} = 1mm$ при височина на управляващите намотки hw=12,5 mm за различни външни диаметри са показани на фиг.6.



Фиг.6. Зависимост на силата на тръгване от височината на долната феромагнитна шайба hd2 за максимален ход на котвата $x_{\max} = 1mm$, и височина на управляващите намотки hw=12,5 mm за различни външни диаметри.

Получените резултати показват от една страна влиянието на височината на долната феромагнитна шайба върху силата на тръгване и от друга – доказват работоспособността на конструкцията с външен диаметър 5 mm.

4. Заключение

Получените резултати доказват възможностите за повишаване на силата на тръгване от крайно долно положение при въвеждане на несиметрия в конструкцията на задвижващия електромагнит чрез подходящ подбор на височините на феромагнитните шайби и доказват работоспособността на конструкцията.

Направените изследвания показват и допълнителните възможности за оптимизиране на качествата на изследвания електромагнит чрез подходящ подбор на максималния ход на котвата и на височината на управляващите намотки.

Литература

[1] Nobels T., F. Allemeersch, K. Hameyer, ***Design of a High Power Density Electromagnetic Actuator for a Portable Braille Display***, International Conference EPE-PEMC 2002, Dubrovnik & Cavtat, 2002

[2] Nakashige M., K. Hirota, M. Hirose, ***Linear actuator for high-resolution tactile display***, 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication ROMAN 2004, pp. 587-590

[3] Green S., B. Gregory, N. Gupta, ***Dynamic Braille Display Utilizing Phase-Change Microactuators***, 5th IEEE Conference on Sensors, 2006, pp. 307-310

[4] Cho H.-C., B.-S. Kim, J.-J. Park, J.-B. Song, ***Development of a Braille Display using Piezoelectric Linear Motors***, International Joint Conference SICE-ICASE, 2006, pp. 1917-1921

[5 Chaves D., I. Peixoto, A.C.O. Lima, M. Vieira, C.J. de Araujo, ***Microtuators of SMA for Braille display system***, IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications. MeMeA 2009, pp. 64-68

[6] Kwon H.-J., S. W. Lee, S.S. Lee, ***Braille code display device with a PDMS membrane and thermopneumatic actuator***, 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems MEMS 2008, pp. 527-530

[7] Kawaguchi Y., K. Ioi, Y. Ohtsubo, ***Design of new Braille display using inverse principle of tuned mass damper***, Proceedings of SICE Annual Conference 2010, pp. 379-383

[8] Yatchev I. et al., ***Finite element modelling of electromagnets for Braille screen***, Proceedings of PES 2011 Conference, Nis, Serbia, 2011

[9] Yatchev I. et al., ***Static force characteristics of electromagnetic actuators for Braille screen***, Facta Universitatis, Ser.: Elec. Energ. vol. 24, no. 2, August 2011, 157-167

[10] Yatchev I. et al., ***Force characteristics of an electromagnetic actuator for Braille screen***, Proceedings of XIII International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2011, 21-22 October 2011, Varna, pp. 338-341

[11] Хинов, К. и кол., ***Изследване влиянието на някои геометрични фактори върху характеристиките на поляризиран изпълнителен електромагнит за Брайлов екран***, IV научна конференция ЕФ 2012, България, Созопол, 28.09 - 01.10 2012, т. 2, стр. 405-11

[12] Meeker D.: ***Finite element method magnetics version 3.4***, User's Manual, 2005

Автори: инж. Кръстьо Хинов, доц. д-р, катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *k_hinov@tu-sofia.bg*; инж. Йоско Балабозов, докторант, катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *i.balabozov@gmail.com*; инж. Иван Ячев, проф. дтн, катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *yatchev@tu-sofia.bg;* инж. Димитър Карастоянов, проф. д-р, Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките, E-mail address: *dkarast@iinf.bas.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** проф. дтн И. Маринова

МЯСТО НА ИМПУЛСНИТЕ ВИХРОВОТОКОВИ МЕТОДИ В СЪВРЕМЕННИЯ БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ

Калинка Тодорова, Стефчо Гунински

Резюме: *В работата е направен преглед и анализ на приложението на импулсните вихровотокови методи в безразрушителния контрол. Показани са предимствата им и са анализирани възможностите за по-широкото им прилагане в съвременния безразрушителен контрол на различни материали. Описани са параметрите, които е подходящо да бъдат контролирани.*

Ключови думи: *МКЕ, ударно възбуждане, импулсен вихровотоков преобразувател*

PLACE OF PULSED EDDY CURRENT METHODS IN THE MODERN NDT

Kalinka Todorova, Stefcho Guninski

Abstract: *This work provides an overview and analysis of the application of pulsed eddy current non-destructive testing methods. Below are given their advantages and analyzed opportunities for their wider application in modern nondestructive testing of different materials. The parameters that is appropriate to be controlled are described.*

Key words: *FEM, shock excitation, pulse eddy current transducer*

1. Въведение

Безразрушителният контрол е сред методите за изпитване, поддръжка и контрол, при които изпитваните компоненти остават невредими след извършената проверка. Тези методи намират приложение в космическите изследвания, транспорта, химическата и ядрената индустрии. Един от предпочитаните безразрушителни методи е вихровотоковият.

Вихровотоковият безразрушителен контрол играе важна роля, особено там, където повреда на определен компонент може да доведе до потенциално опасна ситуация. Следователно периодично трябва да се извършват проверки за дефекти като пукнатини и корозия. Вихровотоковите безразрушителни методи се използват и в случаите, когато често трябва да се контролират определени параметри на дадени материали. Всичко това вади до повишаване на надеждността и намаляване на разходите за поддръжка.

Недостатък при използването на конвенционалните вихровотокови методи е ограничения брой параметри, които могат да бъдат контролирани. Този недоста-

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

тък може да се избегне при импулсните вихровотокови методи, при които изходният сигнал е многомерен. Тези методи позволяват контрол и измерване на повече параметри, а също и намаляване на смущаващите въздействия. Това е причина използването на импулсните вихровотокови методи с цел характеризиране и контрол на материалите да бъде актуална тема и област, в която научните разработки да продължават да се развиват.

2. Преглед на приложението на импулсните вихровотокови методи в безразрушителния контрол

Импулсният вихровотоков контрол е нова вихровотокова технология. Изходният сигнал е богат на информация. В момента този метод получава широко приложение при контрол на възли в самолети, на съдове под налягане, на тръбопроводи в ядрената и в нефтопреработвателната промишленост.

От разгледаните работи се вижда, че импулсните вихровотокови методи се прилагат за откриване на дефекти и корозия [1, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 13], измерване на дебелини [2], измерване на проводимост [7,14, 15]. В [5, 7, 9, 11] са описани начините за характеризиране на различни материали и техни основни параметри.

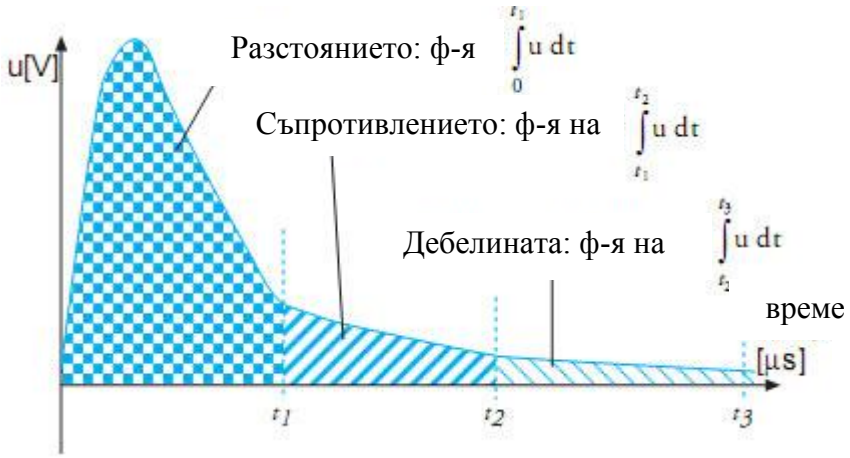
В [1] е представено приложението на импулсния вихровотоков метод за характеризиране на механични и металургични параметри на материалите. Отчетено е влиянието на размера на дефекта върху първата амплитуда на изходния сигнал. Показано е прилагане на този метод за откриване на дефекти във втори и трети слой на контролирания обект. Работата потвърждава значението на импулсния вихровотоков контрол (ВТК) при оценката на многослойни структури, по-специално при откриване на корозия.

Влиянието на размера на дефекта върху големината на първата амплитуда е отчетено и при импулсният вихровотоков датчик за идентифициране на дефекти, разположени в тънки образци от Inconel [3] (широко използвани в химическа, ядрена и космическа индустрия).

В [4] импулсният вихровотоков контрол се прилага за измерване на повърхностни дефекти, контрол на пукнатини с различна ширина, различна дълбочина, с променливи дълбочина и широчина и с фиксиран обем. Като информационни параметри са използвани амплитудата на изходния сигнал, пресичането на нулата на изходния сигнал, времето за достигане на първия максимум.

В [6] вихровотоковият безразрушителен контрол се прилага за откриване на скрита корозия в многослойни конструкции на въздухоплавателни средства. Направено е сравнение между конвенционален и импулсен ВТК. Данните показват, че при дебелини, по-големи от 4 mm импулсният метод дава по-добри резултати.

Импулсният вихровотоков контрол е ефективен и за откриване и характеризиране на дефекти с различна дълбочина [8], [10], [12], [13]. Експерименталните резултати в [8] потвърждават възможностите на импулсния ВТК за оценка на дефекти в алуминиеви плочи. Направеното сравнение между конвенционалните и импулсните вихровотокови методи показва предимствата на импулсните: богата информация за дефекти, висока устойчивост на смущения, по-добра оценка при по-дълбоки пукнатини.

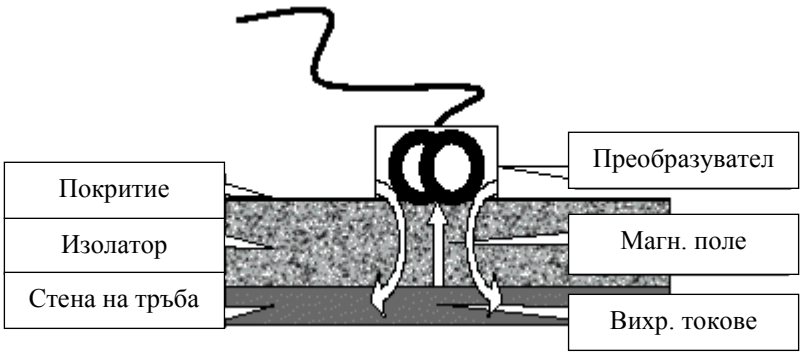


Фиг.1.

На фиг.1 е показан изходния сигнал във функция от времето и влиянието на разстоянието между преобразувателя и обекта, съпротивлението и дебелината на изследвания обект върху този сигнал.

В [12] е показано влиянието на конфигурацията на преобразувателя за откриване на дефекти с различна дълбочина. Реализирани са симулации с различни диаметри на бобината. Доказано е, че преобразувател с по-малък диаметър на бобината по-лошо характеризира по-дълбоки дефекти. [13] описва откриване и характеризиране на дефекти с различна дълбочина, като за информационен параметър се използва първия пик на изходния сигнал. Резултатите са оптимизирани по отношение на разстоянието на преобразувателя до изследвания обект.

Успешно импулсният вихровотоков метод се прилага и за измерване на дебелини на стени на тръби [2], когато прекият достъп до контролирания обект е възпрепятстван (фиг.2). Следователно, когато контролираният обект има покритие или изолация, не е необходимо те да бъдат премахвани.

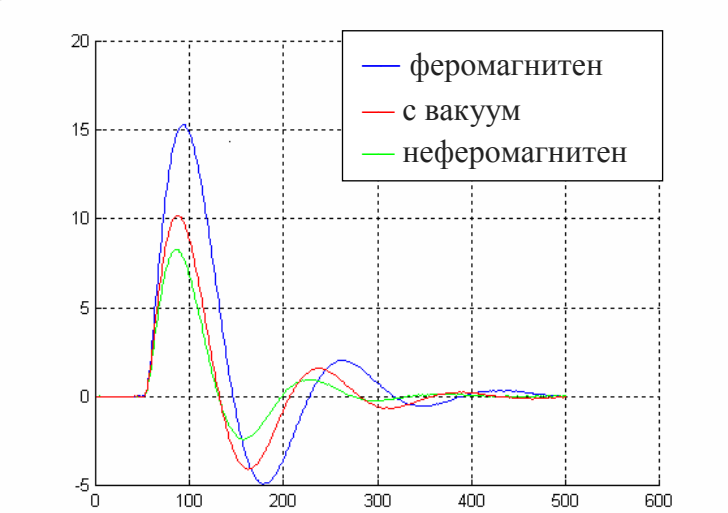


Фиг.2

В [5] импулсният вихровотоков метод се прилага за контрол и тестване на вътрешната и външната страна на феромагнитни тръби с различна дебелина на покритието, като не се налага то да се снема.

Импулсна вихровотокова система за оценка на дебелината и проводимостта на метални пластини е показана в [7]. Моделирано е захранващото напрежение на импулсния вихровотоков преобразувател. Показано е, че за възбуждане на вихровите токове е по-подходящо да се използва източник на напрежение вместо на ток. Електромагнитните задачи се решават чрез Метода с крайните елементи.

Чрез импулсният вихровотоков метод може да се прави оценка на металургични характеристики на материалите [9]. В работата е показана възможност и за оценка на микроструктурни промени или наличие на дефекти, като за информационен параметър се използва амплитудата на изходния сигнал. На фиг.3 е показана реакцията на различни материали.



Фиг. 3 Реакция на различни материали

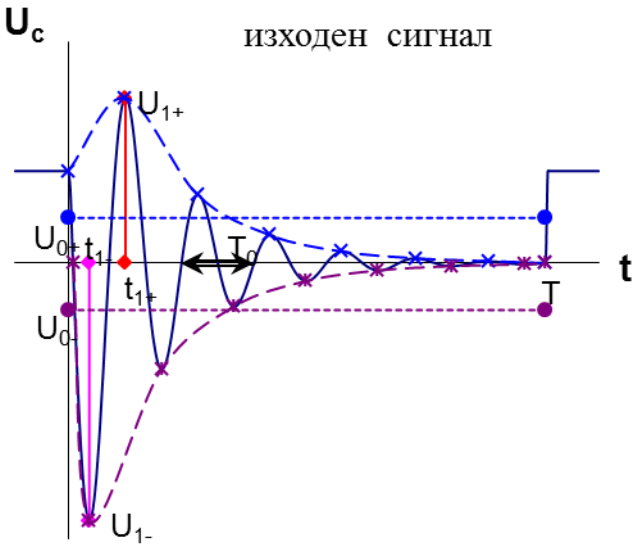
В [11] е направено сравнение между конвенционален и импулсен вихровотоков контрол при проверка на дефекти, измерване на проводимост и оценка на дебелината на изследвания материал. Възможностите на импулсния метод са по-големи, тъй като той позволява по едно и също време да се установят и повърхностни и по-дълбоки дефекти. И [9] и [11] потвърждават възможностите на импулсния ВТК за оценка на многослойни структури, т.е. откриване на дефекти и корозия във втория и третия слой на контролираните обекти. Като информационни параметри се използват амплитудите на първия пик, на втория пик, времената за достигането им.

В [7], [14] и [15] е показано, че проводимостта на изследвания обект е параметър, който също може да бъде контролиран чрез импулсния вихровотоков метод. В [14] е изследвано влиянието на електрическата проводимост γ на изследвания обект върху основните параметри на импулсния изходен сигнал: първата положителна амплитуда; времето, за което се достига първата положителна амплитуда; първата отрицателна амплитуда; времето, за което се достига първата отрицателна амплитуда.

От общата теория на електромагнитния контрол е известно, че много ефикасно средство за повишаване на чувствителността и постигане на оптимални условия за измерване е използването на преобразуватели с феромагнитно ядро. Поради това в [15] е разгледан ВТП със сходна конструкция на този в [14], но съдържащ цилиндрично феромагнитно ядро. Показано е, че импулсния вихровотов метод има редица предимства при измерването/контрола на електрическа проводимост, но трябва да се проведат допълнителни изследвания за повишаване на чувствителността на ВТП.

3. Анализ на предимствата на импулсните вихровотокови методи

От направения преглед става ясно, че импулсните вихровотокови методи имат своето значимо място в развитието на безразрушителния контрол.



Фиг.4

Импулсният ВТК се използва за откриване и характеризиране на дефекти, пуknатини, корозия, измерване на проводимост, оценка на дебелини на покрития, оценка на химически и микроструктурни параметри в многослойни структури. Изходният сигнал съдържа богата информация. Освен това този метод е високо устойчив на смущения. Като информационни параметри (фиг.4) се използват амплитудата на първия пик, на втория пик, времената за достигането им, средните стойности на обвивките на положителните и отрицателни затихващи колебания, честотата и началната фаза на затихващите колебания.

4. Заключение

Импулсните методи все по-често се прилагат във вихровотоковия безразрушителен контрол. Импулсните сигнали дават широки възможности за получаване на необходимата информация за контролираните параметри. При тях има съответствие между многопараметровостта на входния сигнал и многомерността на изходния сигнал. Това предимство е много силно изразено при включването на импулсен вихровотоков преобразувател (ВТП) в измервателна схема с ударно възбуждане. Информационните параметри на изходния сигнал са много на брой и могат лесно да бъдат обработвани електронно.

Литература

[1]. Zergoug M., N. Boucherrou, A. Hammouda, G.Kamel, Characterization of Multilayer Corrosion by Pulsed Eddy Current, 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition - 27-30 Nov 2005 Bahrain, Manama

[2]. Scottini R., H.J. Quakkelsteijn, Monitoring Average Wall Thickness of Insulated or Difficult to Access Objects with Pulsed Eddy Currrent, – RTD Group, The Netherlands

[3]. 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

[4]. 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

[5]. Huang Chen, Xinjun WU, Shuqing Lin, Gongtian Shen, Development and Application of Pulsed Eddy Current Testing System for Ferromagnetic Pipes, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China

[6]. 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

[7]. Menana Hocine, Mouloud Fe´liachi, Contribution to the Modeling of a Voltage Driven Pulsed Eddy Current Sensor for The Characterization of Conductive Plates, Analog Integr Circ Sig Process (2011) 69: 75–80

[8]. 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

[9]. Zergoug M., N. Boucherrou, Material Characterization by Pulsed Eddy Current,

[10]. 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

[11]. Smetana Milan, Tatiana Strapacova, Ladislav Janousek, Klara Capova, Pulsed Eddy Currents: A new Trend in Non-Destructive Evaluation of Conductive Materials, 17th Symposium IMEKO TC 4, 3rd Symposium IMEKO TC 19 and 15th IWADC Workshop Instrumentation for the ICT Era Sept. 8-10, 2010, Kosice, Slovakia, 238-243

[12]. 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

[13]. 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

[14]. Todorova K. M., Stefcho Guninski, Study in Modern Software Impact of Electrical Conductivity the Signal Output with Pulse Eddy Current NDT, 9th Summer School "Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering, Sozopol ' 2012", Sozopol, September, 07-09, 2012, pp. 91-94.

[15]. Тодорова К., С. Гунински, Ж. Даскалов, П. Костадинов, Моделиране на импулсен вихровотоков преобразувател чрез метода на крайните елементи, IV Научна конференция на Електротехнически Факултет '2012, Созопол, 28 септември – 1 Октомври, 2012 г., Сборник доклади, том 2, с. 180 - 187.

Автори: маг. инж. Калинка Тодорова, гл. ас., катедра "Обща електротехника" ,Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ktodorova@tu-sofia.bg*; инж. Стефчо Гунински, доц. д-р, катедра "Обща електротехника", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address:*sgg@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Живко Даскалов

ИЗПИТВАНЕ НА ТВЪРДА ОШИНОВКА ЗА РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ УРЕДБИ ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ

Калоян Бурванов

Резюме: *В последните години, в електроенергийната система на България започна изграждане на подстанции високо напрежение с елементи с твърда ошиновка. Внедряването на твърда ошиновка в разпределителните уредби високо напрежение поставя качествено нови въпроси и проблеми за решаване пред родната енергетика. Част от тях са свързани с липсата на нормативна база и експлоатационен опит в тази насока. Основна цел на настоящия доклад е да се посочат основните методи и начини за провеждане на изпитания на елементите с твърда ошиновка в разпределителните уредби високо напрежение.*
Ключови думи: *твърда ошиновка; тръбна ошиновка; изпитване; измерване; проверка*

TESTING OF RIGID BUSBARS FOR HIGH VOLTAGE SWITCHYARDS

Kaloyan Burvanov

Abstract: *In the last years, in the Bulgarian electric power system the high voltage substations erection with rigid busbars was started. Implementation of rigid busbars in high voltage switchyards sets qualitative new questions and problems faced by native electrical power sector. A part of them are related with lack of legal basis and operational experience in the filed. The main target of this report is to highlight the main methods and procedures for testing of the elements with the rigid busbars in high voltage switchyards.*
Keywords: *rigid busbar; tubular busbar; testing; measuring; checking*

1. Въведение

С възраждането на концепциите за изграждане на разпределителни уредби високо напрежение (РУ ВН) с твърди шини, от началото на 2005 г. насам, проектантските и монтажни организации в България започнаха внедряване на разработки с твърда ошиновка. Базирайки се на редица чуждестранни нормативни документи, стандарти и методики за оразмеряване, основно се изградиха повишаващи подстанции за нуждите на производители на енергия от възобновяеми енергийни източници по схеми с един до два силови трансформатора Ср.Н./ВН и един до два въздушни извода ВН, а в последните години започна и изграждането на няколко понижаващи подстанции съоръжени с 4÷6 изводни присъединения. С твърда ошиновка се изпълниха и две РУ 400kV, а третата е в процес на

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

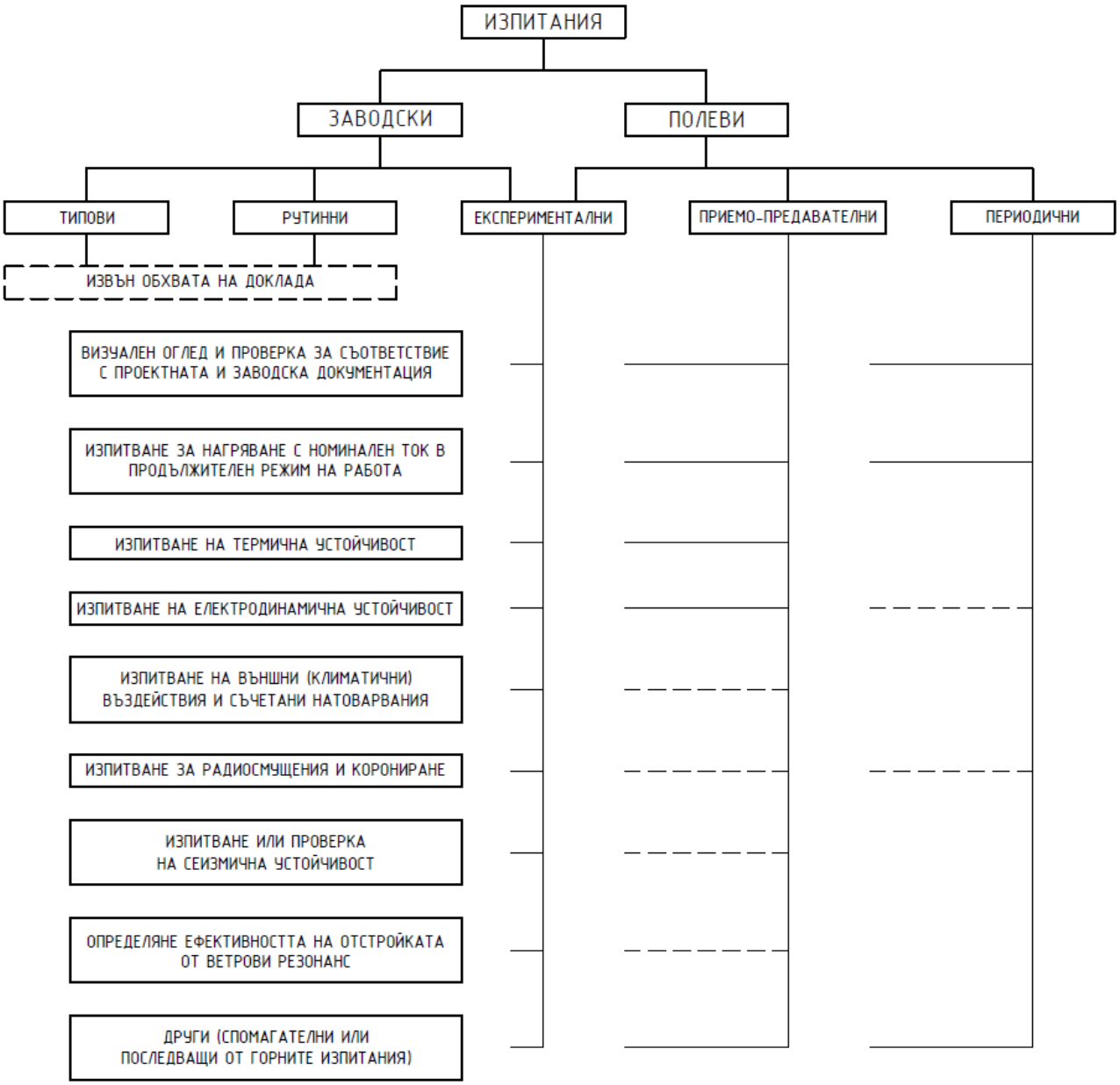
реконструкция. Разпределителни уредби 220kV, изградени с твърда ошиновка към момента няма. За съжаление липсата на вътрешнодържавни норми и правила за проектиране, внедряване, техническа експлоатация и поддръжка на разпределителни уредби с твърда ошиновка, както и единни изисквания в тази област доведе до голямо разнообразие в проектните решения, а запазването на концепцията за унификация на компановъчните решения, влаганите материали, и елементи стана невъзможно. Самият факт за прилагане на широка гама технически решения води от само себе си до затруднен контрол в качеството на доставяните материали и извършваните електромонтажни работи, и съответно до понижаване надеждността на изгражданите елементи и съоръжения.
Начин за повишаване на надеждността и техническата безопасност на РУ с твърда ошиновка е прилагането на висококачествен контрол, както през времето на изготвяне на техническо задание, проектиране, доставка на елементи и изпълнение на монтажни работи, така и при изпитването, приемането, последващите периодични изпитвания и техническо обслужване на РУ ВН.

2. Изпитания на елементи с твърда ошиновка

За обезпечаване на експлоатационна надеждност на твърдата ошиновка в РУ ВН е препоръчително да се провеждат изпитания. Примерна структурна схема на основните видове и типове изпитвания е показан на фиг.1.
Обемът и видът изпитвания, следва да се определя съобразно очакваното качество на доставяните изделия и изискванията на възложителя по отношения на надеждностните показатели на твърдата ошиновка.
Следва да се отбележи, че в световната практика са се наложили два основни метода за доставка и изграждане на елементи с твърда ошиновка, а именно:

- комплектна;
- поелементна.

При първия тип цялата ошиновка (комплект), включително подпорни изолатори, тръби, шинодържатели, компенсатори, необходими детайли и крепежни елементи и др. се доставят до обекта в разглобено състояние (транспортен вид) от един производител. Ошиновката е оразмерена и типово и/или индивидуално изпитана. Доставя се като готово заводско изделие, напълно окомплектована и готова за окончателен монтаж, придружена с пълен набор сертификати и доклади от проведените изпитания. Подобни решения са се наложили основно в границите на Руската Федерация и при някои модулни решения за РУ ВН на западни фирми. Възможните компановъчни решения са типизирани, а изборът се ограничава в обхвата на каталожната номенклатура на производителя.
При втория тип, наложил се и в нашата страна, елементите на ошиновката (изолатори, тръби, шинодържатели, компенсатори и др.) са определени с проекта, за конкретния обект, и оразмерени на база изчисления. До обекта, отделните елементи се доставят от складовете на различни производители. На строителната площадка се извършва сглобяване на отделните елементи и монтаж. Всички доставяни елементи са типово или индивидуално изпитани. Подобни решения са се наложили и се прилагат приоритетно в Западна Европа, САЩ, Канада, Япония и др.



Фиг.1. *Примерна структурна схема на основните видове и типове изпитания на твърда ошиновка в разпределителни уредби високо напрежение*

Дотолкова, доколкото настоящият доклад е насочен към практиките прилагани в нашата страна, по-долу, под термина „изпитвания“ ще се разбира провеждането на изпитвания на твърда ошиновка в сглобено състояние. Изпитвания на отделни елементи за твърда ошиновка (изолатори, тръби, шинодържатели, компенсатори и др.) в настоящия доклад няма да бъдат разглеждани. В нашата страна отклоненията от шини се изпълняват основно с гъвкави проводници, поради което под отклонения от шини, по-долу, ще се разбира такива с гъвкави проводници.

2.1. Визуален оглед и проверка за съответствие с проектната и заводска документация

Най-общо обхваща проверка за наличие и съответствие на заводската и проектна документация с доставените елементи и материали. Проверява се качест-

вото на изпълнените строително-монтажни и електромонтажни работи. В процеса на експлоатация се провеждат периодични огледи, термовизионен контрол на болтовите тоководещи връзки, огледи за механични увреждания, замяна на компрометирани елементи и др.

2.2. Изпитване за нагряване с номинален ток в продължителен режим

Изпитванията се провеждат по двуфазна или еднофазна схема.
При определяне на междуфазното разстояние или това между фазата и обратния проводник трябва да се избягва взаимното им термично влияние.
Допустимо е изпитването за нагряване с номинален ток да се изпълнява като предшестващо това за термична устойчивост, с което да се осигури необходимото начално нагряване за провеждането на второто изпитване.
Изпитването за нагряване с номинален ток в продължителен режим се счита за успешно ако температурата, до която се загрява шинната конструкция и нейните съставни елементи остава по-ниска от допустимата, а предизвиканите линейни температурни удължения на тръбите не предизвикват деформиране и/или остатъчни напрежения в елементите на шинната конструкция.

2.3. Изпитване за термична устойчивост (ТУ)

Съгласно [4] шинната конструкция се счита за термично устойчива ако крайната температура, до която се загрява остава по-ниска от допустимата, а получилите се линейни температурни удължения на тръбите не предизвикват деформиране или остатъчни напрежения в елементите на шинната конструкция.
Изпитванията на термична устойчивост за сборни шини следва да се провеждат върху шинна конструкция заемаща не по-малко от две междуопорни разстояния (полета), а тази за връзки между съоръженията се провежда при едно междуопорно разстояние.
Изпитванията се провеждат при двуфазно или трифазно късо съединение. При определяне на междуфазното разстояние или това между фазата и обратния проводник следва да се избягва взаимното им термично влияние.
Допустимо е провеждане на изпитанията за термична и електродинамична устойчивост едновременно.
Допустимо е изпитване с по-малки стойности на тока на късо съединение, при което времето за протичане на тока на късо съединение $\mathbf{t_{изп}}$ се определя по формулата:

$$\mathbf{t_{изп} = t_т I^2_т / I^2_{т\ изп}\ \{sec\}} \qquad (2.1)$$

Където $\mathbf{t_т}$ е времето за термична устойчивост, sec, а $\mathbf{I_т}$ и $\mathbf{I_{т\ изп}}$ са съответно разчетния ток на късо съединение и този използван при изпитването, kA.
Продължителността на изпитване с ток различен от разчетния не бива да надвишава значително действително очакваната стойност.
Изпитанията се провеждат в диапазона 70÷105% от разчетния ток на късо съединение, с препоръчителна стъпка на нарастване на изпитвателния ток от 5÷10%. След всяко изпитване се изчаква охлаждане на конструкцията до определената работна температура, след което се пристъпва към повторен опит.

2.4. Изпитване за електродинамична устойчивост (ЕДУ)

Съгласно [4] шинната конструкция се счита за електродинамично устойчива ако е способна да издържи механичните усилия възникващи при протичането на тока на късо съединение, без да настъпят механични увреждания или остатъчни деформации. Допустимото натоварване на единични изолатори не бива да надвишава 60% от гарантираната разрушаваща стойност, а допустимото напрежение в шината - 70% от гарантираното съпротивление на скъсване на материала. При отделяне на центъра на масата на шината на разстояние от подпорния изолатор, то следва разчетната сила да бъде приведена към фланеца на изолатора със съответния корекционен коефициент. За шини с наличие на заваръчни съединения е необходимо да се отчете намаляването на гарантираното съпротивление на скъсване на материала в мястото на заварката. Като правило за тръби от Al-Mg-Si гарантираното съпротивление на скъсване в мястото на заварката не надхвърля 50÷60% от това на материала в незаварен участък от шината, като съгласно [5] е равно на 50%. Препоръчително е гарантираното съпротивление на скъсване в мястото на заварката да се определи експериментално за всяка партида тръби по отделно.

Същевременно, най-малките изолационни разстояния между тоководещи елементи $\mathbf{a_{ф-ф}}$, както и от проводниците до заземени части $\mathbf{a_{ф-з}}$, при колебания на ошиновката след изключване на късото съединение трябва да са по-големи от минималните допустими $\mathbf{A_{ф-ф}}$ и $\mathbf{A_{ф-з}}$, регламентирани в [4].

При полеви изпитания е допустимо да не се измерват напрежения в материала и резултантна сила при подпорния изолатор, а е достатъчно извършването визуален оглед и анализ на резултатите.

Изпитанията на електродинамична устойчивост на сборни шини следва да се провеждат върху шинна конструкция заемаща не по-малко от две междуопорни разстояния (полета), а тази за връзки между съоръженията се провежда при едно междуопорно разстояние.

За опростяване и улесняване на изпитванията е възможно изпитване при намалени междуфазни разстояния с цел увеличаване на електродинамичните усилия при по-малки стойности на тока на късо съединение. В този случай действителният издържан ток на електродинамична устойчивост $\mathbf{i_{дин}}$ се определя по формулата:

$$\mathbf{i_{дин} = i_{дин\ изп}.\sqrt{(a/a_{изп})}\ \{kA\}} \qquad (2.2)$$

Където $\mathbf{i_{дин\ изп}}$ е токът на късо съединение използван при изпитването, kA, $\mathbf{a}$ и $\mathbf{a_{изп}}$ са проектното и използваното при изпитването междуфазни разстояния, m.

Съгласно [4] изпитанията следва да се провеждат при трифазно късо съединение. При разположение на шинната конструкция в една равнина, какъвто е и най-често срещаният случай на РУ ВН в нашата страна, е възможно изпитване с ток на двуфазно късо съединение, протичащ през две съседни фази на шинната конструкция.

С достатъчна за практиката точност, токът на трифазно късо съединение в този случай може да се определи по формулата:

$$\mathbf{i^{(3)}_{дин} = 1{,}075.i^{(2)}_{дин\ изп}\ \{kA\}} \qquad (2.3)$$

Където $\mathbf{i^{(2)}_{дин\ изп}}$ е токът на двуфазно късо съединение използван при изпитването, kA, а $\mathbf{i^{(3)}_{дин}}$ е съответният издържан ток на трифазно късо съединение, kA.
Уравнението изведено в **(2.3)** е валидно и се отнася за случая на отдалечено късо съединение, и източник на енергия с неограничена мощност [3]. Пренебрегнати са малките разликите в динамичните коефициенти при двуфазно и трифазно късо [6], а собствената честота на трептене на шинната конструкция е по-ниска от 25Hz.
Продължителността на късото съединение не трябва да е по-малка от половин период на собствено колебание на първата (основна) честота на шинната конструкция.
Собствената честота в Hz може да се определи по формулата [6]:

$$f_1 = \frac{\gamma}{L^2}\sqrt{\frac{E.J}{m}} \qquad (2.4)$$

Където **γ** е параметър на честотата на собствени колебания; **E** е модул на еластичност, Pa; **J** е инерционен момент на напречното сечение на шината, m^4; **m** е маса на шината за единица дължина, kg/m; а **L** е дължина на шината, m.
Изпитанията следва да се провеждат в диапазона 70÷105% от разчетния ток на късо съединение, с препоръчителна стъпка на нарастване на изпитвателния ток от 5÷10%. Времето за затихване на апериодичната съставяща на тока на късо съединение следва да съответства на неговото разчетно значение или да е близка до него.

2.5. Изпитване на външни (климатични) въздействия и съчетани натоварвания

Твърдата ошиновка може да бъде изпитана на климатични въздействия в климатична камера при лабораторни условия. Изпитанията най-общо обхващат:

- изпитване с изменение на окръжаващата температура, вкл. и най-ниска и най-висока експлоатационна стойност
- изпитване с изменение влажността на въздуха
- изпитване на дъжд
- изпитване на слънчева радиация
- и др.

Определянето на влиянията от съчетани натоварвания (собствено тегло, лед, вятър, ЕДС и др.) като правило се изпълняват по разчетно аналитичен път, чрез ограничаване на изчислителните напрежения и премествания/провисвания под допустимите. Експериментално определяне на влиянието на съчетани натоварвания се изпълнява в някои особенни случаи, а именно:

- шините имат предварителна деформация, водеща до намаляване на провеса
- закрепването към опорите се различава от идеализираните случаи на твърдо или шарнирно закрепване
- шините имат сложно конструктивно изпълнение

При експериментално определяне на поведението на твърдата ошиновка при отделните натоварвания, шинната конструкция се изгражда в пълен обем. Допуска се имитация на спусковите отклонения посредством окачване на концентрирани маси в точките на отклоненията. Натоварванията от лед се моделира чрез разпределено окачване на концентрирани товари по цялата дължина на шината, през всеки 0,5÷1,0m. Масата на товарите се измерва с динамометър или с електронна везна. Провисването на тръбата се измерва в няколко точки, а максималната стойност се сравнява с допустимата.

2.6. Изпитване за радиосмущения и липса на видимо корониране

Корониране на тръбите не възниква ако е изпълнено неравенството:

$$\mathbf{E_{max} \leq 0{,}9.E_0.\{kV/sm\}} \qquad (2.5)$$

Където $\mathbf{E_{max}}$ - максималната напрегнатост на електрическото поле на повърхността на шината при усреднени експлоатационни условия, kV/sm; $\mathbf{E_0}$ - начална напрегнатост на електрическото поле, при която възниква корониране, kV/sm.

За тръбните шини, условие **(2.5)** е изпълнено в случай, че външния диаметър на шината **D** е по-голям или равен на минимално допустимия по условие за корониране $\mathbf{D_{доп}}$. Следва да се отбележи, че диаметъра на шините избран по условия за механична и електрическа устойчивост като правило значително превишава указания по-горе минимален такъв, поради което условието практически е винаги изпълнено [1].

Приложеното изпитвателно напрежение за измерване на нивата на внесени радиосмущения се определя по формулата:

$$\mathbf{1{,}1.U_m/\sqrt{3}\ \{kV\}} \qquad (2.6)$$

Където $\mathbf{U_m}$ е най-голямото работно напрежение за уредбата, kV.

Други елементи на шинната конструкция, за които трябва да се обръща специално внимание с оглед намаляване на короniрането и радиосмущенията е клемната арматура (шинодържатели, капачки, шинни компенсатори, отклонителни клеми и др.). Същите следва да са проектирани за избраното ниво на напрежение или по-високо, като е обърнато особено внимание за избягване наличието на остри ръбове и чупки. Препоръчително е всеки тип клема да е типово изпитан и снабден със съответния сертификат за това.

Изпитването на шинната конструкция се счита за успешно при условие, че липсва или се наблюдава изключително слабо короniране, а измерените стойности на радиосмущения са под допустимите.

2.7. Изпитване или проверка на сеизмична устойчивост

Изпитване за сеизмична устойчивост се изпълнява в лабораторни условия, на специализиран стенд за изпитания на земетръс.

Изпитанията се провеждат за земетръсна активност 8 или 9 степен по скалата на Медведев-Шпонхойер-Карник (MSK), в хоризонтално и вертикално направление.

Изпитвания на сборни шини следва да се провеждат върху шинна конструкция заемаща не по-малко от две междуопорни разстояния (полета), а тази за връзки

между съоръженията се провежда при едно междуопорно разстояние и монтирани или симулирани съоръжения. Ако шината се монтира върху разединител, същият задължително се включва в изпитателната схема.
Изпитванията се считат за успешни ако няма разрушения или остатъчни деформации в шинната конструкция или нейните елементи и регистрираните усилия, и напрежения отговарят на изискванията за устойчивост на конструкцията.
Проверка на сеизмична устойчивост е възможна и по разчетно аналитичен път, чрез прилагането на метод на крайните елементи и моделиране на всички елементи на конструкцията.

2.8. Определяне ефективността на отстройката от ветрови резонанс

Ветровият резонанс на твърди шини се обуславя от периодични завихряния на въздуха вследствие обтичане на тръбата от въздушен поток. При съвпадане на честотата на завихряния с честотата на собствени колебания на шината настъпват устойчиви резонансни трептения със значителна амплитуда в напречно на потока направление.
Както показват изследванията и експлоатационния опит, шинните конструкции изпадат в състояние на ветрови резонанс при малки скорости на вятъра, в интервала 1÷3 m/sec. Напрежението в материала на шината и натоварването на изолаторите в този режим обикновено е значително по-малко от допустимото. В същото време, наличието на продължителни резонансни колебания (практически ежедневно по няколко часа) оказва отрицателно психологическо влияние на персонала в ОРУ, а също така води и до отхлабване на болтовите връзки, умора в материала на шината (понижаване на механичната устойчивост) и повреждане на елементи и конструкции в РУ [2].
На практика определянето на ефективността на отстройката от ветрови резонанс се свежда до определяне на собствената честота на трептене и логаритмичния декремент на затихване на шинната конструкция във вертикално направление.
Изпитания се провеждат върху шинна конструкция заемаща не по-малко от едно / две междуопорни разстояния (полета), в напълно окомплектовано състояние и монтирани спускови отклонения.
При изпитанията се записват осцилограми на отклонението, скоростта и ускорението на шинната конструкция в хоризонтално и вертикално направления. След числена обработка на осцилограмите от измерванията се определя ефективността на избрания метод за отстройка.

2.9. Други

В зависимост от техническите изисквания и характеристики на мястото за монтажа на твърдата ошиновка могат да бъдат дефинирани и редица други, последващи от горните или спомагателни изпитвания, като:

- Изпитване с повишено напрежение;
- Измерване на изолационно съпротивление;
- Измерване на електрическо съпротивление и проводимост;
- Изпитване на заваръчни и болтови съединения;
- Механично изпитване на шинодържатели и шинни компенсатори;

- Определяне коравината на подпорни изолатори и шини;
- др.

3. Възможности за изграждане на опитна установка за експериментално изпитване на твърда ошиновка при ЕФ на ТУ-София

Проведеното проучване на съществуващите основни и спомагателни видове изпитания за твърда ошиновка показват в голяма степен възможността за изграждане на опитна установка за изпитване на твърда ошиновка в научноизследователската база при ЕФ на ТУ-София. По предварителна оценка, с изграждането на опитна установка за изследване на твърда ошиновка могат да бъдат реализирани следните видове изпитания:

- Изпитване за нагряване с номинален ток в продължителен режим (за боядисани и небоядисани тръбни шини при различни състояния на околната среда)
- Изпитване за термична устойчивост, измерване на прегряване
- Изпитване за електродинамична устойчивост
- Измерване на линейни температурни удължения
- Измерване на електрическа проводимост
- Измерване на прегряване в контактните съединения
- Измерване на напрежения, деформации и усилия в елементите на шинната конструкция
- Измерване на натоварвания и деформации чрез симулиране на различни външни влияния

Обемът провежданите изпитания може да обхваща както цялата конструкция, така и отделни елементи от нея.

С изграждането на лабораторна установка ще се направят първи стъпки по отношение изпитването на твърда ошиновка в нашата страна и ще се повиши качеството на обучение на студентите при ЕФ на ТУ-София посредством запознаването им със съвременните тенденции и критерии за изграждане и изпитване на твърда ошиновка в РУ ВН в реални условия.

4. Заключение

Към момента, в нашата страна, липсват нормативни изисквания за изпитване на шинни конструкции с твърда ошиновка, поради което не се извършват в пълен обем необходимите приемателни, профилактични и периодични изпитвания.
Ограничаването на обема изпитвания за твърда ошиновка е предпоставка за понижаване на надеждността на шинните конструкции с твърди шини.
При изпитване на твърда ошиновка за разпределителни уредби високо напрежение съществуват редица специфични изисквания свързани с характерни конструктивни особености на шинните конструкции и методите за тяхното изпитване, които следва да бъдат отчитани, а към изпитанията да се подхожда с необходимото внимание.

Литература

[1] Долин А. П., М. А. Козинова; *Основные положения и требования новых нормативных документов по жесткой ошиновке ОРУ и ЗРУ 110-500 кВ*; ЭЛЕКТРО 2'2008 31-7;

[2] Долин А. П., Л. Е. Егорова; *Применение современных демпферирующих устройств жёсткой ошиновки ОРУ*; Доклад на Всероссийской научно-технической конференции "Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем"; ЭНЕРГО; 2012:36-9;

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

[4] НАРЕДБА № 3 / 2004г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.

[5] НАРЕДБА № РД-02-20-19 / 2011г. за проектиране на строителните конструкции на строежите чрез прилагане на европейската система за проектиране на строителни конструкции.

[6] 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).

Автор: маг.инж. Калоян Бурванов, докторант в катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *K_Burvanov@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. В. Колев

ФОТОБИОЛОГИЧНО ДЕЙСТВИЕ НА СВЕТЛОДИОДНИ ИЗТОЧНИЦИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ В БИТА

Камелия Николова, Николина Янева, Петя Джановска

Резюме: *В доклада се разглежда фотобиологичното въздействие на светлодиодни ретрофит източници с различно спектрално разпределение на лъчението и цветна температура. Представени са резултати за измерените спектрални характеристики на изследваните източници и е оценен техния фотобиологичния ефект при зададена часова използваемост и приложения в бита за локално осветление.*

Ключови думи: *светлодиодни „ретрофит" лампи, фотобиологично въздействие*

PHOTOBIOLOGICAL IMPACT OF LED LAMPS FOR DOMESTIC APPLICATIONS

Kamelia Nikolova, Nikolina Yaneva, Petya Djanovska

Abstract: *In the present paper it is represented the photobiological impact of LED retrofit lamps with different spectra of radiation and correlated color temperature. The represented results relate to measured radiance of the light sources and evaluation of their photobiological effect in applications for domestic local lighting with given exposure time.*

Keywords: *LED retrofit lamps, photobiological effect, local lighting*

1. Въведение

За да се оцени един източник на оптично лъчение, излъчващ в широк спектрален диапазон, е необходимо да се определят:

- спектралното разпределение на оптичното лъчение в точки, които са пряко свързани с човешко присъствие;
- размера на проектирания образ на светлинния източник за спектралния диапазон, в който са възможни увреждания на ретината на окото;
- промяната на лъчението в конкретни геометрии на уредбите с промяната на разстоянието до източника [1].

Поставените нормативни изисквания за условия на фотобиологичен риск в БДС En 62471:2008 се основават на редица проведени изследвания за въздействието на оптичничното лъчение върху човешкия организъм. Те представляват ограничения за степен на експозиция или облъченост на хората, пребиваващи в поме-

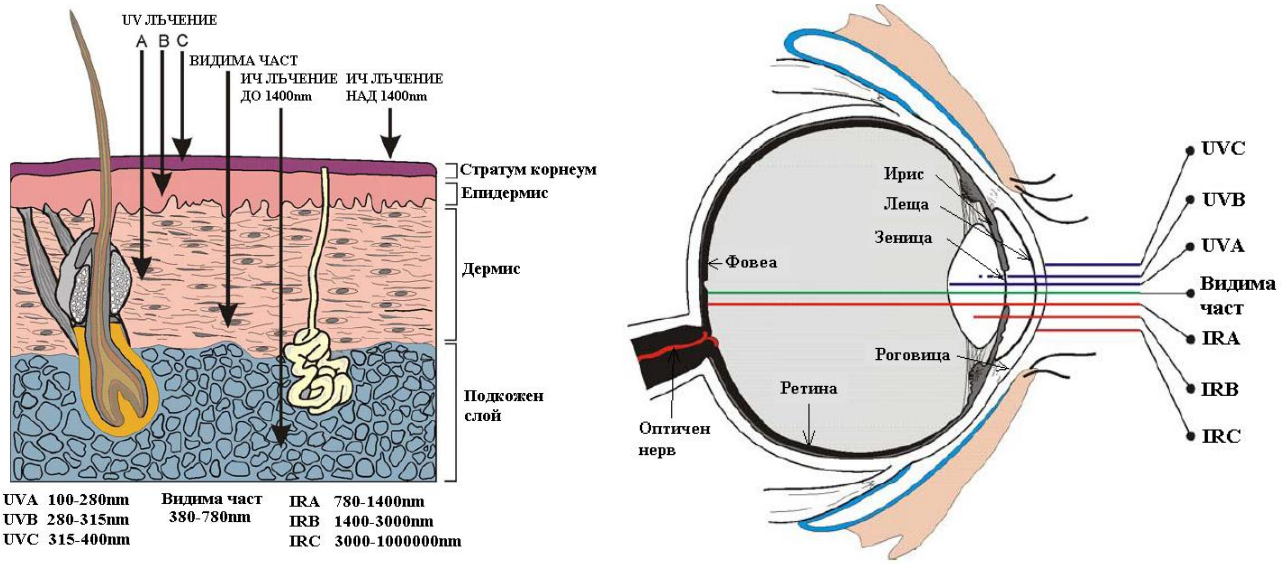
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

щения, в които се използват различни източници на оптично лъчение. Степента на експозиция или облъченост на човешкото око или кожа се дефинира като стойности, за които не се очаква да се прояви вредно биологично въздействие.
Биологичните въздействия може да бъдат разделени на остри (бързо проявяващи се) и хронични (в резултат на продължителни и повтарящи се експозиции за продължителен период от време). Счита се, че острите биологични въздействия се проявяват само при надхвърляне на граничните стойности за експозиция и то по различен начин при отделните индивиди. Хроничните ефекти често нямат праг, под който да не се наблюдават. Рискът може да бъде редуциран чрез намаляване на експозицията и съблюдаване на граничните нива на експозиция на съответното оптично лъчение [2].

2. Фотобиологичен ефект от оптично лъчение върху човешкия организъм

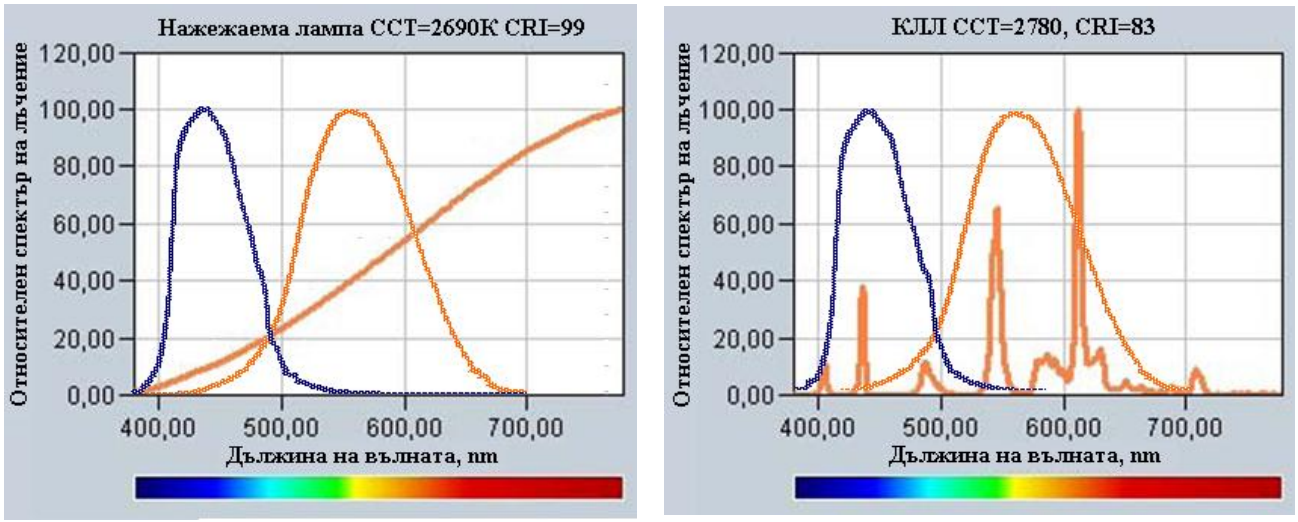
Съвременните медицински и биологични изследвания потвърждават, че ако нормалната концентрация на мелатонин в кръвта (който зависи от спектъра на дневната светлина) се наруши, това повлиява зле на психологичното състояние (безсъние, депресия, тревожност). Ако тези отклонения станат хронични, влиянието се натрупва и води до сериозни последствия за здравето - преждевременно стареене, загуба на репродуктивни функции, развитие на рак на гърдата и др.



Фиг.1. Проникване на лъчение с различна дължина на вълната през структурата на човешките кожа и очи [2]

Оптичните лъчения с различна дължина на вълната проникват по различен начин, както по отношение на структурата на човешката кожа, така и по отношение на очите - фиг.1.
Лъченията в ултравиолетовата (UV) част на спектъра са с висока биологична активност, като фотобиологичните реакции се разделят на деструктивно-модифициращи (UV-C) и функционално-физиологични (UV-B и UV-A). Достатъчно големи дози UV лъчение с дължина на вълната (λ) по-малка от 300nm може да предизвика необратими изменения в клетъчните структури [3]. Лъчение във видимия спектър с дължина на вълната 435-440nm може да причини същия ефект,

който е известен с наименованието „риск от синя светлина”. Хроничното облъчване с високи нива на лъчение във видимия спектър може да увреди ретината и в резултат да се влоши цветовото възприятие и нощното виждане [2].
За това интерес представляват изследвания на различни видове изкуствени източници на светлина от гледна точка на биологичния им ефект и по-специално влиянието им върху концентрацията на мелатонин при еднакъв визуален ефект (цветна температура CCT и осветеност) - фиг.2.

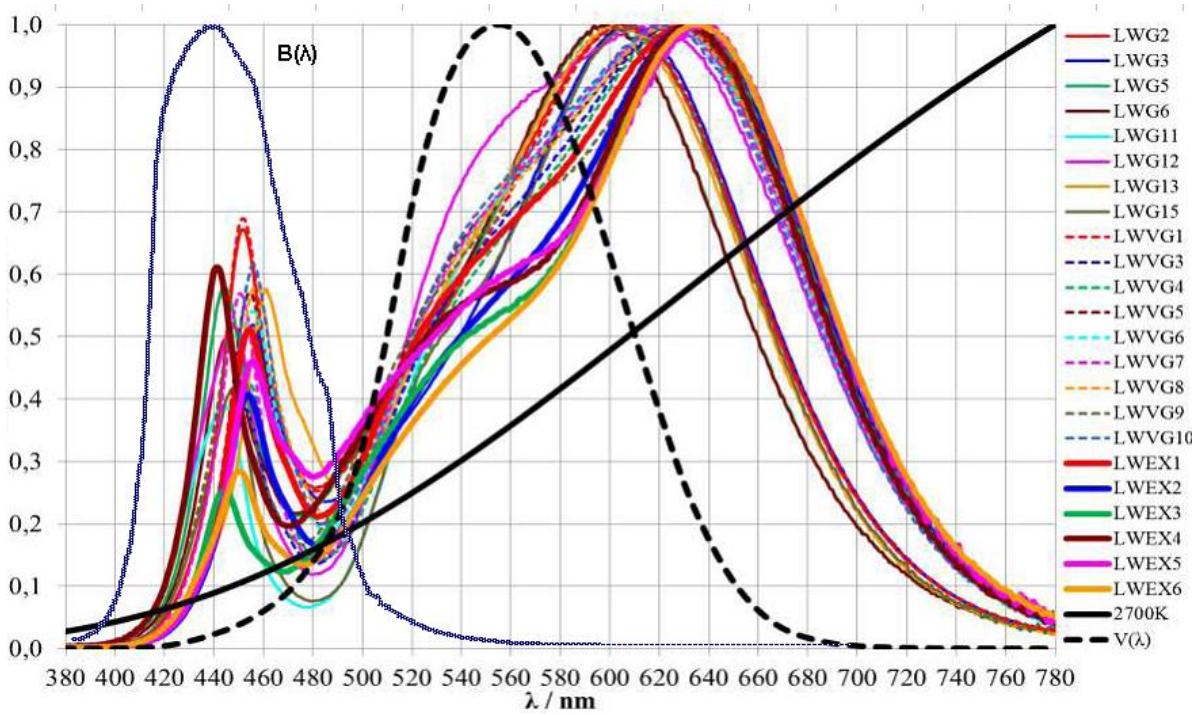


Фиг.2. Функцията V(λ) и относителния спектър на биологичния ефект (потискане на отделянето на мелатонин) от синята светлина B(λ), сравнени със спектралната плътност на лъчението на конвенционални източници с топло бяла светлина [4]

Ограниченията по отношение на ефективността на използваните светлинни източници доведоха до необходимост от замяна на използваните в бита нажежаеми лампи с техни алтернативи с по-висок светлинен добив. Удобството при замяната им е причина за разработването на разнообразни конструктивни решения на т.нар. „ретрофит” лампи, като в последните няколко години делът на светлодиодните източници с фосфорно покритие нараства значително. Характерното спектрално разпределение на лъчението на светлодиодните източници с бяла светлина с изразен пик в областта на синия цвят е предпоставка за наличие на фотобиологичен риск, както за кожата на човека, така и за увреждания на ретината на човешкото око при директни въздействия.

Максимумът на функцията, определяща степента на увреждане на ретината от количеството лъчение в синята част на спектъра, B(λ), е между 446-477nm и съвпада с типичния максимум на излъчване в същата област на широко разпространените фосфорни светлодиоди - фиг.3.

Реалната степен на рисково предозиране все още е обект на активно обсъждане и изследване. Въпреки това препоръчително е внимателно да се избират светлинни източници, особено в помещения с продължителна часова използваемост.



Фиг.3. Функцията V(λ) и относителния спектър на биологичния ефект от синя светлина B(λ), сравнени със спектралната плътност на лъчението на светлодиоди с топло бяла светлина и цветна температура от 2700 до 3000K и CRI>80 [5]

3. Изследване на фотобиологичното въздействие на светлодиодни „ретрофит" лампи за локално приложение в бита

Помещенията, които използваме в нашето ежедневие в бита се характеризират в общия случай с часова използваемост, надвишаваща 2,8 часа (10000s). В зависимост от интериора и предпочитанията се използват различни начини на осветяване, като интерес представляват приложения, в които разстоянието до светлинните източници е по-малко и се предполага наличие на по-интензивно въздействие. Настоящото изследване се отнася за използване на локално осветление в бита, определяне на облъчеността и лъчистата яркост и оценяване на фотобиологичния риск от осветители със светлодиодни лампи, които не са конструирани с допълнителни оптични или декоративни елементи пред излъчващата част на източника.

Изследването обхваща три вида светлодиодни „ретрофит" лампи с различно спектрално разпределение на лъчението и цветна температура - табл.1.

Табл.1. Електрически и светлотехнически характеристики на изследваните образци на светлодиодни лампи

Образец No	Технически характеристики	Цвят на светлината	CCT, K	CRI	Светлинен добив χ, lm/W
1	LED ретрофит; **5W**; 402lm; E27	Топло бял	2700	83	77
2	LED ретрофит; **5W**; 208lm; E27	Топло бял	3000	83	44
3	LED ретрофит; **6W**; 208lm; E27	Бял	5000	78	85

Светлинните източници са измерени в съответствие с изискванията на БДС En 62471:2008 при диаметър на излъчващата площ 60mm и максимално време за експозиция по-голямо от 10^4 s (2,8h).
За оценяване на фотобиологичното въздействие са използвани следните интегрални величини:

✓ Гранични нива на експозиция на незащитена кожа и очи в областта на UV лъчение:

$$E_S t = \sum_{200}^{400} \sum_t [\varepsilon(\lambda,t) S_{UV}(\lambda) \Delta t \Delta\lambda] < 30 J/m^2 \quad (1)$$

където $\varepsilon(\lambda,t)$ и $S_{UV}(\lambda)$ са съответно спектралната плътност на облъчеността W/(m^2.nm) и тегловната функция, определяща вредното въздействие от лъчения в областта на UV спектър; t – времето за експозиция, s; $\Delta\lambda$ – ширина на спектралния диапазон, nm; $H_S = E_S\, t$ - лъчиста експозиция, J/m^2;

✓ Допустимо време за облъчване на незащитени кожа и човешко око при гранична експозиция 30 J/m2:

$$t_{\max} = \frac{30}{E_S}, s \quad (2)$$

✓ Гранична облъченост на човешкото око в областта на UV-A лъченията (315-400nm):

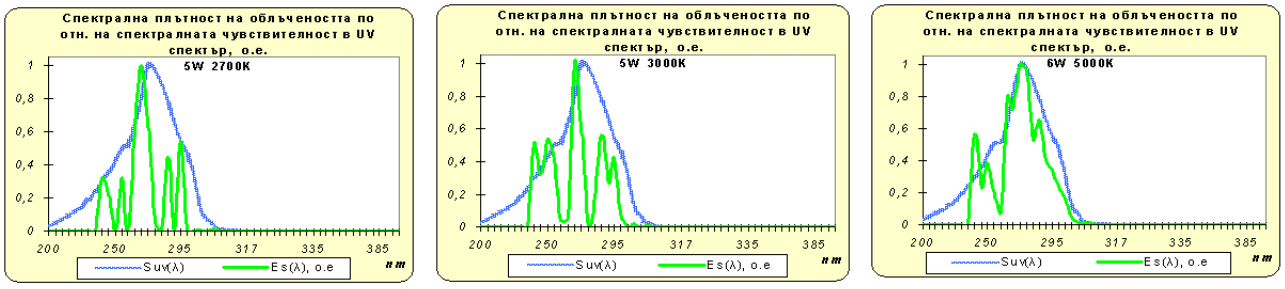
$$E_{UVA} = \sum_{314}^{400} [\varepsilon(\lambda) S_{UV}(\lambda) \Delta\lambda] \le 10 W/m^2 \quad (3)$$

при $t \ge 10^4$, s

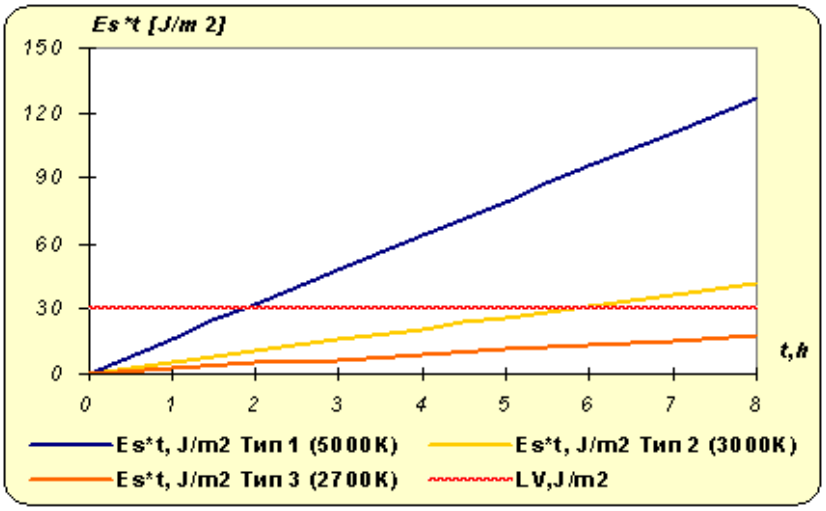
✓ Гранична лъчиста яркост (пространствена плътност на интензитета на лъчение) в спектралния диапазон (300-700nm):

$$L_B = \sum_{300}^{700} [l_B(\lambda) B(\lambda) \Delta\lambda] \le 100 W/(sr.m^2), \text{ при } t \ge 10^4, s \quad (4)$$

където $l_B(\lambda)$ и $B(\lambda)$ са съответно спектралната плътност на лъчистата яркост W/(sr.m^2.nm) и тегловната функция, определяща вредното въздействие от лъчения в областта на синия спектър; $\Delta\lambda$ - ширина на спектралния диапазон, nm.



Фиг.4. Функция на спектрална чувствителност на незащитена кожа и очи в областта на UV лъчение и оценена по фотобиологичното въздействие облъченост за образци със спектър на лъчение тип 1 (2700К), тип 2 (3000К) и тип 3 (5000К)



Фиг.5. Максимално допустими експозиция и продължителност
на облъчване на незащитена кожа и очи в областта на UV лъчение
за образци със спектърна лъчение
тип 1 (2700К), тип 2 (3000К) и тип 3 (5000К)

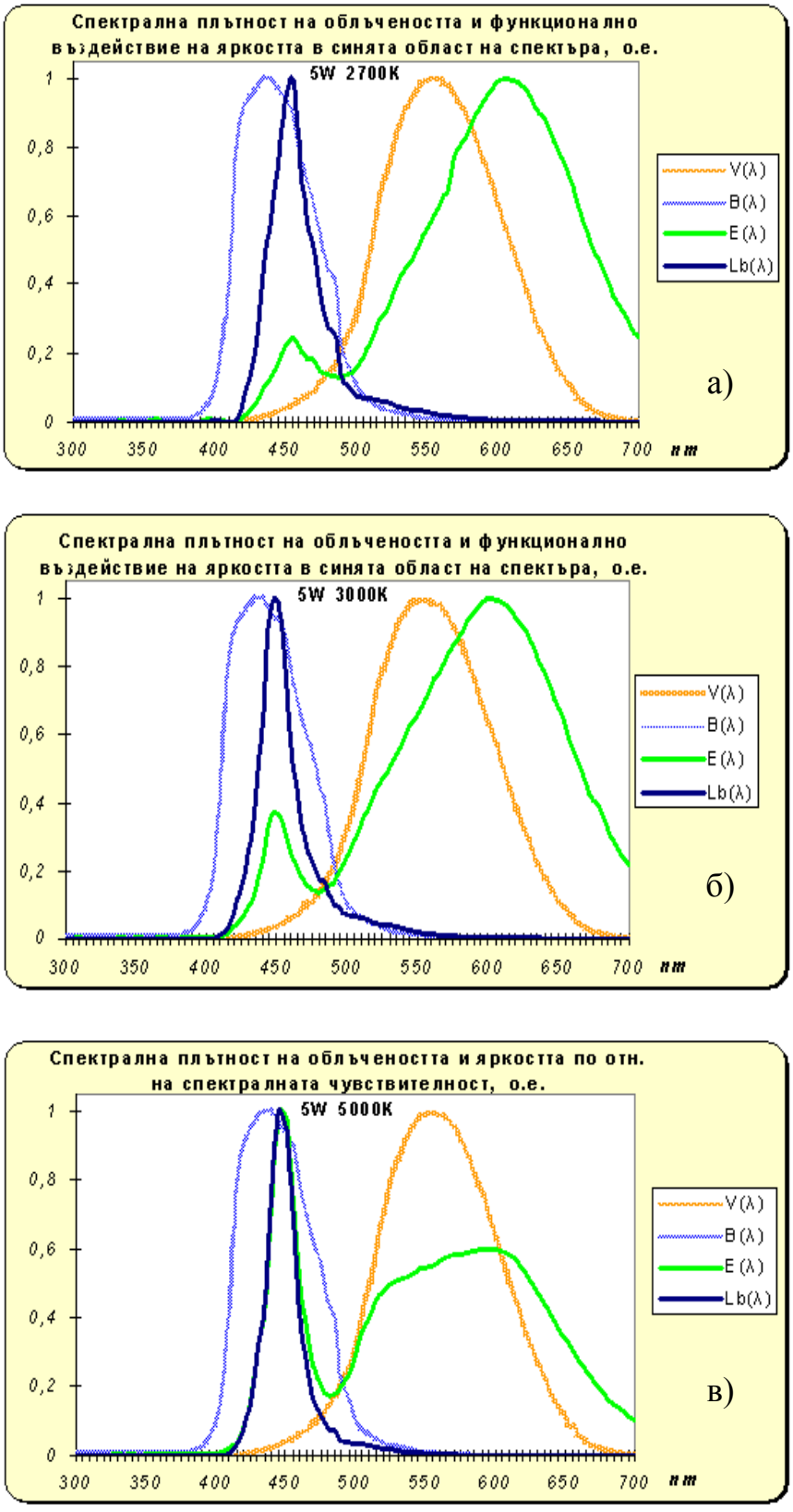
Получените резултати за спектралните и интегралните характеристики на изследваните образци по отношение на функциите на фотобиологично въздействие върху кожата и човешкото око от лъчение в UV част на спектъра са представени на фиг.4 и фиг.5.

Спектралното разпределение на лъчението на изследваните източници в разглежданата геометрия и оценената по фотобиологичния ефект от синя светлина лъчиста яркост, сравнени със спектралната чувствителност на човешкото око са дадени за трите образци на фиг.6.

Обобщени резултати за оценените по фотобиологичното въздействие ефективни величини в областта на UV и видимия спектър са представени в табл. 2.

Табл.2. Ефективни величини, оценени по фотобиологичното действие от изследваните светлодиодни „ретрофит" лампи

Образец No	Технически характеристики	Es [W_{UV}/m2]	t max, min	E_{UVA} [W_{UVA}/m2]	L_B [W_B/(sr.m^2)]
1	LED ретрофит; **5W**; 402lm; E27	0,000606558	**824,32 > 8h**	0,0000001 **≤10**	**5,43** **≤100**
2	LED ретрофит; **5W**; 208lm; E27	0,00143357	**5h > 348,78 < 8h**	0,0000003 **≤10**	**14,10** **≤100**
3	LED ретрофит; **6W**; 208lm; E27	0,003891344	**2h> 128,49 <3h**	0,0000028 **≤10**	**174,41** **≥100** t_{max}**=1h36min**



Фиг.6. Функциите V(λ), B(λ), относителни спектри на облъченост и яркост, оценена по биологичния ефект от синята светлина за:
а) Образец 1 (2700К); б) Образец 2 (3000К); Образец 3 (5000К)

10. Заключение

В настоящето изследване бе разгледан един типичен пример за локални приложения в бита на светлодиодни източници, който се характеризира с геометрия, предполагаща по-високи нива на облъченост. Изследваните образци на светлодиодни източници със спектрално разпределение тип 1 и тип 2 (топло бяла светлина 2700К и 3000К) се характеризират с ниски нива на фотобиологичен риск, дори и при директно облъчване и приложения за локално осветление.

Резултатите от изследванията за светлодиодни източници със светлоразпределение, определящо цветна температура 5000 К, показват по-високо от допустимото ниво на фотобиологичен риск за човешкото око от компоненти на лъчение със син спектър при ежедневна употреба над 1ч и 36 мин. При ежедневна продължителност на облъчване с повече от 2 ч и 8 мин на незащитена кожа и очи граничните нива по отношение на лъчение в UV част на спектъра също се надвишават. Следователно не се препоръчва употребата им в условия на продължителна работа при малки разстояния до източника на лъчение.

Литература

[1] БДС En 62471:2008, ***Фотобиологична безопасност на лампи и системи от лампи***

[2] **ec**.europa.eu - Radiation Protection Division, Health Protection Agency (2006), ***A Non-Binding Guide to the Artificial Optical Radiation Directive 2006/25/EC***

[3] Пачаманов А. (2006), ***Енергетична технология и екология Част 2: Облъчвателни уредби***, Авангард Прима 2006

[4] www.lightinglab.fi/IEAAnnex45/guidebook (2012), ***Chapter 3: Lighting Quality***

[5] Khanh T. (2013), ***Color quality criteria for the optimization of phosphor-converted white LEDs - Theory and practical optimization***, Proceedings, Lux Junior 2013, Dornfeld

Автори: Камелия Николова, гл. ас д-р, катедра „Обща електротехника”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *knikolova@tu-sofia.bg*; Николина Янева, маг. физ., НИИКЛ „Осветителна техника”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *niya@tu-sofia.bg*; Петя Джановска, маг. инж. докторант, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *p_djanovska@tu-sofia.bg*

Постъпила на: 02.09.2013 г. **Рецензент:** гл. ас. д-р Ива Петринска

ПРОГРАМНА РЕАЛИЗАЦИЯ НА АЛГОРИТЪМ ЗА АВТОМАТИЗИРАНО ПРЕСМЯТАНЕ НА ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА ЕЛЕКТРОДЪГОВИ ПЕЩИ

Кирил Стойков

Резюме: *В работата е извършена програмна реализация на алгоритъм за автоматизирано изчисление на трансформатори захранващи електродъгови пещи. Програмата отчита специфичните особености на този тип трансформатори, които се отличават от нормалните силови трансформатори. В алгоритъма са заложени нормализирани пластини на магнитопровода и нормализирани диаметри на ядрата, които се използват в нашата електротехническа промишленост. Програмата е тествана върху реален трансформатор изчислен и проектиран съгласно разработения алгоритъм.*

Ключови думи: *трансформатори за електродъгови пещи, регулиране на напрежението, програмна реализация на алгоритъма*

PROGRAM REALIZATION OF THE ALGORITHM FOR AUTOMATIC CALCULATION OF THE BEHAVIOR OF FURNACE TRANSFORMERS

Kiril Stoykov

Abstract: *In the paper program realization of the algorithm for automatic calculation of the behavior of furnace transformers, is made. The program gives an account of the specifically features of these transformers, which are different from normal transformers. In the algorithm are used normalized sizes of the lamellas of the core and normalized diameters of the yokes, used in industry. The program is tested on real transformer calculated and designed based on the suggested algorithm.*

Keywords: *furnace transformers, voltage control, program realization of the algorithm*

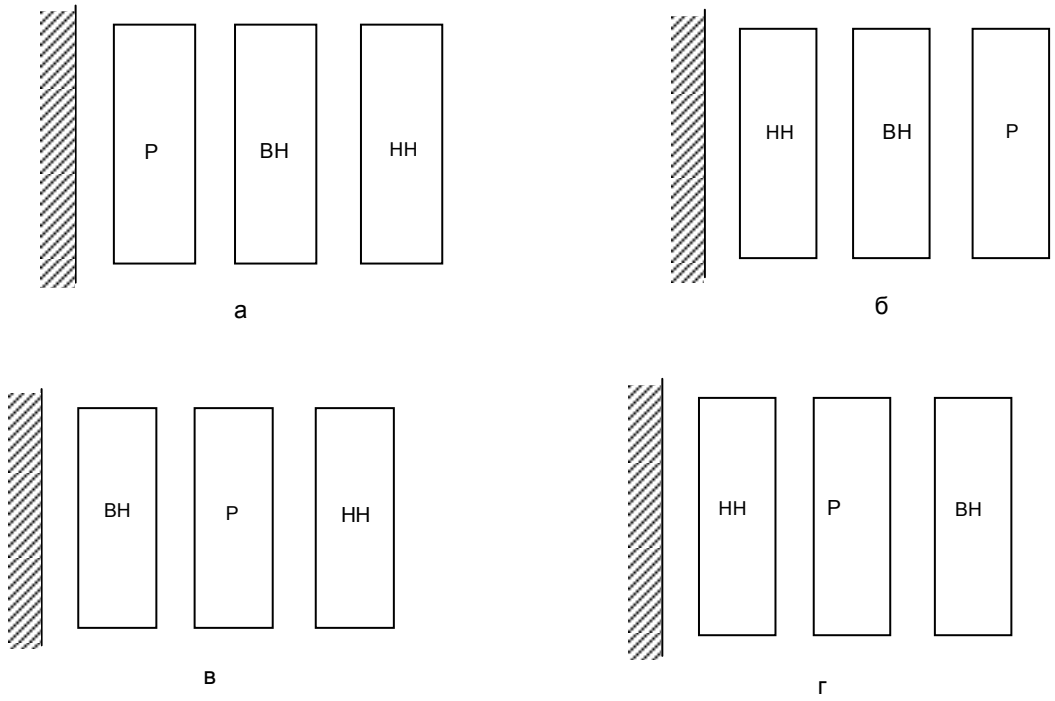
1. Въведение

Трансформаторите за захранване на електродъгови пещи са със значително по-голям диапазон на регулиране на напрежението отколкото трансформаторите с общо предназначение. Поради това, регулационната намотка е с радиални размери от порядъка на основната намотка, а понякога – и с по-голям радиален размер. Това изисква методиката за оразмеряване на тези трансформатори да отчита точно размерите на регулационната намотка, а не само прибилизително, както е при познатите от литературата методи, при които мястото, което заема регулационната намотка се оценява приблизително. Това там е оправдано, тъй

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

като радиалният размер на регулационната намотка е много по-малък от този на $ВН_{осн}$, а освен това, регулационната намотка е външна и не влияе върху загубите на к.с. и върху напрежението на к.с. на основната двойка намотки.
Освен това разположението на намотка високо напрежение ($ВН_{осн}$), намотка регулационна ($ВН_{рег}$) и намотка ниско напрежение (НН) се различава от това при трансформаторите с общо предназначение. Поради големите токове на страна ниско напрежение, намотка НН е най-външна. Намотка $ВН_{осн}$ обикновено е средна по разположение, а намотка $ВН_{рег}$ – най-вътрешна. Разбира се, в практиката се срещат и варианти когато $ВН_{рег}$ е средна по разположение, $ВН_{осн}$ – най-вътрешна (в случаите когато е необходимо по-слабо изменение на напрежението на к.с.). Електромагнитните параметри – загуби на късо съединение ($P_к$) , загуби на празен ход (P_0) и напрежение на късо съединение (u_k) при максимално вторично напрежение (U_{2MAX}) и изключена намотка $ВН_{рег}$ и тук се определят от двойката намотки НН и $ВН_{осн}$. Вътрешното разположение на намотка $ВН_{рег}$ налага да се определят нейните размери достатъчно точно, тъй като тя влияе от своя страна на размерите, масите, загубите и напрежението на к.с. на основната двойка намотки. Особено силно е това влияние когато $ВН_{рег}$ е в канала на разсейване, т.е. средна по разположение.
Характерна особеност на тези трансформатори е и това, че имат много малък брой навивки на вторичната страна – от 1 до 7 навивки. Това налага те да бъдат задължително един от зададените параметри които се варират в програмата.
На фиг.1 е показано разположението на намотките на трансформатора спрямо ядрото на магнитопровода. Схемите изпълнени по фиг.1.а и в се характеризират с това, че намотка НН е външна.Те се прилагат при по-големи мощности, респ. големи вторични токове. По отношение на електродинамичната устойчивост, схемата от фиг.1.а е по-благоприятна, тъй като регулационната намотка е извън главния канал на разсейване.
Изследванията показват, че схемата от фиг.1.в води до относително по-слабо изменение на напрежението на к.с. на трансформатора за стъпалата с по- ниско вторично напрежение. За сметка на това, регулационната намотка е подложена на по-големи електродинамични сили, което не е за пренебрегване, особено при трансформатори с по-големи мощности.
От казаното по-горе следва, че една методика пригодена специално за електропещни трансформатори ще позволи от една страна да се направят някои опростявания спрямо общите методи, тъй като ще отпаднат намотки свързани в ”зиг-заг”, петядрени трансформатори, терциерни намотки, кръгъл проводник и др.. Това от своя страна облекчава задаването на входните данни, а от друга – отчитат се специфичните особености на електропещните трансформатори. Предвид това, че трансформаторите за захранване на електродъгови пещи работят в режим на експлоатационни къси съединения, при решаване на задачата трябва да се вземат под внимание и останалите изисквания на съответните нормативни документи, тъй като може да се окаже, че най-икономичният вариант има недопустимо прегряване на активната част, несъответстваща стойност на индукцията в магнитопровода и др.



Фиг.1. Разположение на намотките на трансформатора спрямо ядрото

От казаното по-горе става ясно, че при ръчно пресмятане задачата е доста трудопоглъщаща. Освен това трудно може да се намери оптималният вариант, тъй като зависимостта която съществува между геометричните размери и загубите на празен ход, късо съединение и напрежението на късо съединение на трансформатора е доста сложна. Всичко това налага автоматизиране на процеса на горната задача.

2. Алгоритъм на програмата

Предлаганият метод и алгоритъм се отличават от прилаганите методи при силовите трансформатори с общо предназначение. Това обстоятелство е свързано с някои особености на ЕПТ, които са разгледани в [2],[3],[4],[5]. Тези особености оказват решаващо влияние върху конструкцията на ЕПТ, респ. и върху алгоритъма на пресмятане.

Всички изследвания се отнасят за трансформатори с концентрични намотки с директно регулиране на напрежението.

За да се определят главните размери на ЕПТ при зададени електрически параметри е необходимо да се установят достатъчно точни зависимости между електрическите характеристики – P_o, $P_к$ и u_k от една страна и главните му размери – диаметър на ядрото (*D),* широчина на прозореца на магнитопровода (*F),* височината на прозореца *(H)* и електромагнитните натоварвания – магнитна индукция (*B)* и плътността на тока (*δ)* – от друга страна.

За целта е разработен математически модел от вида [5]

$$\begin{cases} P_0 = F_1(D, F, H, m) \\ P_k = F_2(D, F, H, m) \\ u_k = F_3(D, F, H, m) \end{cases}$$

където *m* е зададена физическа величина (навивково напрежение, брой на навивки, индукция или друга).

Известни величини са също така мощността на трансформатора, диапазонът на регулиране на вторичното напрежение (от U_{2MAX} до U_{2MIN}), номерът на стъпалото до което мощността се запазва константна.
Получава се система, която се решава спрямо главните размери *D,H,F и* електромагнитните натоварвания *B,δ*.
В началото се уточняват всички изходни данни които се въвеждат като входни величини: - мощността на трансформатора P; захранващо напрежение $U_{1ф}$; диапазон на регулиране на вторичното напрежение U_2 - от U_{2MAX} до U_{2MIN}, респективно дълбочината на регулиране на напрежението K_U; номерът на стъпалото до което мощността се запазва константна - K_C; загубите на пр.х и к.с съответно - P_o и P_k; схемата на свързване на намотка ВН – "триъгълник или звезда"; тип на проводниковия материал със съответната изолация; изолационните разстояния; вида на охлаждането на трансформатора; цени на активните материали и др. (ако заявителят е предявил допълнителни изисквания).
Приемат се начални стойности за всички коефициенти които участват в математическия модел (коефициент на Роговски, коефициент на запълване на намотките, коефициент отразяващ отношението на токовите плътности на намотките, отношение на широчините на намотките, отношението на средните диаметри на намотките и др.- $k_R^{(0)}, k_\delta^{(0)}, x'^{(0)}, x''^{(0)}, y'^{(0)}, k_{w1}^{(0)}, k_{w2}^{(0)}$). Задава се броят на навивките на вторичната страна w_2. Изчислява се навивковото напрежение и чрез него се изчислява първата стойност на индукцията при известен диаметър. Изчисленията се проверяват по отношение на индукцията и се сравняват с предварително зададени граници. Ако има несъответствие вариантът се отхвърля и се преминава към следващото изчисление, което е с предварително зададена стъпка. Изчисляват се всички коефициенти, теглата на намотките, съответните коефициенти на запълване и се сравняват с предварително зададените стойности. Разликата не трябва да бъде по-голяма от $\pm 1\%$. В противен случай изчисленията се повтарят като се променят коефициентите $k_R^{(0)}, k_\delta^{(0)}, x'^{(0)}, x''^{(0)}, y'^{(0)}, k_{w1}^{(0)}, k_{w2}^{(0)}$ с нови стойности. Това продължава докато се изпълни предварително зададено условие.
Вариантите се изчисляват при дадени P_o, P_k и u_k до обхождане на стойностите на всички диаметри заложени в цикъла. Ако при даден диаметър индукцията стане много висока (неприемлива стойност), вариантът не се пресмята.
След обхождане на стойностите на диаметъра, се варират последователно и другите параметри: P_o, P_k и евентуално u_k (само при необходимост) при съответно предварително избрана стъпка.
Целесъобразно е първоначално да се изследва една по – широка област от диаметри, след което да се установи оптималната област и отново да се реализира програмата, но вече в по-тясна област. Така по-лесно ще се получи оптималният вариант.

3. Програмна реализация

Блок-схемата на програмата е разгледан в[3],[4],[5]. Програмната реализация е извършена на програмен продукт MATLAB6.3.

```
tt_a3=1; % STAR connection, otherwise - STAR - DELTA connection
tt_control=1; % Coil HL_control near the core, otherwise -  in the difuse channel
                                ku=2.25                         delta_np2=0.8
epsP0=1.5;                      kFe=0.833                       delta_np3=2.5
epsalfa=1.5;                                                    z1=2.6
epskR=1.5;                      Uf1=20000                       z2=8.57
epskw1=1.5;                     Uf2=225                         z3=9.78
epskw2=1.5;                     w2=12                           Tr1=1.04
epskw3=1.5;                     I1f=33.33                       Tr2=1.04
                                I2f=2963                        Tr3=1.04
% Input data                                                    nL1=6
Bmin=1.6                        as=0.7028                       nL2=18
Bmax=1.65                       m_core=3                        nL3=8
P=2000                          h=0.75                          delta_iso1=0.5/100
Pkdob=2500                      gamaFe=7.65                     delta_iso2=0.008
kd=0.8676                       gamaw=8.9                       delta_iso3=0.025
                                e=1
y_prim0=0.8027                  c=1.33                          Ta1=1.03
x_prim0=1.3125                  ni=1.1                          Ta2=1.03
x_sec0=0.0544                   d=2.03                          Ta3=1.03
kR=0.96951                      a_prim=0                        hk1=0.04
kq=1.022                        Pba=1.47                        hk2=0.045
kd0=0.8677                      Pbb=1.47                        hk3=0.115
kd10=1.0693                     kda0=1.52                       L=9.408
kd20=1.005                      kdb0=1.52
kw10=0.6035                     beta=1                          c_ksi1=0.96
kw20=0.3986                     gamaw1=8.9                      c_ksi2=0.96
kw30=0.152                      gamaw2=8.9                      c_ksi3=0.96
                                gamaw3=8.9
f=50                            kd1=1.0693                      nT1=0.9
S=0.21                          kd2=1.005                       nT2=0.9
x=1.3137                        mp1=32                          nT3=0.9
a11=0.1                         mp2=1
a20=0.22                        mp3=1                           kd1=1.0693
a23=0.2                         Ta=1.05                         kd2=1.005
a30=0.22                        Tr=1
a31=0.21                        ctp=1                           mFe=3
a32=0.2                         delta_np1=0.5                           mw=3

% Solution
for Uk=5:0.05:6.5                                       for P0=5000:10:5700
   for Pk=20000:10:21000
      for w1=1066:2:1100                                    Ua=Pk/(10*P);
        for D=27:0.5:29                                     Us=sqrt(Uk^2-Ua^2);
```

```
                Pkn=Pk-Pkdob;
                kk=Pk/Pkn;
                y0=y_prim0/kd;

kdn0=(kd10+y0*kd20)/(1+y0);
                kdk0=kk*kdn0;
                x0=kw10*kd/kw20;
                al-
fa0=(1+y0)/(1+y_prim0-x_sec0*(1-
x_prim0));

kw0=2*kw10*kw20/(kw20+kw10*kd);

k1=(gamaw*Pk*50*Us*kdk0*alfa0)/(8
2.3*f*Ua*kw0*KR*Kq);
                a=0.5*(sqrt((3*S*S)     +
k1) - 3*S);
                a1=a/(1+x);
                a2=a-a1;

                if tt_a3==1
                   a3=a2*(ku-
1)*kw20/kw30;   % Coil HV - STAR
                else
                   a3=a2*((ku/sqrt(3))-
1)*kw20/kw30;    % Coil HV -STAR -
DELTA
                end

                if tt_control==1

F=2*(a1+a2+a3+a30+a32+S)+a11;    %
HV_control near the core

Ds=D+2*(a30+a3+a32+a2)+S;
                else

F=2*(a+a3+Ss+a20)+a11                %
HV_control in the difuse channel

Ds=D+2*(a20+a2)+(a23+a3+a31);
                end

                M=F+D;
                Sa=pi*D*D*kFe/4;
                Uw=Uf2/w2;
                Ba=Uw*50/(2.22*f*Sa);

                if Ba>Bmin & Ba<Bmax
                   Bb=Ba;

H=(7.9*pi*P*f*Ds*as*kR*kq)/(m_cor
e*Us*Uw*Uw*100)+2*h;

GFea=m_core*Sa*H*gamaFe;

lFe=e*H+c*ni*F+d*ni*D+ni*a_prim;

GFe=m_core*Sa*lFe*gamaFe;
                GFeb=GFe-GFea;

P0calc=(Pba*GFea*kda0+Pbb*GFeb*k
db0)*((f/50)^beta)*kd0;

                pp_ins=abs((P0calc-
P0)*100/P0);
                   if pp_ins<epsP0

D3av=D+2*a30+a3;

D2av=D+2*(a30+a3+a32)+a2;

D1av=D+2*(a30+a3+a32+a2+S)+a1;
                      l=H-2*h;

Gw1=m_core*pi*gamaw1*kw10*a1*l
*D1av;

Gw2=m_core*pi*gamaw2*kw20*a2*l
*D2av;

Gw3=m_core*pi*gamaw3*kw30*a3*l
*D3av;

delta1=sqrt(Pk/(kk*Pk*(Gw1*kd1+Gw
2*kd2)));
                      delta2=delta1/kd;

Q1=(I1f/(delta1*mp1))/10000;
```

```
Q2=(I2f/(delta2*mp2))/10000;
xa1=delta_np1*(sqrt((delta1*mp1)/If1)
+ 1.01/sqrt(z1));
xb1=(delta_np1+hk1)*(sqrt((delta1*mp
1)/If1) + sqrt(z1)/1.01);

kw1=1/(Ta*Tr*ctp*xa1*xb1);


xa2=delta_np2*(sqrt((delta2*mp2)/If2)
+ 1.01/sqrt(z2));

xb2=(delta_np2+hk2)*(sqrt((delta2*mp
2)/If2) + sqrt(z2)/1.01);

kw2=1/(Ta*Tr*ctp*xa2*xb2);


xa3=delta_np3*(sqrt((delta2*mp3)/If2)
+ 1.01/sqrt(z3));

xb3=(delta_np3+hk3)*(sqrt((delta2*mp
3)/If2) + sqrt(z3)/1.01);

kw3=1/(Ta*Tr*ctp*xa3*xb3);


a_rad1=a1/(Tr1*nL1)-delta_iso1/100;

b_ax1=Q1/(0.98*a_rad1);

a_rad2=a2/(Tr2*nL2)-delta_iso2/100;

b_ax2=Q2/(0.98*a_rad2);
                        Q3=Q2;

a_rad3=a3/(Tr3*nL3)-delta_iso/100;

b_ax3=Q3/(0.98*a_rad3);


L1_prim=b_ax1/((b_ax1+delta_np1+hk
1)*Ta1);

L2_prim=b_ax2/((b_ax2+delta_np2+hk
2)*Ta2);

L3_prim=b_ax3/((b_ax3+delta_np3+hk
3)*Ta3);


sigma=(a1+S+a2)/L
                        kkR=1-
sigma+0.35*sigma*sigma;


ksi1=c_ksi1*a_rad1*10*sqrt((f*L1_pri
m*kkR)/50);

ksi2=c_ksi2*a_rad2*10*sqrt((f*L2_pri
m*kkR)/50);

ksi3=c_ksi3*a_rad3*10*sqrt((f*L3_pri
m*kkR)/50);

                        ked-
dy1=(100*(ksi1^4)*(((mp1*nL1)^)-
0.2))/9;
                        ked-
dy2=(100*(ksi2^4)*(((mp2*nL2)^)-
0.2))/9;
                        ked-
dy3=(100*(ksi3^4)*(((mp3*nL3)^)-
0.2))/9;


temA1=((a_rad1+delta_np1)/a_rad1)^2
;

temB1=((mp1/nT1)^2)-1;

kc1=100*(ksi1^4)*temA1*temB1/45;


temA2=((a_rad2+delta_np2)/a_rad2)^2
;

temB2=((mp2/nT2)^2)-1;
```

```
kc2=100*(ksi2^4)*temA2*temB2/45;


temA3=((a_rad3+delta_np3)/a_rad3)^2
;

temB3=((mp3/nT3)^2)-1;

kc3=100*(ksi3^4)*temA3*temB3/45;


kdd1=1+(keddy1+kc1)/100;

kdd2=1+(keddy2+kc2)/100;

kdd3=1+(keddy3+kc3)/100;


XX=(kw1*kd)/kw1;
                        XX_prim=a2/a1;

XX_sec=a1/D1av;

YY_prim=D2av/D1av;

YY=YY_prim/kd;

kdn=(kd1+YY*kd2)/(1+YY);
                        kdk=kk*kdn;
                        al-
fa1=(1+YY)/(1+YY_prim-XX_sec(1-
XX_prim));
                    end


                end

                if          abs(100*(alfa1-
alfa0)/alfa1)>epsalfa
                        if          abs(100*(kkR-
kR)/kkR)>epskR
                            if      abs(100*(kw1-
kw10)/kw1)>epskw1
                                if  abs(100*(kw2-
kw20)/kw2)>epskw2
                                    if
abs(100*(kw3-kw30)/kw3)epskw3
                                        goto(132)
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end

                    Uk=Uk
                    Pk=Pk
                    w1=w1
                    D=D
                    P0=P0
                    Gw=Gw1+Gw2+Gw3
                    Ma=mFe*GFe+mw*Gw;

                end %P0
            end % D
        end % w1
    end % Pk
end % Uk
```

% Results

```
Uk =5.9500
Pk =20310
w1 =1100
D =28
P0 =5680
Gw =1590
```

4.Заключение

Програмата дава данни за ядрото на магнитопровода (размери на пластините, дебелина на пакетите, маса на стоманата); стойност за индукцията в магнитопровода за всеки вариант. Получените резултати могат да удовлетворяват заложените данни от заявителя, но могат и да се отклоняват от стандартните данни. Това налага получените резултати да се анализират от проектанта, да се приемат допустими стойности и да се извърши нова реализация на програмата.

Литература

[1] Бородулин Ю., Попов Г., Лапин А.(1984), ***Вопросы технологии автоматизированного проектирования трансформаторов 10 – 110кВ на базе САПАР.*** Электромеханика. Изв. Вузов, №8, 1984.

[2] Стойков К.. ***Автоматизирано проектиране на електропещни трансформатори с директно регулиране на напрежението.*** Доклад на младежки симпозиум"Съвременни проблеми на електротехническата промишленост" СИЕЛТ – 85, Варна, 1985.

[3] Стойков К.. ***Програма за изчисляване на теоретични варианти на електропещни трансформатори с директно регулиране на напрежението***. СИЕЛТ 87, Варна, 1987.

[4] Стойков К .,Кукушев Х.,. ***Метод и алгоритъм за проектиране на електропещни трансформатори.*** Юбилейна научна сесия "100 години жп образование в България", София, 1990.

[5] Stoykov, I. Kostov, ***Elements of automated design of electric furnace transformers,*** Proceedings of ful papers of 7th International conference on applied electromagnetics PEC – 2005, Nis, pp. 227 – 237.

Автор: Кирил Стоянов Стойков, доц. д-р инж., катедра „Обща електротехника", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *k_stoykov @tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензен**т: проф. С. Стоянов

ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОЦЕСИТЕ НА НАМАГНИТВАНЕ НА МАГНИТНИ СИСТЕМИ С РЕДКОЗЕМНИ МАГНИТИ

Костадин Миланов, Райна Ценева

Резюме: *Постоянните магнити намират все по-широко приложение в изделията на електротехниката и електрониката. Новите свръхкоерцитивни магнити на основата на редкоземните материали (Fe–Nd–B) изискват използване на намагнитващи устройства с високи стойности на магнитните полета. Високите стойности в реалната практика могат да бъдат достигнати чрез прилагане на импулсни методи при ниски нива на потребяванена енергия. В настоящата работа са разработени модели на различни конфигурации на индуктори от магнетизатори с и без магнитна система, като е решена магнитната задача с програмния продукт FEMM.*

Ключови думи*: системи за намагнитване, намагнитване на редкоземнипостоянни магнити, метод с крайни елементи, импулсни намагнитващи полета.*

INVESTIGATION OF THE MAGNETIZATION PROCESSES OF MAGNETIC SYSTEMS WITH RARE EARTH MAGNETS

Kostadin Milanov, RainaTzeneva

Abstract: *Permanent magnets are widely used in the electrical and electronic equipment. The new overcomercitive magnets, based on the rare-earth materials (Fe-Nd-B) require using of powerful magnetic systems. In the real practice the high values of the magnetic flux density can be reached by the application of pulse practices at low levels of the energy consumption. Models of different configurations of inductors from magnetizators with and without magnetic systems are investigated in this paper. The magnetic problem is solved using the software package FEMM.*

Key words: *magnetization systems, magnetization of rare-earth permanent magnets, finite elements analysis, pulse magnetization fields.*

1. Въведение

Постоянните магнити намират все по-широко приложение в електрическите машини и апарати, в нови устройства с поляризирани магнитни системи, в мощни акустични преобразователи и др.

Производството на съоръжения с редкоземни магнити в преобладаващите случаи е невъзможно да се осъществи с предварително намагнитени постоянни магнити. Силите на привличане между феромагнитните детайли и постоянните

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

магнити са големи и възпрепятстват нормалния процес на сглобяване. Практикува се намагнитване след като магнитите са монтирани в съответните системи и конструкцията на устройствата.

Самостоятелното намагнитване на постоянни магнити не създава особени проблеми. При намагнитване на цели системи, в които те участват се появяват проблеми. Те произтичат от силно нарасналият обем, в който трябва да се постигне висока магнитна напрегнатост, която изискват редкоземните магнити за ефективно намагнитване, достигаща до $(4\div5).10^6$ A/m. Феромагнитните детайли от системите, в които са поставени постоянните магнити възпрепятстват процеса на намагнитване не само заради нарасналия обем, но и заради появата на вихрови токове в масивните проводящи части на системите. Посочените особености очертават устройствата за импулсно намагнитване като достатъчно сложни съоръжения, които изискват тяхното проектиране да бъде съобразено както с общите изисквания за намагнитване на материала на постоянните магнити, така и със самите магнитни системи, в които са включени постоянните магнити.

Те имат метални части (арматури), които са изпълнени предимно от феромагнитни материали и са част от конструкцията на съоръженията с постоянни магнити. Високите стойности на полетата, които са необходими за намагнитване на редкоземните постоянни магнити могат да се постигнат с разумна ефективност единствено при прилагане на импулсни методи за намагнитване. Явленията са твърде сложни. Те се поддават на аналитично определяне чрез компютърни симулации, но се налага да се ползват и експериментални резултати. Въз основа на прилагането и на двата метода могат да се определят оптималните параметри на импулсите за намагнитване за определена конструкция магнитни системи, а въз основа на това и изходните данни за проектиране на главните съставни части на импулсните магнитизатори. Импулсният магнитизатор е съобразен с особеностите при намагнитване на системи със сравнително големи масивни арматури.

Системите за високоговорители имат големи масивни части, което предполага, че при намагнитване ще се развиват вихрови токове с големи стойности, които възпрепятстват процесите на намагнитване.

За намаляване на влиянието на вихровите токове при проектиране на импулсни магнетизатори и на индуктори за работа с тях, са предприети две стъпки: *първа* – работното напрежение на кондензаторната батерия, е избрано в долната част на обхвата на работните напрежения при импулсни магнетизатори; *второ* – схемата на тиристорните ключове формира комбинирана форма на намагнитващия ток през индуктора.

Формата на намагнитващия ток през индуктора се състои от четвърт синусоида и експоненциално спадащ импулс[1].

Изследваните индуктори са предназначени за намагнитване на системи за високоговорители. Индукторите са от соленоиден тип с цилиндричен работен отвор с диаметър d = 160 mm. Проектирани са за импулсно намагнитване на системи с

висококоерцитивни постоянни магнити [2].

Целта на изследването е при известни форма и геометрични размери на индукторите – цилиндрична, трапецовидна и Хелмхолцови бобини да се изследва магнитното поле при наличието на магнитна система, състояща се от масивна феромагнитна част и редкоземен магнит FeNdB.

В настоящата работа са разработени модели, като е решена магнитната задача с програмния продукт FEMM[3]. Намотките са изработени от мед.

2. Изложение

Първоначално е моделиран цилиндричен индуктор и разпределението на магнитното му поле е онагледено на фиг.1.

На фиг.2 е показан моделът на магнитното поле на цилиндричния индуктор, при който е налична и магнитна система, състояща се от феромагнитен детайл и постоянен редкоземен магнит.

Разпределението на индукцията по характерния контур вътрешен – външен диаметър на постоянния магнит е показано на фиг.3.

На фиг.4 е показано разпределението на магнитното поле на друго конструктивно решение на индуктора – трапецовиден индуктор.

Разпределението на магнитното поле в трапецовиден индуктор при наличието на постоянен магнит и магнитна система е онагледено на фиг.5.

Разпределението на магнитната индукция по характерния контур външен – вътрешен диаметър на постоянния магнит, разположен в трапецовиден индуктор без канали е видно на фиг.6.

Фиг.7 онагледява разпределението на магнитната индукция в трапецовиден индуктор с канали.

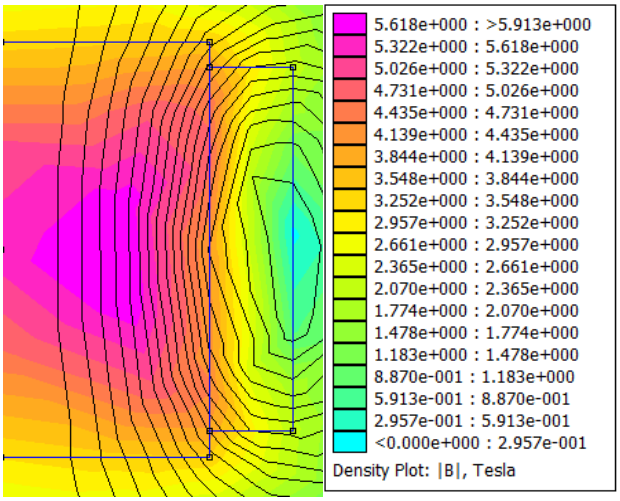
Фиг.8 показва същото разпределение, но когато в индуктора е поставена магнитна система от феромагнитен детайл и постоянен редкоземен магнит.

Разпределението на магнитната индукция по контура между вътрешния и външния диаметър на постоянния магнит от FeNdB е равномерно, което се вижда от фиг.9.

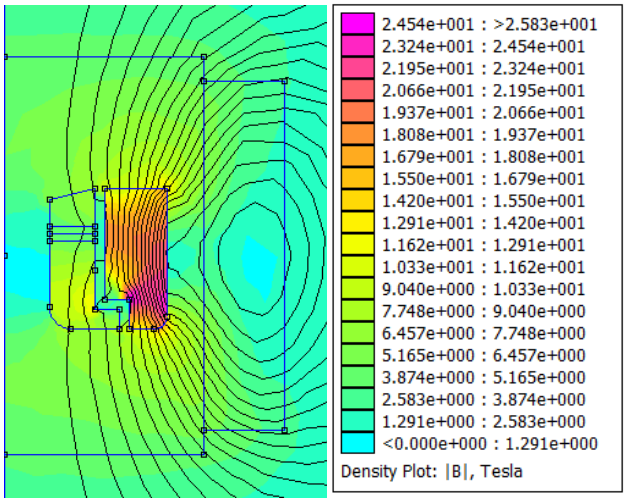
Моделът на магнитното поле в Хелмхолцов индуктор е онагледен с фиг.10.

Аналогичен модел, но за случая с магнитна система от феромагнитен детайл и постоянен редкоземен магнит е виден от фиг.11.

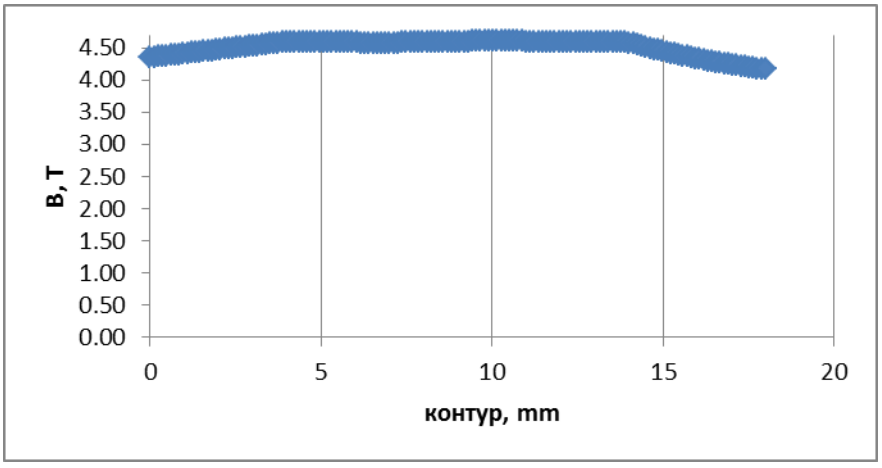
Равномерността на разпределението на магнитната индукция по характерния контур външен – вътрешен диаметър на постоянния магнит, разположен в Хелмхолцовия индуктор е видно на фиг.12.



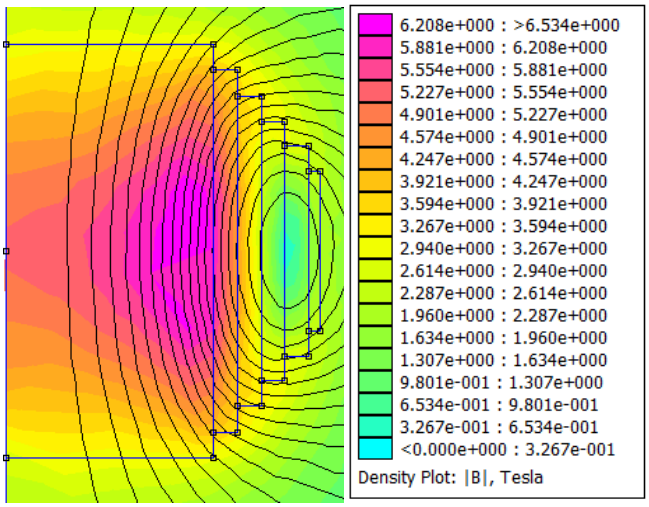
Фиг.1. Магнитна индукция в цилиндричен индуктор



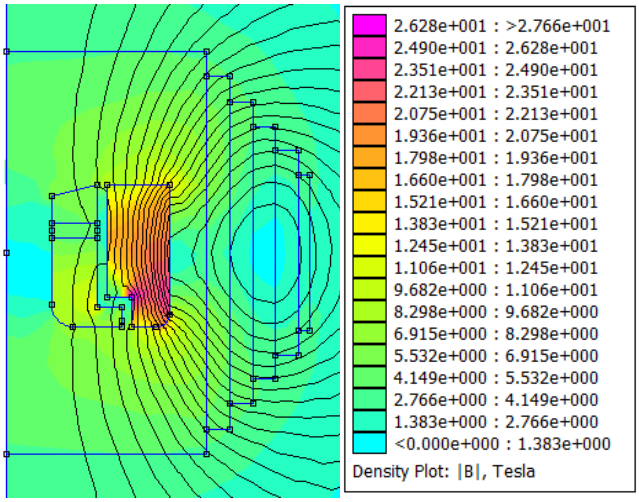
Фиг.2. Магнитна индукция в цилиндричен индуктор с магнитна система



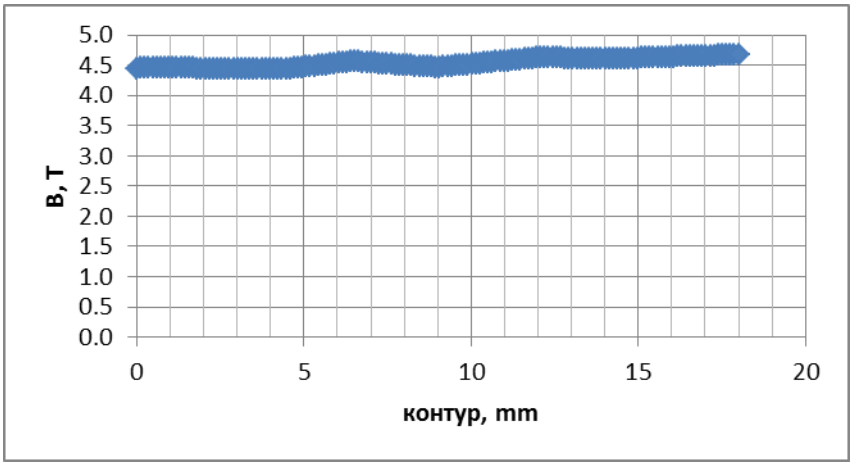
Фиг.3. Разпределение на магнитната индукция по характерния контур външен – вътрешен диаметър на постоянния магнит поставен в цилиндричен индуктор



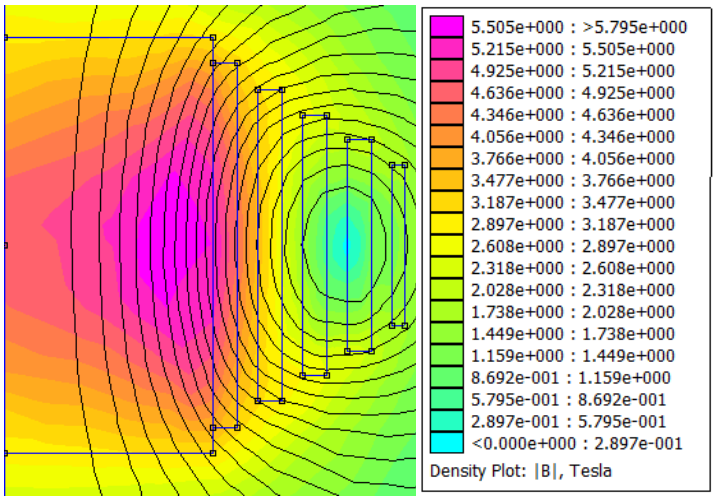
Фиг.4. Разпределение на магнитната индукция в трапецовиден индуктор



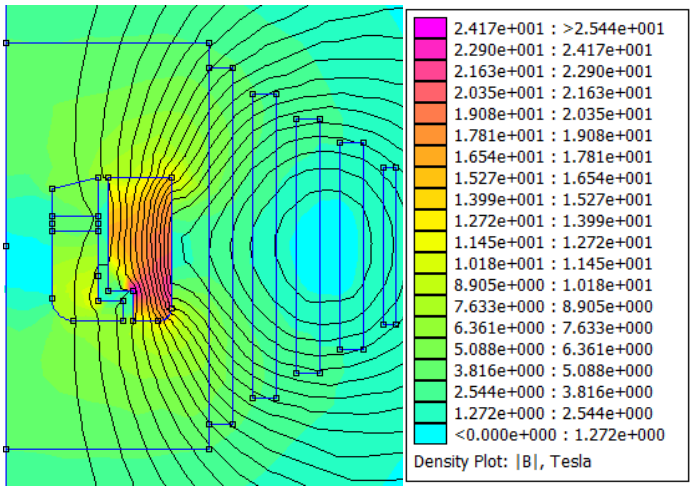
Фиг.5. Картина на магнитната индукция в трапецовиден индуктор
с магнитна система



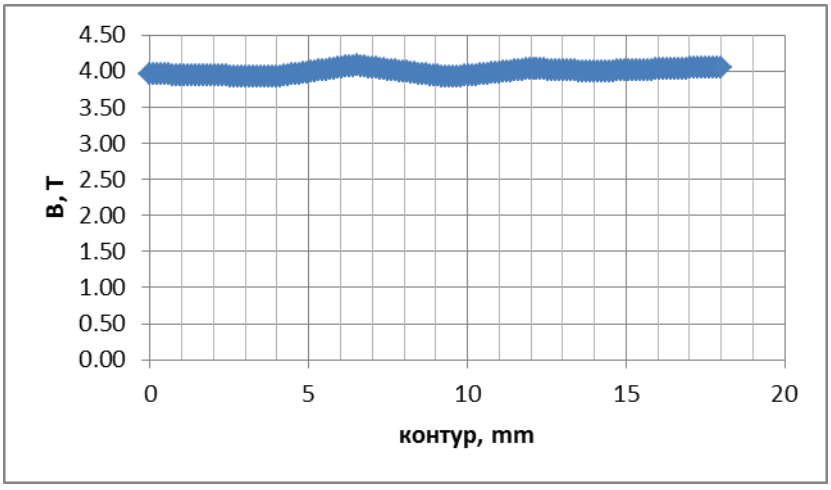
Фиг.6. Разпределение на магнитната индукция по характерния контур вън-
шен – вътрешен диаметър на постоянния магнит разположен
в трапецовиден индуктор



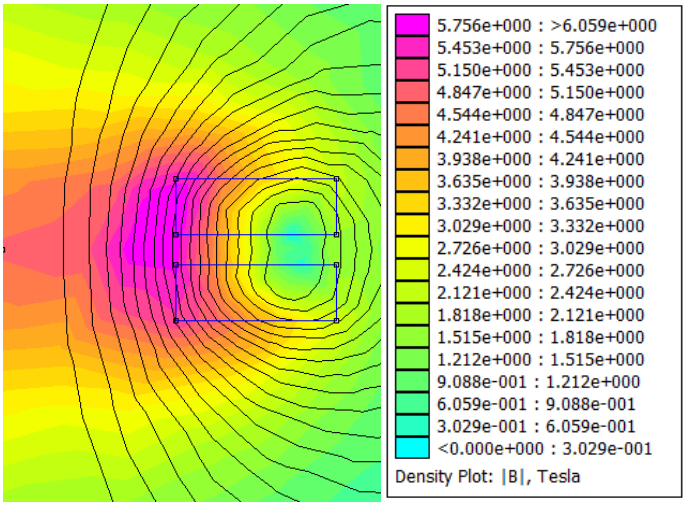
Фиг.7. Картина на магнитната индукция в трапецовиден индуктор с канали



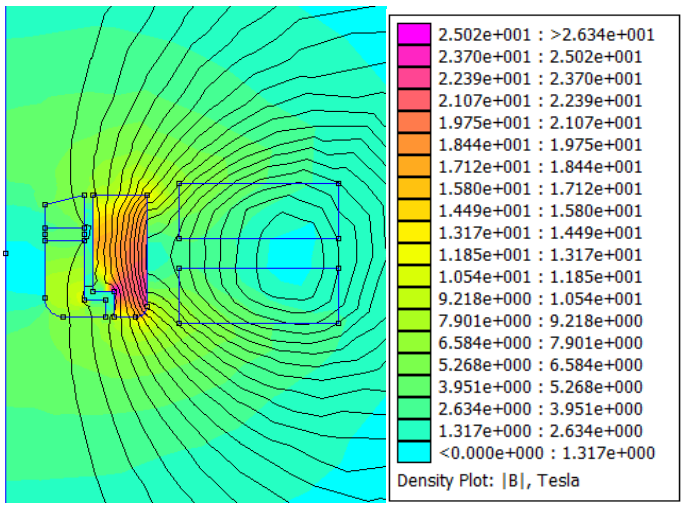
Фиг.8. Картина на магнитната индукция в трапецовиден индуктор с канали и с магнитна система



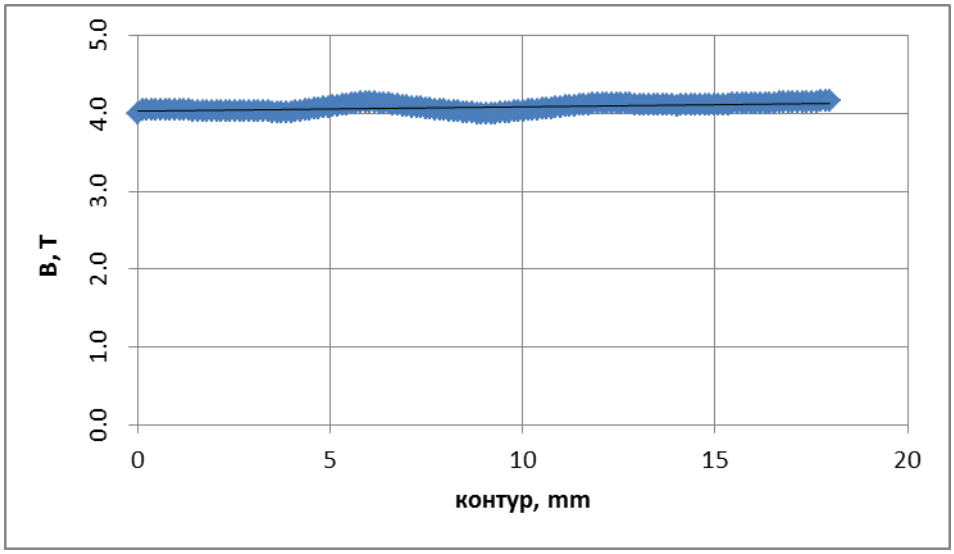
Фиг.9. Разпределение на магнитната индукция по характерния контур външен – вътрешен диаметър на постоянния магнит разположен в трапецовиден индуктор с канали и с магнитна система



Фиг.10. Магнитна индукция в Хелмхолцов индуктор

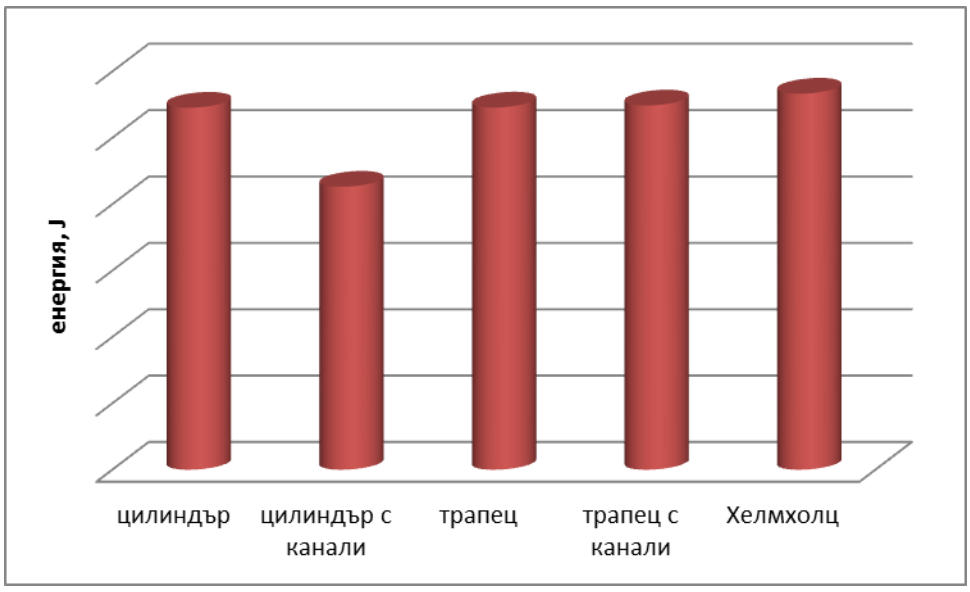


Фиг.11. Магнитна индукция в Хелмхолцов индуктор с магнитна система



Фиг.1.2 Разпределение на магнитната индукция по характерния контур външен – вътрешен диаметър на постоянния магнит разположен в Хелмхолцов индуктор с магнитна система

Разпределението на магнитната енергия на системите за намагнитване на всички индуктори е показано на фиг.13.



Фиг.13. Разпределение на магнитната енергия W_m на системата за намагнитване за всички изследвани индуктори

3. Заключение

Получените модели на разпределение на магнитната индукция с помощта на програмния продукт FEMM показват, че наличието на магнитна система променя значително разпределението на магнитното поле.

Магнитната енергия на системата за всички изследвани случаи е достатъчна за преодоляване на вихровитетокове и за намагнитване на редкоземния магнит.

Разпределението на магнитната индукция по изследвания контур в редкоземния магнит е равномерно ($\Delta B = 0{,}2T$).

Всички изследвани варианти на индуктори са приложими за намагнитване на магнитни системи с редкоземни магнити, но при серийно производство трябва да се използват индуктори с канали.

Литература

[1] Steingroever, E., G. Ross, Magnet – physic,Köln, 1997
[2] Матраков. Б., Д. Русев, Ж. Костов, Техника на магнитните измервания. Техника, София, 1985
[3] Брандиски, К., И. Ячева, CAD системи в електромагнетизма. Сиела, София, 2002

Автори: Костадин Миланов, инж. асистент, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *k.milanow@abv.bg*; Райна Ценева, проф. д-р инж., катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *tzeneva@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент**: доц. д-р К. Хинов

МОДЕЛИРАНЕ НА АВТОНОМНА ФОТОВОЛТАИЧНА СИСТЕМА

Людмил Стоянов

Резюме: *Статията представя моделирането на променливотокова автономна фотоволтаична система, използваща батерия. Описани са моделите на елементите на системата и са реализирани в средата на Matlab/Simulink. Направени са симулации, илюстриращи правилната работа, както на системата батерия-регулатор, така и на пълната автономна фотоволтаична система.*

Ключови думи: *автономна фотоволтаична система, моделиране в средата на Matlab/Simulink*

AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC SYSTEM MODELING

Ludmil Stoyanov

Abstract: *The paper deals with the modeling of autonomous alternative current photovoltaic system with battery. The models of all system elements are described and realized in the Matlab/Simulink environment. The realized simulation illustrates the correct operation of the system battery-controller, as of the full autonomous photovoltaic system*

Keywords: *autonomous photovoltaic system, modeling in the Matlab/Simulink environment*

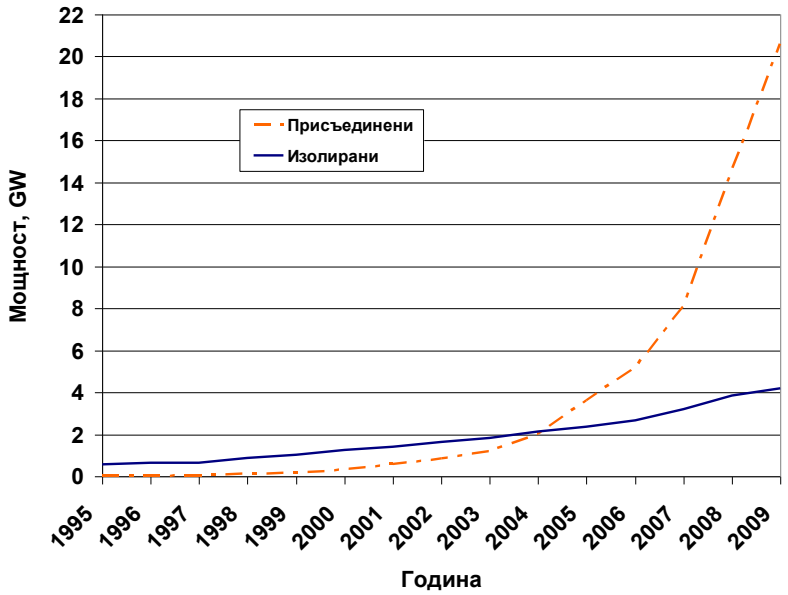
1. Въведение

Преобразуването на слънчевата радиация в електричество е сред най-често използваните трансформации на възобновяемите източници на енергия. Инсталираните мощности от фотоволтаични модули (ФМ) растат ежегодно (фиг.1) [1]. От фиг.1 се вижда, че изградените изолирани или автономни фотоволтаични системи (АФС) са повече от присъединените към електрическата мрежа в световен мащаб до 2004г. Ето защо изследването на този тип системи представлява интерес.

В статията са представени различните типове автономни системи, които се срещат в практиката. От тях е подбрана променливотокова система, използваща батерия. Реализирани са модели в Matlab/Simulink на елементите на системата. Тяхната правилна работа е проверена поотделно и впоследствие е направена симулация на работата на автономна фотоволтаична система при реални метеорологични условия за 9 дни.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829



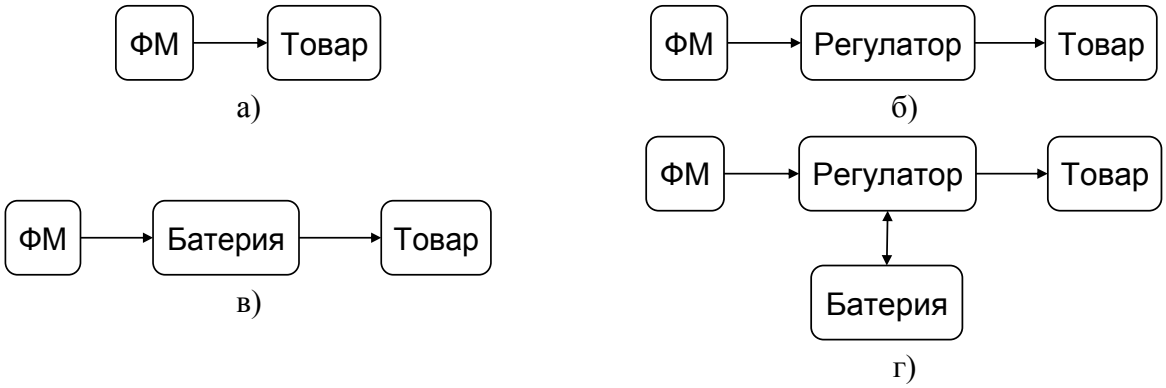
Фиг.1. Изменение на инсталираните мощности на изолирани и присъединени към мрежата фотоволтаични системи в периода 1995-2009г.

2. Видове автономни фотоволтаични структури [2]

Основен критерий за класификация на изолираните фотоволтаични системи е видът на изходното напрежение. Различават се следните основни групи:

- Постояннотокови системи;
- Променливотокови системи;
- Смесени системи;

Постояннотоковите фотоволтаични системи (ПФС) захранват товари, изискващи постоянно напрежение. Различни структури на този тип системи са показани на фиг.2, където фотоволтаичният генератор е означен с ФМ.



Фиг.2. Видове постояннотокови автономни фотоволтаични системи.

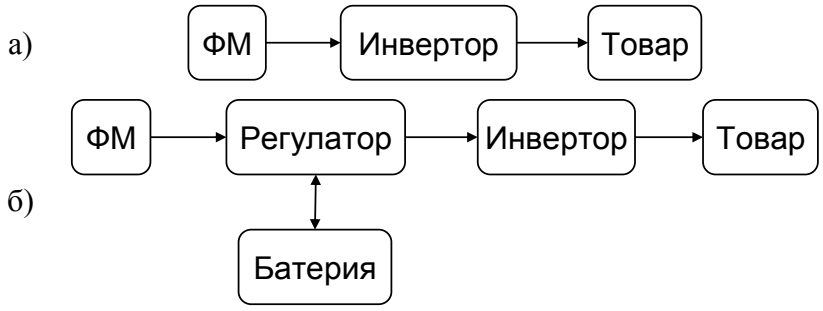
Първият вид ПФС е директната система (фиг.2.а). При нея фотоволтаичните модули са директно свързани с постояннотоковия товар, който трябва да е адаптиран за спецификата на панелите като източник на електричество, а именно работа в светлата част на денонощието и липса на гарантирано по големина напрежение.

Фиг.2.б илюстрира структурата на система с регулатор, който поддържа напрежението на товара постоянно. По този начин се преодолява един от недостатъците на директните фотоволтаични системи.

Включването на акумулаторна батерия между модулите и товара образува саморегулираща се система (фиг.2.в). Тя може да работи и през нощта, но не осигурява постоянно напрежение, а неговата стойност зависи от степента на зареждане на батерията.

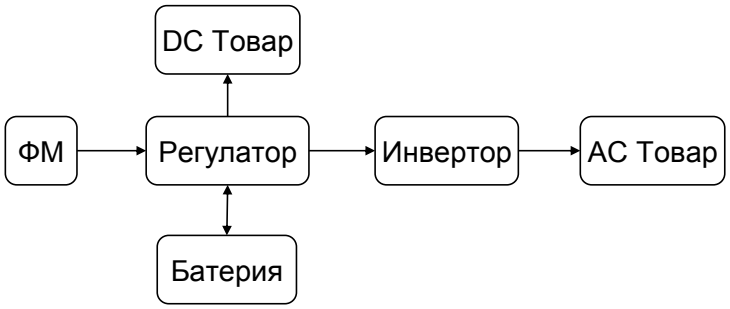
Фотоволтаична система с регулиране на напрежението е показана на фиг.2.г. Тя съдържа батерия и регулатор, чиято функция е да поддържа постоянно по стойност напрежение. Тази система може да работи през нощта.

Променливотоковите автономни системи (ПрФС) захранват променливотокови консуматори чрез инвертор. Видовете схеми са обобщени на фиг.3. Директната структура се състои от фотоволтаични модули, инвертор и товар (фиг.3.а). Недостатъците на тази система са същите като при директната постояннотокова система, тъй като липсват регулатор и акумулатор. Поради тази причина е възможно инверторът да няма достатъчно входно напрежение, за да осигури нормално захранване на товара. Тези недостатъци са преодолени с променливотоковата система, използваща батерия, която посредством регулатор поддържа постоянна стойността на входното напрежение на инвертора, осигурявайки нормалната му работа дори през нощта.



Фиг.3. Структури на променливотокови фотоволтаични системи.

Когато автономната система захранва консуматори на постоянно и променливо напрежение едновременно се използват *смесени фотоволтаични системи* (фиг.4).



Фиг.4. Структура на смесена фотоволтаична система.

3. Моделиране на автономна фотоволтаична система

От разгледаните три групи фотоволтаични системи е избрана да се моделира променливотокова система, използваща батерия (фиг.3.б). Реализираните модели на отделните елементи на системата са представени по-долу.

Моделът на ***фотоволтаичен модул*** се основава на еднодиодна заместваща схема с последователно и паралелно съпротивление. Той е описан подробно в [3] и затова тук е показано само моделиращото уравнение (1), което изразява изходния ток на модула I_M, а входната променлива е напрежението на изводите на панела V_M.

$$I_M = I_{M,SC} \cdot \left\{ 1 - \exp\left[\frac{V_M - V_{M,OC} + I_M \cdot \left(R_S + R_{S,CC} \right)}{V_{M,T}} \right] \right\} - \frac{V_M + I_M R_S}{R_{sh}}, \quad (1)$$

където $I_{M,SC}$ е токът на късо съединение на модула, $V_{M,OC}$ – напрежението на отворена верига на ФМ, R_S - последователното съпротивление на модула, $R_{S,CC}$ – последователното съпротивление, дължащо се на свързващите проводници, $V_{M,T}$ – термичното напрежение на панела, R_{sh} – паралелното съпротивление на фотоволтаичния модул.

Въз основа на сравнителен анализ на различни модели на ***акумулаторни батерии*** [4] е избран кинетичен модел (KiBaM) [5]. Той се състои от два подмодела: капацитивен и напрежителен, описващи различните процеси в батерията. Капацитивният модел представя акумулатора като два резервоара с капацитети q_1 и q_2. Първият от тях съответства на достъпния за товара в момента капацитет на батерията, а вторият на резервния капацитет на батерията. Сумата на двата капацитета е единица. Делът на резервоара с наличния капацитет c зависи от типа на батерията. Възможността за преминаване на заряд от резерва към наличния капацитет се определя от проводимостта k, която също зависи от параметрите на батерията. Двата капацитета се намират чрез следните диференциални уравнения:

$$\begin{cases} \frac{dq_1}{dt} = -I - k(1-c)q_1 + kcq_2 \\ \frac{dq_2}{dt} = k(1-c)q_1 - kcq_2 \end{cases}, \quad (2)$$

където I е токът през батерията.

След намирането на двата капацитета q_1 и q_2 може да се определи отдаденият от батерията капацитет q_{out}:

$$q_{out} = q_{\max} - q_1 - q_2, \quad (3)$$

където q_{max} е максималният капацитет на напълно заредената батерия, който се дава от производителя.

Вторият подмодел е напрежителният модел. Той определя вътрешното напрежение на батерията посредством израза:

$$E = E_0 + AX + \frac{CX}{D - X}, \quad (4)$$

където E_0 е вътрешното напрежение на напълно заредената батерия, A, C и D – константи, зависещи от вида на батерията, X – нормализираният капацитет, отдаден от батерията при даден разряден ток, определен чрез:

$$X = \frac{q_{out}}{q_{\max}(I)} q_{\max}, \quad (5)$$

където $q_{\max}(I)$ е максималният капацитет на батерията при даден разряден ток.
Изходното напрежение на батерията се определя като от вътрешното напрежение се извади падът на напрежение във вътрешното съпротивление на батерията R_0:

$$U_{bat} = E - IR_0 . \tag{6}$$

Инверторът е елементът, осъществяващ връзката с променливотоковия товар. Тъй като целта на моделирането е да се изследват дълги периоди от време, е подбран осреднен модел на еднофазен инвертор [6], който определя входния ток на инвертора I_{dc} въз основа на неговия коефициент на полезно действие η:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{U_{ac} I_{ac} \cos\varphi}{U_{dc} I_{dc}} \Rightarrow I_{dc} = \frac{V_{ac} I_{ac} \cos\varphi}{V_{dc} \eta} , \tag{7}$$

където P_{out} е изходящата мощност на инвертора, P_{in} – входящата мощност на инвертора, U_{ac} – променливото изходно напрежение на преобразувателя, I_{ac} – токът от променливотоковата страна, U_{dc} – входното напрежение на инвертора.
Захранваният от автономната фотоволтаична система ***товар*** рядко е с голяма мощност. Ето защо е моделиран еднофазен активен товар. Моделът определя консумирания променлив ток:

$$I_{ac} = \frac{U_{ac}}{R_{load}} , \tag{8}$$

където R_{load} е активното съпротивление на товара, зависещо от неговата мощност P_{load}:

$$R_{load} = \frac{U_{ac}^2}{P_{load}} . \tag{9}$$

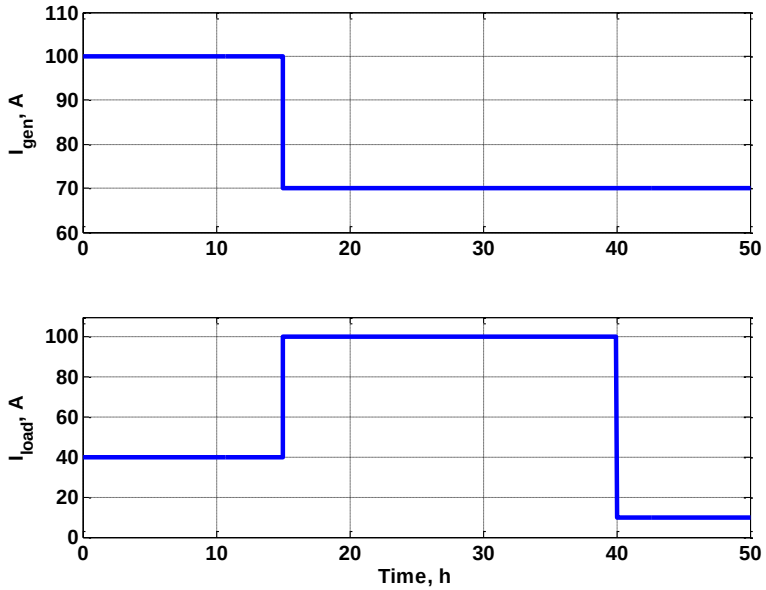
Последният елемент от фотоволтаичната система е ***регулаторът***. Той предпазва батерията от презаряд и преразряд, следейки напрежението на нейните изводи. Ако напрежението достигне определена стойност $U_{max,off}$ и токът на товара е по-малък от тока на фотоволтаичните модули, регулаторът изключва панелите. По този начин консумацията се поема от батерията и нейното напрежение намалява. Когато то достигне стойност $U_{max,on}$, фотоволтаичните модули отново се включват. Ако консумацията е по-малка от произведената от ФМ мощност, батерията ще се зарежда, а в обратния случай ще участва в захранването на товара. Гореописаните действия показват алгоритъма за предпазване на батерията от презаряд. Ако батерията участва в покриването на консумацията на товара, нейното напрежение ще намалява. Това намаление трябва да се управлява, за да се предпази батерията от преразряд. Използва се следният алгоритъм. Ако напрежението достигне стойност $U_{min,off}$ и консумацията е по-голяма от произведената от панелите енергия, регулаторът изключва товара, за да може панелите да заредят батерията и да повишат нейното напрежение. Товарът е изключен докато напрежението достигне стойност $U_{min,on}$. Действията на регулатора са обобщени в табл.1.

Табл.1. Действия на регулатора във фотоволтаичната система

	Условие	**Действие**
(1)	Ако U>$U_{max,off}$ и I_{ac}<I_M	Изключване на ФМ от системата
(2)	Ако U<$U_{max,on}$	Включване на ФМ към системата
(3)	Ако U<$U_{min,off}$ и I_{ac}>I_M	Изключване на товара от системата
(4)	Ако U>$U_{min,on}$	Включване на товара към системата

4. Симулационни резултати

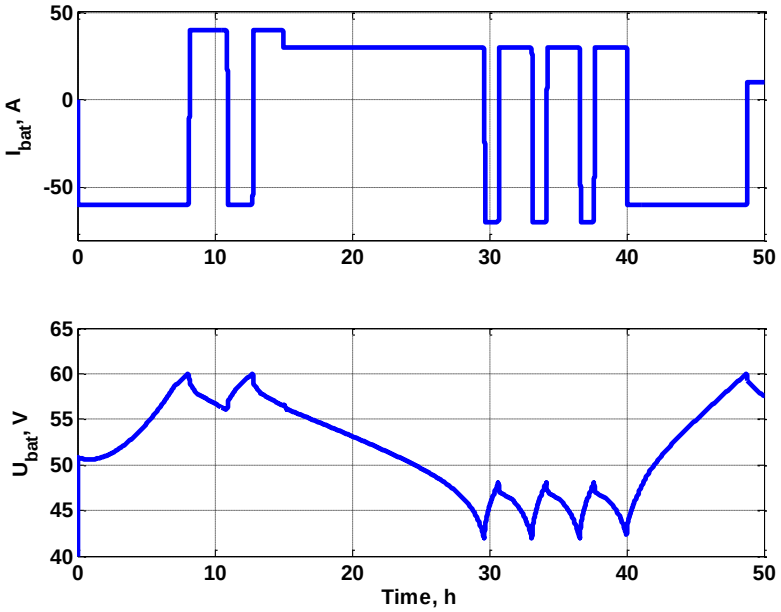
Гореописаните модели са реализирани в средата на Matlab/Simulink. Коректната работа на батерията и регулатора е необходимо да бъде проверена, тъй като моделът на фотоволтаичните модули показва задоволителни резултати в предишни изследвания [7], [8], а моделите на инвертора и товара не могат да предизвикат погрешна работа на системата. Ето защо системата батерия-регулатор е присъединена към произволни генератор и товар. По време на симулацията токовете им се изменят, както е показано на фиг.6.



Фиг.6. Изменение на тока на генератора (I_{gen}) и на товара ($I_{discharge}$).

Вижда се, че в първите 15 часа генераторният ток е по-голям от товарния. След това двата тока се променят и отношението им вече е обратно. Това продължава до четиридесетия час, когато товарният ток намалява и става по-малък от този на генератора. В резултат на това токът и напрежението на батерията се изменят, както е показано на фиг.7. В първите 15 часа батерията се зарежда и нейното напрежение нараства. Когато то достига зададената граница $U_{max,off}$=60V (около осмия час от симулацията), регулаторът изключва генератора, вследствие на което батерията захранва товара и нейният ток променя своя знак, а напрежението й започва да намалява. Този режим на работа на системата продължава до 10,9-ия час, когато напрежението достига границата $U_{max,on}$=56V и регулаторът включва генератора. В този момент токът на генератора е по-голям от товарния и батерията отново започва да се зарежда – токът й сменя своя знак, а напрежението нараства. То достига границата на изключване, при което генера-

торът бива изключен, а товарът се поема от батерията. В петнадесетия час товарът се увеличава, а генераторът започва да произвежда по-малко, вследствие на което част от консумацията се задоволява от батерията. Нейното напрежение намалява до $U_{min,off}$= 42V (29,5-ия час) и регулаторът предпазва батерията от преразряд и изключва товара – токът на батерията става отрицателен (заряден) и нейното напрежение нараства. При достигане на $U_{min,on}$= 48V (30,7-ия час) регулаторът включва товара. Тъй като неговият ток е по-голям от този на генератора отново част от товара се задоволява от батерията и тя се разрежда до достигане на границата за изключване. Този режим на включване и изключване на товара се повтаря общо 4 пъти в периода между 29,5-ия и 40-ия час. При понижаването на товара в 40-ия час токът на генератора става по-голям от товарния и батерията се зарежда. В края на симулацията отново се наблюдава изключване на генератора, тъй като напрежението на батерията е достигнало 60V.

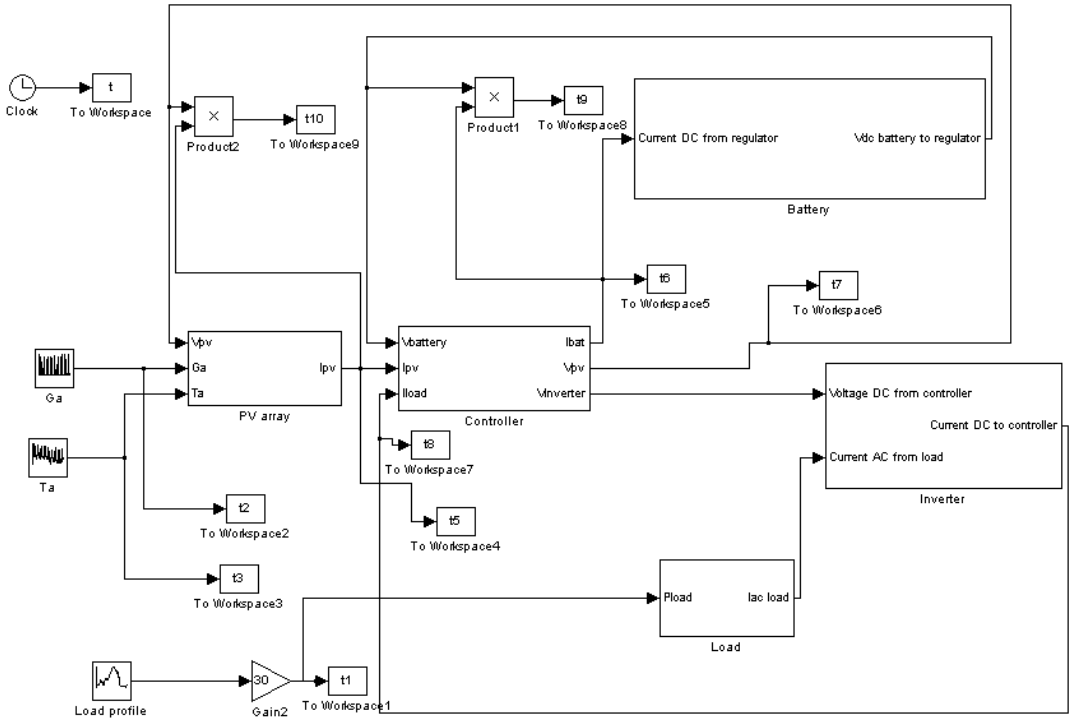


Фиг.7. Измениние на тока (I_{bat}) и на напрежението (U_{bat}) на батерията.

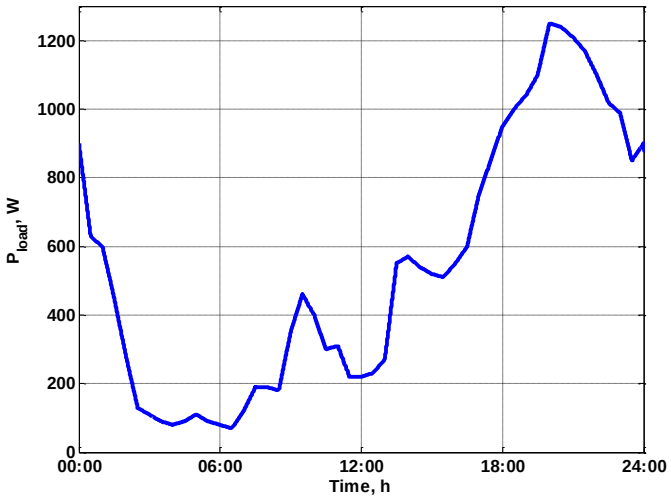
Резултатите от тази симулация показват правилната работа на системата батерия-регулатор. Така може да се състави моделът на цялата автономна фотоволтаична система. Този модел е представен на фиг.8. Използвани са данни за фотоволтаични модули Photowatt PWX500 и батерии Sonnenshein A512/220A. Избраният брой на фотоволтаичните панели е 80, които са свързани в 20 низа от по 4 модула. Общата мощност на фотоволтаичния генератор е 3,8kW. Батериите са четири, свързани са последователно за получаването на 48V номинално напрежение. Всяка от акумулаторните батерии е с капацитет 220Ah и максимален ток 770A. Регулаторът има същите граници на включване и изключване, използвани при проверката на работата на системата батерия-регулатор. Инверторът поддържа променливо еднофазно напрежение 230V. Избран е товаров график, като минималната мощност е 70W, а максималната 1250W (фиг.9) [9].

Симулирана е работата на системата при реални метеорологични условия за период от 9 дни (4 ясни и 5 с променлива облачност). За старт на симулацията е избран 7:30 часа на първия ден, а за край – 18 часа на 9-я ден. Тези часове съответс-

тват съответно на изгрева на първия ден и на залеза на деветия. Товаровият график се повтаря всеки ден. Изменението на слънчевата радиация G_a, температурата на околната среда T_a и мощността на товара P_{load} са показани на фиг.10.

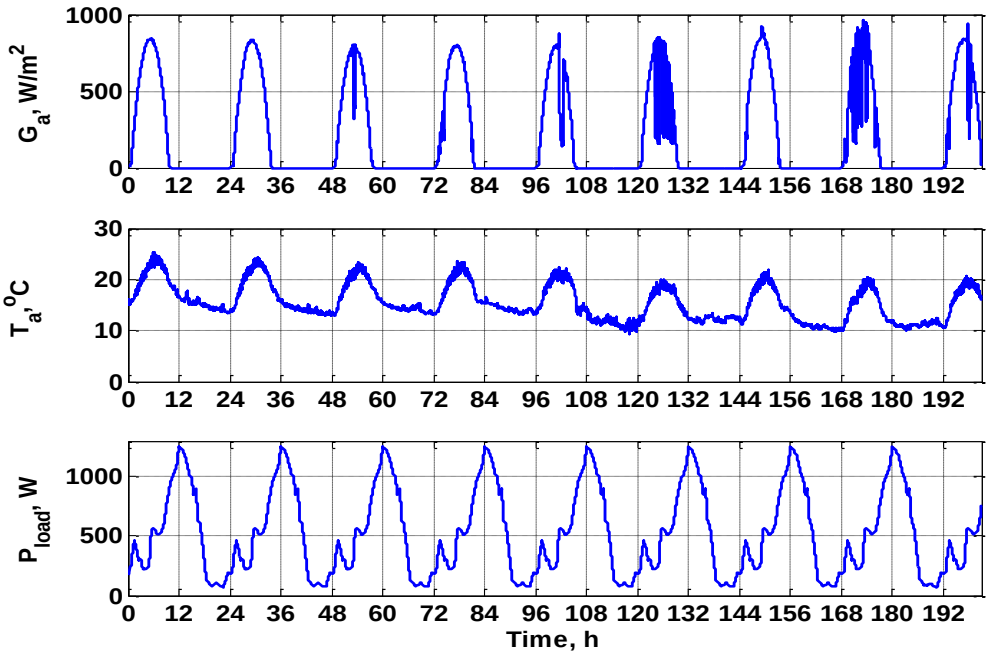


Фиг.8. Модел на автономна фотоволтаична система в Matlab/Simulink.

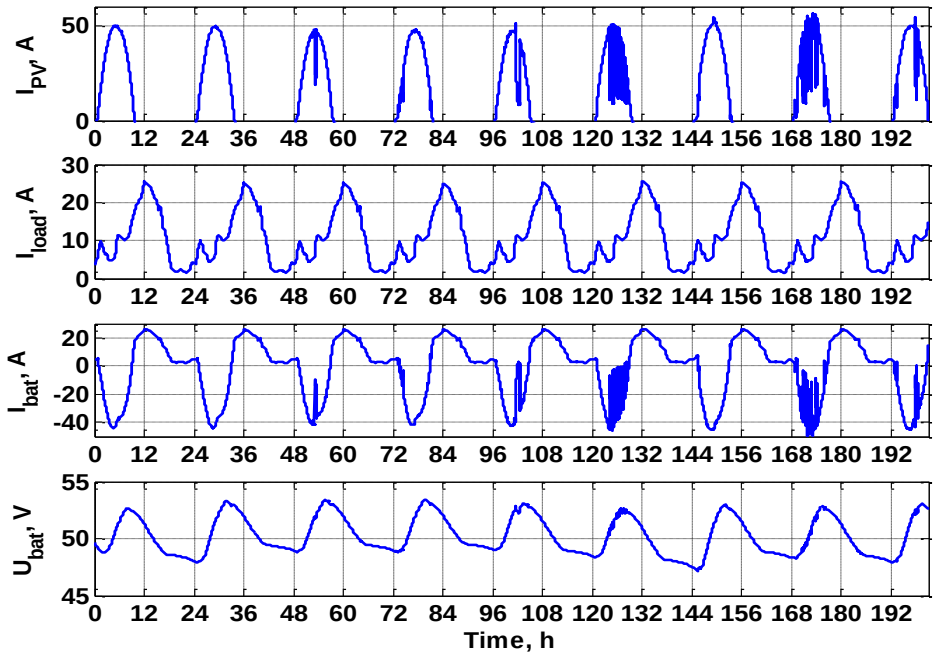


Фиг.9. Товаров график за 24 часа.

На фиг.11 е илюстрирано изменението на тока на фотоволтаичния генератор I_{PV}, на товара I_{load} и на батерията I_{bat}, както и напрежението на батерията U_{bat}. Първият от тях следва изменението на слънчевата радиация, а вторият – на товаровия график. Токът на батерията е разликата между двата и има отрицателни стойности (зарежда батерията) при $I_{PV}>I_{load}$ и положителни при $I_{PV}<I_{load}$, когато батерията участва в захранването на товара. Напрежението на батерията се изменя според режима на работа, като стойността му се колебае около 50V. От четвъртата подфигура може да се заключи, че системата не влиза в гранични режими и няма изключвания нито на генератора, нито на товара.



Фиг.10. Изменение на слънчевата радиация G_a, температурата на околната среда T_a и мощността на товара P_{load}.



Фиг.11 Изменение на тока на фотоволтаичния генератор I_{PV}, на товара I_{load} и на батерията I_{bat} и напрежението на батерията U_{bat}.

10. Заключение

Статията представя моделирането на автономна фотоволтаична система. Нейната структура е подбрана след преглед на различните видове схеми. Избраната система е променливотокова, използваща батерия. Представени са моделите на елементите на фотоволтаичната система в Matlab/Simulink: еднодиоден модел на фотоволтаичен модул, кинетичен модел на батерия, модел на регулатор, осреднен модел на еднофазен инвертор с постоянно по големина изходящо напрежение, модел на активен товар. Изследвана е работата на системата батерия-регулатор

при изкуствено зададен режим с цел проверка на правилната работа на тези два модела. Резултатите показват сработване на защитите от презареждане и преразреждане в случаите, когато това е необходимо. Това позволява използването на моделите в симулирането на автономна фотоволтаична система. Реализирана е симулация на работата за период от девет дни на система от 80 панела, 4 батерии и променливотоков товар с определен товаров график. Получените симулационни резултати показват качествено и количествено правилната работа на модела на променливотоковата фотоволтаична система. Стойностите на напрежението на батерията показват, че в този случай тя не навлиза в гранични режими и за периода на симулацията не се налага изключване на фотоволтаичния генератор или на товара.

Благодарности

Авторът благодари на Национален фонд "Научни изследвания" за финансовата подкрепа по договор ДУНК 01/3 "Университетски научно-изследователски комплекс"

Литература

[1] REN21 (2010), ***Renewables 2010 Global Status Report*****,** Renewable Energy Po-licy Network for 21 Century, 2010

[2] Младенчева Р. (2009), ***Фотоволтаични електористеми***, Ековат Технологии, 2009

[3] Lazarov V., Zarkov Z., Stoyanov L., Kanchev H. (2013), ***Modeling of photovoltaic panels for MPPT purposes***, Proceedings of the Technical University – Sofia, vol. 63/2013, book 2, pp. 341-350

[4] Jongerden M. R., Haverkort B. R. (2009), ***Which battery model to use?***, Software IET, vol. 3, issue 6, 2009, pp. 445-457

[5] Manwell J.F., McGowan J.G. (1994), ***Extension of the Kinetic Battery Model for Wind/Hybrid Power Systems***, Proceedings of the 5th European Wind Energy Association Conference (EWEC '94), 1994, pp. 284–289

[6] Hansen A.D. (2000), ***Model for a stand-alone PV system***, Risoe repport Riso-R-1219(EN)/SEC-R-12, December 2000

[7] Lazarov V., Zarkov Z., Stoyanov L., Kanchev H., François B. (2013), ***Grid-connected PV system with MPPT control***, Proceedings of the Technical University – Sofia, vol. 63/2013, book 1, pp. 357-366

[8] Lazarov V., Zarkov Z., Stoyanov L., Kanchev H., François B. (2013), ***Grid-connected photovoltaic systems with limited output power control***, Proceedings of the Technical University – Sofia, vol. 63/2013, book 2, pp. 331-340

[9] Lu D. (2010), ***Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré. Application à l'aggrégation de producteurs-consommateurs dans le cadre d'un micro réseau intelligent urbain***, Ph.D. report, Ecole Centrale de Lille, France, 2010

Автори: Людмил Стоянов, гл. ас. д-р гл. ас. д-р катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ludiss@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Владимир Лазаров

ОЦЕНКА НА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА ФАСАДНИ ФОТОВОЛТАИЧНИ ИНСТАЛАЦИИ

Людмил Стоянов, Захари Зарков, Християн Кънчев, Владимир Лазаров

Резюме: *Статията прави оценка на производителността на покривно и фасадно инсталирани фотоволтаични модули. Представен е метод за определяне на първичния потенциал въз основа на данни за слънчевата радиация върху хоризонтална повърхност. С модела на Дюриш е определена произведената от различни фотоволтаични инсталации енергия, като е направено изследване на конкретен случай.*

Ключови думи: *фасадни фотоволтаични инсталации, преобразуване на слънчевата радиация, оценка на производителността*

FACADE PHOTOVOLTAIC INSTALLATION PRODUCTIVITY ESTIMATION

Ludmil Stoyanov, Zahari Zarkov, Hristian Kanchev, Vladimir Lazarov

Abstract: *The paper shows an estimation of the roof and facade integrated photovoltaic panels. A method for determination of the primary potential on the base of horizontal global radiation is presented. The Durisch's model is used to determine the produced energy by different photovoltaic installation with a case study illustration*

Keywords: *facade photovoltaic installations, solar radiation conversion, productivity estimation*

1. Въведение

В световен мащаб се наблюдава ръст на архитектурните проекти на сгради с интегрирани в покривите и фасадите фотоволтаични модули. Целта на тази статия е да се провери целесъобразността на това интегриране. Ето защо е представена методика за получаване на слънчевата радиация върху наклонена повърхност и модел тип „вход-изход" за определяне на произведената енергия от панелите. Разгледан е конкретен случай и са анализирани получените резултати.

2. Оценка на първичния потенциал

Фасадните инсталации са специфични, тъй като фотоволтаичните модули са наклонени на ъгъл β спрямо хоризонталната повърхност (най-често β=90º) и освен това рядко са ориентирани на юг. Определянето на слънчевата радиация, попаднала върху повърхността на панелите е затруднено поради наличието само

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

на данни за слънчевата радиация върху хоризонтална повърхност. Слънчевата радиация върху хоризонтална повърхност се състои от две съставки – пряка и разсеяна слънчева радиация, докато върху наклонена повърхност се появява трета съставка, а именно отразената от земната повърхност радиация.

За намиране на първичния потенциал на слънчевата енергия върху наклонена повърхност се използват различни методики. В [1] те са сравнени и е избрана комбинацията от методите на CLIMED2 и на Клучер. С използването и на астрономическите уравнения се получава глобалната слънчева радиация върху наклонена повърхност. Използваният алгоритъм е обяснен по-долу.

Първоначално от наличните данни за хоризонтална слънчева радиация G, чрез метода CLIMED2 [2] се определя разсеяната част f_G на слънчевата радиация върху хоризонтална повърхност, която определя отношението на разсеяната G_d и глобалната слънчева радиация:

$$f_G = \frac{G_d}{G} \tag{1}$$

Тази част зависи от индекса на яснота M_T, който представлява отношението на измерената глобална радиация за хоризонтална повърхност и радиацията извън атмосферата G_{ext}:

$$M_T = \frac{G}{G_{ext}} \tag{2}$$

Според стойността на индекса се използват три различни уравнения, отговарящи на мрачно, средно ясно и ясно време:

$$\begin{cases} f_G = 0{,}995 - 0{,}081 M_T & ако \quad M_T \le 0{,}21 \\ f_G = 0{,}724 + 2{,}738 M_T - 8{,}32 M_T^2 + 4{,}967 M_T^3 & ако \quad 0{,}21 < M_T \le 0{,}76 \\ f_G = 0{,}180 & ако \quad M_T > 0{,}76 \end{cases} \tag{3}$$

След определянето на разсеяната слънчева радиация върху хоризонтална повърхност е възможно намирането на другата съставка - пряката слънчева радиация върху хоризонтална повърхност G_b:

$$G_b = G - G_d \tag{4}$$

Когато съставките на хоризонталната слънчева радиация са известни, е възможно да се определят и съставките на глобалната слънчева радиация върху наклонена повърхност G_β. По метода на Клучер [3] се определя разсеяната съставка $G_{d,\beta}$:

$$G_{d,\beta} = G_d \left[0{,}5\left(1 + \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)\right]\left[1 + F_G \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right]\left[1 + F_G \cos^2(\theta_s)\sin^3(\theta_Z)\right] \tag{5}$$

където $F_G = 1 - f_G^2$, θ_s и θ_Z са съответно ъгъл на падане на слънчевите лъчи и зенитен ъгъл.

Тези два ъгъла се сключват между правата, свързваща наблюдателя със Слънцето, и нормалата съответно на повърхнината на панела и на хоризонталната повърхнина (виж фиг.1).

Отразената съставка на слънчевата радиация $G_{r,\beta}$ се намира от глобалната слън-

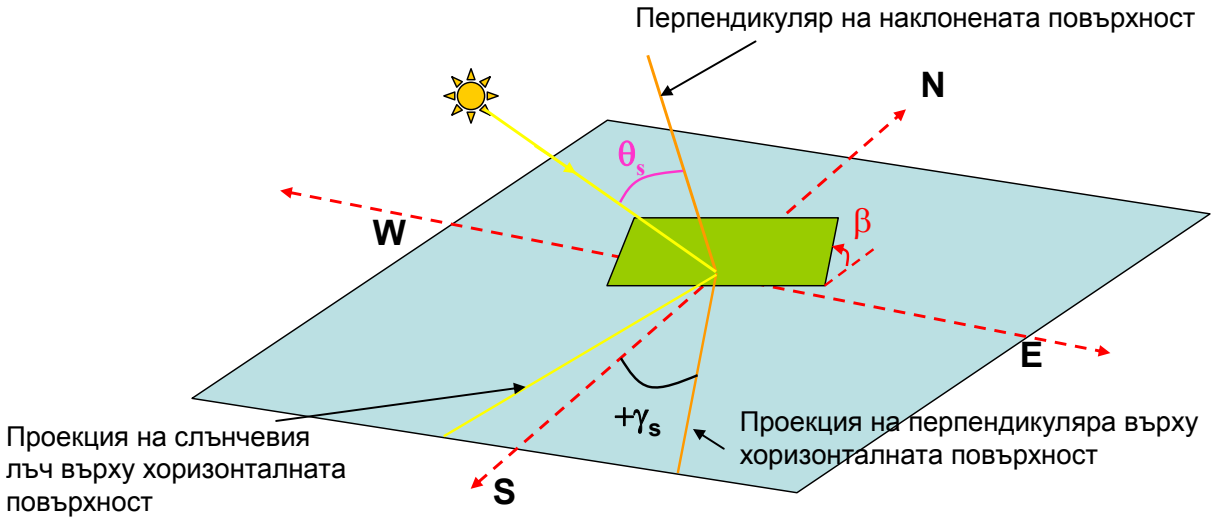
чева радиация чрез коефициента на отражение на повърхността пред повърхнината ρ_g (най-често се приема за равен на 0,2):

$$G_{r,\beta} = \frac{1}{2}\rho_g G(1-\cos\beta) \tag{6}$$

За определянето на пряката слънчева радиация върху наклонената повърхност $G_{b,\beta}$ се използва зависимостта:

$$G_{b,\beta} = G_b \frac{\cos\theta_s}{\cos\theta_Z} \tag{7}$$

Има особености при изчисляването на ъгъла на падане при повърхности, които не са ориентирани точно на юг (фиг.1), какъвто често е случаят при фасадите на сградите. Това налага отчитането на отклонението спрямо посока юг – ъгъл γ_s. Неговите положителни стойности отговарят за отклонение на изток, докато отрицателните са за отклонение на запад.



Фиг.1. Положение на слънцето спрямо произволно ориентирана наклонена повърхност.

Ъгълът на падане се определя по следния начин [4]:

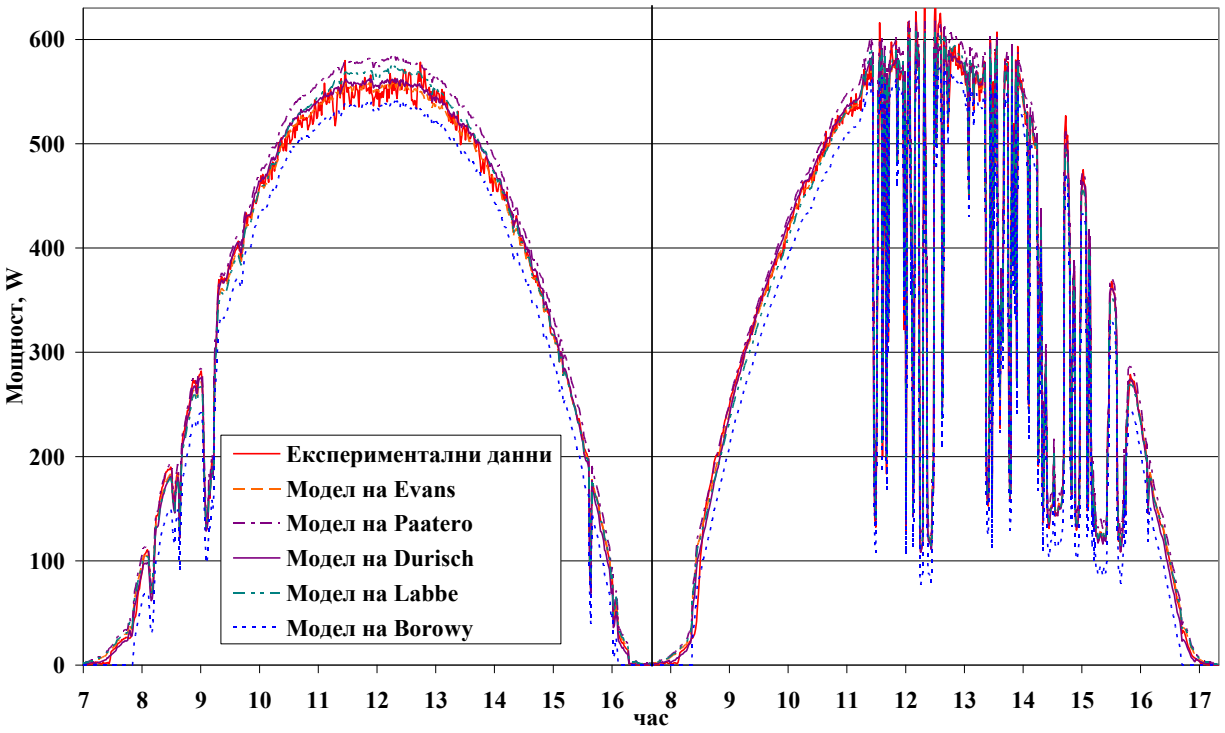
$$\begin{aligned}\cos\theta_s = &(\sin\phi_{site}\cos\beta - \cos\phi_{site}\sin\beta\cos\gamma_s)\sin\delta_{sun} + \cos\delta_{sun}\sin\beta\sin\gamma_s\sin\omega_{sun} + \\ &+(\cos\phi_{site}\cos\beta + \sin\phi_{site}\sin\beta\cos\gamma_s)\cos\delta_{sun}\cos\omega_{sun}\end{aligned} \tag{8}$$

където ϕ_{site} е географската ширина на мястото, δ_{sun} – деклинацията на Слънцето (ъгълът между екваториалната равнина на Земята и правата, свързваща центъра на Земята и Слънцето) в съответния момент от годината.

3. Определяне на производителността на фотоволтаичните панели

За определяне на произведената от фотоволтаичните панели енергия се използват модели тип „вход-изход”. В литературата [5]÷[8] могат да се намерят различни подходи за определяне на енергията. На фиг.2 е показано сравнение на изчислителни резултати, получени чрез различни модели, с експериментални данни за два дни – слънчев и с променлива облачност [9]. Въз основа на това сравнение е избран моделът на Дюриш [7], който показва най-голяма точност

(среднoквадратична грешка по-малка от 5%). Освен това той позволява моделирането на модули от различни технологии.



Фиг.2. Сравнение на модели на фотоволтаични модули
с опитни данни за слънчев и променлив ден.

Избраният модел определя коефициента на полезно действие на модула η_{pv}, отчитайки влиянието на слънчевата радиация, попаднала върху панела, и температурата на клетките в него T_{cell}:

$$\eta_{pv} = p_{Dur}\left[q_{Dur}\frac{G_\beta}{G_{\beta,ref}} + \left(\frac{G_\beta}{G_{\beta,ref}}\right)^{m_{Dur}}\right] \times \left[1 + r_{Dur}\frac{T_{cell}}{T_{cell,ref}} + s_{Dur}\frac{AM}{AM_0} + \left(\frac{AM}{AM_0}\right)^{u_{Dur}}\right] \qquad (9)$$

където $G_{\beta,ref} = 1000\text{W/m}^2$ и $T_{cell,ref} = 25^\circ\text{C}$ са съответно слънчевата радиация и температурата на клетката при стандартни тестови условия; AM – относителната маса на въздуха, определена по (10) 0, която при стандартни условия се приема AM_0=1,5; p_{Dur}, q_{Dur}, m_{Dur}, r_{Dur}, s_{Dur} и u_{Dur} – коефициенти, определени емпирично за даден модел фотоволтаичен модул.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_Z + 0{,}50572(96{,}07995 - \theta_Z)^{-1{,}6364}} \qquad (10)$$

където зенитният ъгъл е в градуси.

Температурата на клетката се определя въз основа на данни за температурата на околната среда T_a и слънчевата радиация чрез формулата на Рос [7]:

$$T_{cell} = T_a + h_R G_\beta \qquad (11)$$

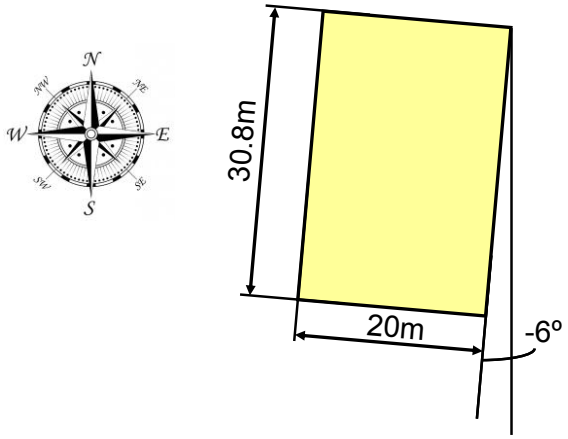
където коефициентът h_R се определя емпирично за различните технологии панели.

Чрез коефициента на полезно действие, изчислен по (9) и данните за слънчевата радиация върху повърхността на модулите, изчислена с методиката, изложена в

т.2, се определя произведената електрическа енергия.

4. Оценка на производителността в конкретен случай

За да се оцени производителността на фасадни фотоволтаични инсталации в България, е избрана сграда на Технически университет - София - учебен корпус 8 (с географски координати: N 42,65º; E 23,35º). Примерните размери на сградата и нейната ориентация са показани на фиг.3. Блок 8 има отклонение спрямо юг -6º. Югоизточната и северозападната му фасади имат прозорци по цялата дължина на етажа, докато югозападната фасада има прозорци само по средата.



Фиг.3. Размери и ориентация на изследваната сграда.

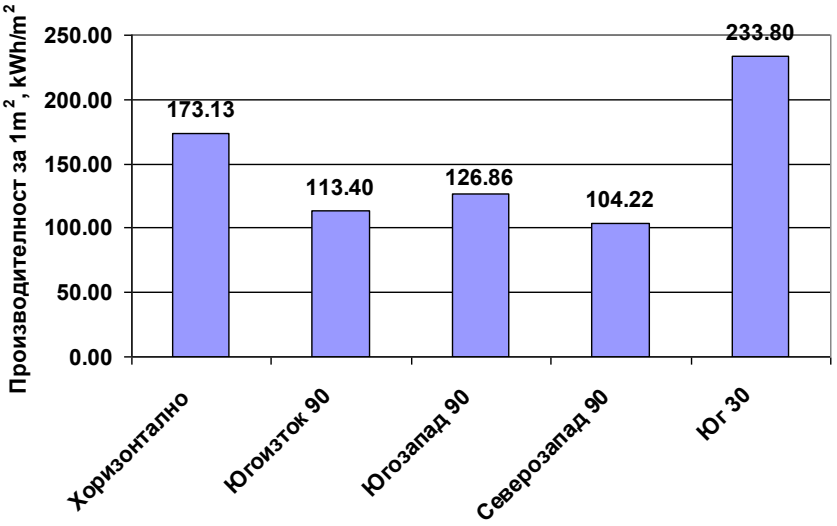
Направени са две изследвания. В първото от тях е изчислена производителността на $1m^2$ инсталирани модули от монокристален силиций по всяка от фасадите, както и хоризонтално на покрива и модули на покрива, ориентирани на юг с наклон от 30º (този наклон дава най-добра производителност на модулите [9]). При второто изследване е разгледана възможността за инсталиране на различен брой етажи от сградата с модули и произведената енергия се сравнява с произведената от покривно инсталираните модули – хоризонтални или наклонени на 30º.

И при двете изследвания се използват метеорологични данни за слънчевата радиация върху хоризонтална повърхност и температурата на околната среда със стъпка един час, съответстващи на мястото на инсталиране. Данните за слънчевото лъчение са преобразувани, за да се получат необходимите данни за наклонената радиация, като се държи сметка за отклонението на всяка от фасадите спрямо юг. При това преобразуване е направена хипотезата, че радиацията се отразява от земната повърхност анизотропно, тоест равномерно във всички посоки.

Друга хипотеза е пренебрегването на засенчването върху инсталираните модули, независимо от неговия характер – околни сгради и препятствия, попаднала мръсотия и др., тъй като влиянието на частичното засенчване е трудно оценимо.

Резултатите от първото изследване са показани на фиг.4. Тя илюстрира произведената енергия за $1m^2$ за една година от всяка от инсталациите. Модулите, ориентирани на юг и с наклон от 30º, имат голямо превъзходство пред останалите възможности, като произведената енергия е повече от два пъти по-голяма спрямо тази при фасадните инсталации на югоизточната и северозападната стена и с 35% по-голяма от производителността на хоризонтално разположените

модули. Югозападната фасада е с много малко отклонение спрямо юг и разликата в произведените енергии се дължи основно на наклона на модулите.



Фиг.4. Производителност за $1m^2$ инсталирани модули по трите фасади и на покрива (хоризонтално и с наклон 30º).

Резултатите показват, че вертикалното разположение на панелите намалява значително тяхната производителност спрямо оптималната, ето защо при интегриране на фотоволтаични модули в сгради е по-подходящо това да се извършва на етап проектиране, за да може площите, заемани от панели, да бъдат с наклон помалък от 90º и ориентирани на юг. Освен това трябва да се отбележи, че хоризонтално разположените модули имат по-голяма производителност спрямо вертикалните, но практически това разположение на панелите ги прави по-уязвими от замърсявания, което ще намали произведената енергия.

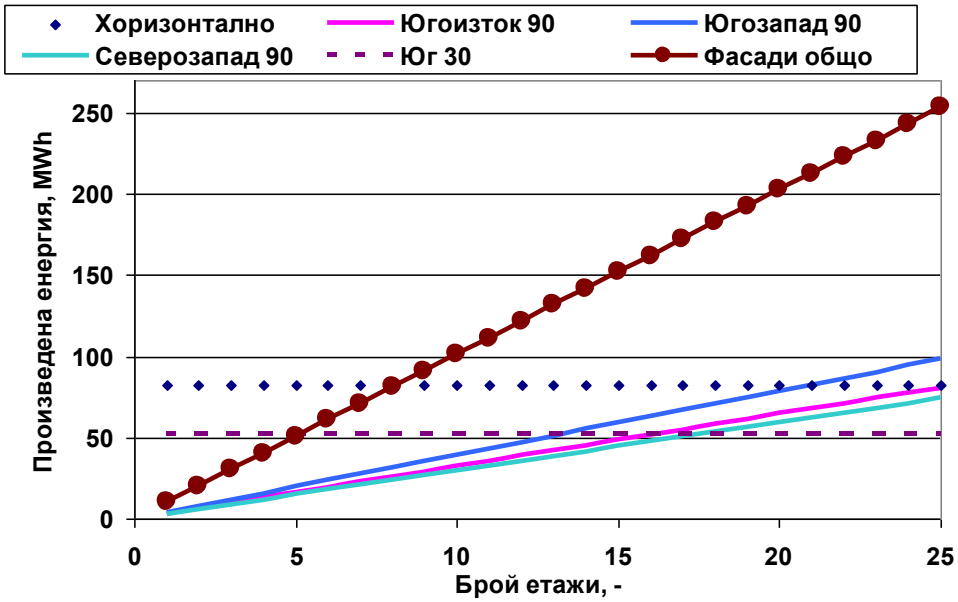
Често срещана причина за използването на фасадни фотоволтаични модули е оползотворяването на площта на сградите. Целта на второто изследване е да се провери броя на етажите с фотоволтаични панели, така че произведената енергия да е съизмерима с оптимално разположените модули на покрива на сградата. За целта е пресметнат годишният добив на енергия от следните инсталации;

- 444 панела, инсталирани на покрива с южно изложение и с наклон 30º;
- 948 панела, инсталирани хоризонтално на покрива;
- 57 панела на етаж, инсталирани на югоизточната и северозападната фасада;
- 62 панела на етаж, инсталирани на югозападната фасада.

Броят на оптимално инсталираните модули на покрива отговаря на оптимален компромис между максимална гъстота на монтаж (респективно максимален брой панели) и минимално взаимно засенчване между модулите.

Изчислената произведена енергия на инсталациите при различен брой етажи с монтирани панели е показана на фиг.5. Броят на етажите се променя от 1 до 25, въпреки че сградата е реално с 6 етажа, за да се провери изменението на годишния добив. Резултатите показват, че хоризонтално разположената инсталация произвежда повече енергия от оптимално разположените модули (Юг 30), което

е за сметка на по-голямата инвестиция за закупуване на повече модули, както и по-големия риск от замърсяване. Вертикално разположените инсталации на една фасада изискват над 13-16 етажа, за да достигнат произведената енергия от оптимално разположените модули. При инсталиране на модули по всички фасади са необходими 6 етажа, но и двойно повече модули, за да се получи по-голям годишен добив спрямо модулите на 30º южно разположение .



Фиг.5. Годишен добив на енергия на различните инсталации при изменение на броя на етажите с монтирани модули.

5. Заключение

Статията представя методика за оценка на производителността и произведената енергия на фасадно интегрирани фотоволтаични модули. За целта първо е необходимо определянето на реално получената слънчева радиация от модулите. Представена е методика за нейното получаване въз основа на данни за слънчевата радиация върху хоризонтална повърхност. За определяне на произведената енергия е използван моделът на Дюриш, който показва най-добра точност при сравнение с други модели тип „вход-изход”.

Вертикалното разположение на модулите значително намалява произведената енергия в сравнение с максимално възможната. Намалението е по-малко при хоризонтално монтирани модули, но те могат да се замърсят много по-лесно, което би намалило тяхната производителност.

При интегриране на фотоволтаични панели в сградите не винаги е възможно постигането на оптимално им разположение (наклон и ориентация). Често пъти философията е „малкото енергия е повече от нула”. Този принцип ще става все по-валиден с поевтиняването на модулите, като трябва да се търси и икономическата изгода. Важен извод е, че строителните и архитектурни решения на етап проект (разположение, наклони, покривни и декоративни конструкции и др.) ще трябва да се съобразяват с влиянието им върху производителността на интегрираните модули.

Благодарности

Авторите благодарят на Национален фонд "Научни изследвания" за финансовата подкрепа по договор ДУНК 01/3 "Университетски научно-изследователски комплекс"

Литература

[1] Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P. (2004), ***Calculation on an hourly basis of solar diffuse irradiations from global data for horizontal surfaces in Ajaccio***, Energy Conversion and Management, vol. 45, issue 18-19, 2004, pp. 2849-2866

[2] De Miguel A., Bilbao J., Aguiar R., Kambezidis H., Negro E. (2001), ***Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean belt area***, Solar Energy; vol. 70, issue 2, 2001, pp. 143-153

[3] Klucher TM. (1979), ***Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces***, Solar Energy, vol. 23, issue 2, 1979, pp. 111-114

[4] Iqbal M. (1983), ***An introduction to solar radiation***, Academic Press, Canada, 1983

[5] Evans D.L., Florschuetz L.W. (1977), ***Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration***, Solar Energy, vol. 19, 1977, pp. 255

[6] Paatero J.V., Lund P.D. (2007), ***Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks***, Renewable Energy, vol. 32, 2007, pp. 216-234

[7] Durisch W., Bitnar B., Mayor J.C., Kiess H., Lam K.H., Close J. (2007), ***Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation***, Solar Energy Materials and Solar cells, vol. 91, 2007, pp. 79-84

[8] Labbé J.(2006), ***L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'énergie électrique pour systèmes PV isolés***, Ph-D thesis, Ecole des Mines de Paris, CEP, Sophia-Antipolis, 2006

[9] Notton G., Lazarov V., Stoyanov L. (2010), ***Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations***, Renewable Energy, vol. 35, issue 2, 2010, pp. 541-554.

[10] Kasten F., Young A. T.(1989), ***Revised optical air mass tables and approximation formula***, Applied Optics, vol. 28, 1989, pp. 4735–4738

Автори: Людмил Стоянов, гл. ас. д-р катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ludiss@tu-sofia.bg*; Захари Зарков, доцент д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; Християн Кънчев, инж. маг. докторант на двойно ръководство между Технически университет – София и Ecole Centrale, Лил, Франция, E-mail address: *hkanchev@tu-sofia.bg;* Владимир Лазаров, доцент д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vl_lazarov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Георги Тодоров

ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕЖИМИТЕ НА РАБОТА НА АВТОНОМНА ФОТОВОЛТАИЧНА СИСТЕМА ЗА УЛИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ

М. Йовчев, С. Платиканов

Резюме: *Фотоволтаичното електрозахранване на уличното осветление се развива бързо. На територията на ТУ-Габрово е внедрена комбинирана PV-LED система за улично осветление със система за дистанционно визуализиране на режимите на работа. Извършено е светлотехническо проектиране на осветлението със софтуерен продукт DIALux. Направени са измервания на реализираната осветеност в контролни точки. Изследват се работните процеси за оптимизиране нощния режим на работа на LED осветителя. Представени са данни за натрупаната и отдаваната от акумулатора електрическа енергия.*

Ключови думи: *PV-LED система, осветеност, DIALux, оптимизиране, работни режими, експериментално изследване, електрическа енергия*

STUDY OF OPERATING MODES OF STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR OUTDOOR LIGHTING

M. Yovchev, S. Platikanov

Abstract: *Photovoltaic power supply of the street lighting is developing rapidly during the last years. Stand-alone photovoltaic (PV) system supplying light-emitting diode (LED) outdoor luminaires is constructed in Technical University of Gabrovo. The PV-LED system consists of PV module, accumulator, solar controller, LED lamp and system for remote visualization on operating modes. Working processes for optimization of night operating mode of the LED luminaire are studied. Data for electric energy stored by and consumed for lighting from the accumulator are presented.*

Key words: *PV-LED system, luminance, DIALux, optimization, working modes, experimental studies, electric energy*

1. Въведение

За опазване на околната среда при производство на електрическа енергия и повишаване на енергийната ефективност се внедряват фотоволтаични (PV) модули, навлизат и нови технологии с разработката на светлодиоди (LED) за външно осветление. Предимствата на светлодиодите са: дълъг експлоатационен срок, малки размери и възможност за работа при вибрации, висок светлинен добив, благоприятен индекс на цветопредаване [1, 2].

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

В работата се представят резултати от изчислена с помощта на софтуер и измерена в мрежа от точки осветеност на автопаркинг. Разглеждат се режими на зареждане и разреждане на акумулатор при работа на фотоволтаична система с контролер за управление на улично светлодиодно осветление. С развитието на фотоволтаичните-светлодиодни (PV-LED) системите, възниква необходимостта от усъвършенстване на работните им режими, свързано с проучване и анализ, водещ до подобряване на конкретни технически характеристики на отделните компоненти и оптимизиране на функционалните възможности на произвежданите на пазара соларни контролери.

2. Компоненти на автономната фотоволтаичната-светлодидодна система

На фиг.1 е показано устройството и местоположението на отделните елементи, от които е изградена реализираната PV-LED системата (два броя).

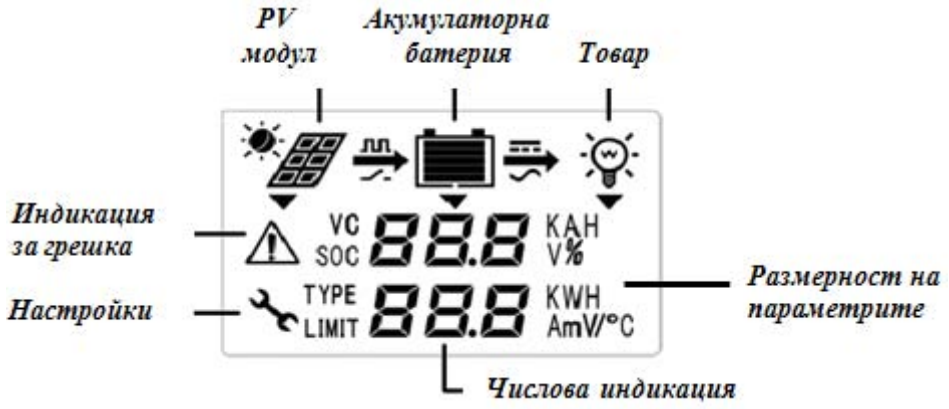
Фиг.1. Устройство на фотоволтаично електрозахранване на светлодиоден уличен осветител

Фотоволтаичният модул, който преобразува дневната светлина в електрическа енергия, е с мощност 80 Wp. Съставен е от 9x4 фотоволтаични клетки, изградени от монокристален силиций.

Акумулаторната батерия, монтирана в металната кутия (фиг.1), е с капацитет 100 Ah и напрежение 12 V. Съхранява електроенергията, произвеждана от PV модула през деня (зарежда се) и я отдава към светлодиодния осветител през тъмната част от денонощието (разрежда се) [3].

Фиг.2. Соларен контролер за управление и дисплей за визуализация

Уличното осветително тяло, монтирано в PV-LED системата е изградено от светлодиодна матрица 4x10 с мощност 18 W и се захранва с постоянно напрежение 12 V, осигурявано от акумулатора.
Управлението на режимите на работа на фотоволтаичната светлодиодна улична система се осъществява със соларен контролер тип MPPT-TRACER 1210 RN (фиг.2). Той се захранва с номинално напрежение 12 V DC и номинален ток 10 A. Максималното входно напрежение (при празен ход на PV модула) е 100 V, а входната мощност към контролера е 130 W. Собствената консумация е ниска – до 10 mA, а обхватът на околната температура е от – 35° C до +55° C. Продължителността на работа на консуматора – уличен LED осветител с мощност 18 W, може да се настройва в диапазон от 1 до 15 часа [6]. Соларният контролер има 8-пинов порт RJ-45 за връзка към LCD дисплей. Контролерът притежава функцията MPPT (Maximum Power Point Tracer), която представлява автоматично проследяване на точката с максимална мощност от волт-амперната (V-A) характеристика на PV модула, което повишава производителността на системата [1, 6].
Информацията за протичащите електрически процеси и за изследване на режимите на работа на PV-LED системата се получава на LCD дисплей MeTer MT-2 (фиг.2), като данните се прехвърлят от соларния контролер по мрежов (LAN) кабел чрез конектор RJ-45. На фиг.3 са показани символите върху дисплея и тяхното значение.

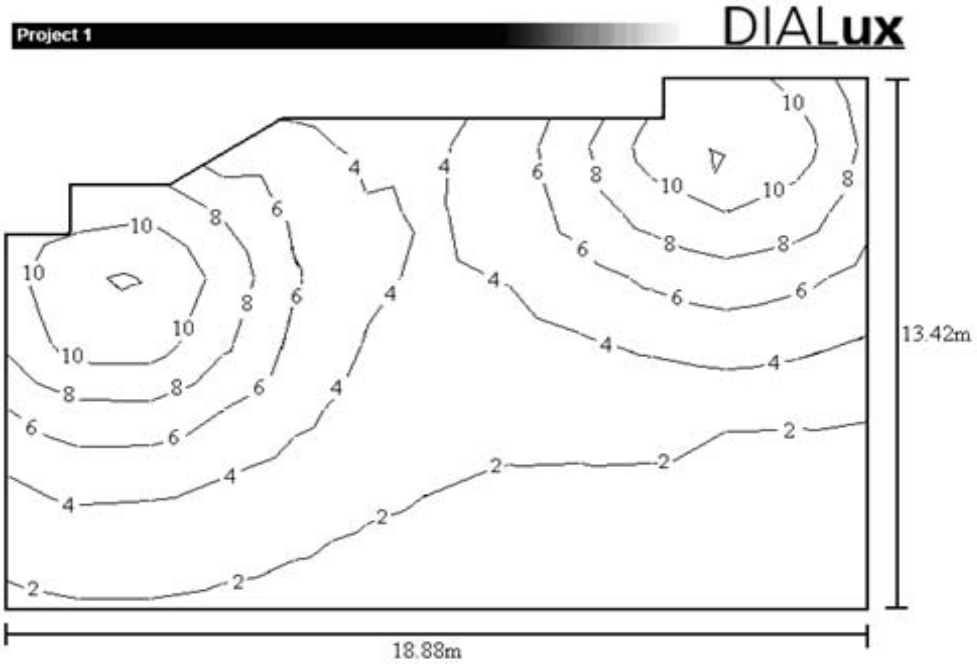


Фиг.3. Значение на символите върху LCD дисплей MeTer MT-2

LCD дисплеят MeTer MT-2 има два светлодиодни индикатора. Когато акумулаторът се зарежда през деня, под надпис Charge свети зелен LED. При поява на грешка, под надпис Error светва червен LED [6].

3. Реализирана осветеност от PV-LED системата

Внедрената автономна PV-LED система осветява автопаркинг пред учебен корпус на ТУ-Габрово. Чрез светлоразпределителните криви на двата LED осветителя (в LDT формат) с помощта на специализирания софтуерен продукт DIALux, се изчислява средната осветеност. На фиг.4 са представени резултати от осветеността във вид на изолинии, като са посочени размерите на осветяваната част на автопаркинга.



Фиг.4. Изолинии на изчислената със софтуер DIALux осветеност

След реализацията на осветлението на паркинга с двата LED осветителя, е измерена получената осветеност в мрежа от точки, през 1,25 m. На фиг.5 са показани измерените стойности на реализираната осветеност върху автопаркинга.

										11	8.2	7.4	5.5	3.9	3.1
					4.5	4.7	4.8	6.3	7.8	10.1	13.3	10.4	8.6	6.2	4.1	2.4
				6.4	5.6	5.6	5.9	7.1	8.4	10.4	11.5	10.5	8.5	5.8	4.2	2.9
10	13.2	11.1	9.2	7.6	5.8	5.1	5.4	5.9	6.5	7.2	9.6	7.6	5.8	4.7	3.2	2.6
11.2	15	12.7	10.3	8.4	6.2	4.8	4.7	4.8	5.3	5.4	5.9	4.9	4.5	3.3	2.6	1.9
12	14.7	13.6	10.9	8.1	6	4.5	4.2	4.1	4.1	3.7	4.4	4.2	3.6	2.9	2.4	1.8
9.0	10.9	9.3	8.2	6.1	4.7	3.4	3.6	3.4	3.2	2.8	2.9	2.7	2.6	2.3	1.8	1.1
6.3	7.9	6.8	6.3	5	4.4	3.2	3.3	2.8	2.7	2.3	2.2	2	1.9	1.6	1	0.8
4.5	5	4.5	4	3.9	3.3	3	2	2.4	2.3	2	1.7	1.5	1.4	1.1	0.6	0.6

10m

20m

Фиг.5. Стойности на измерената осветеност на осветявания от PV-LED системата автопаркинг

Изчислената с DIALux средна осветеност е $E_{ср}$ = 5,6 lx, а изчислената от измерванията – $E_{ср}$ = 5,1 lx. Стойностите удовлетворяват нормативните предписания за осветяване на автопаркинг [4, 5].

4. Експериментални изследвания на режимите на работа. Анализ на резултатите

Особен интерес представляват режимите на зареждане и разреждане на акумулаторната батерия през зимните месеци, когато поради метеорологичните усло-

вия и малката продължителност на светлата част от денонощието, тя не може напълно да се зареди.

В табл.1, посредством LCD дисплей MeTer MT-2, са представени резултати от експериментални измервания при разреждане на акумулатора от момента на включване на уличния LED осветител от контролера във вечерните часове на 08.03.2013 г. В колона 2 от табл.1 са представени отчетените стойности на напрежението на PV модула U_{PV} [V]; в колони от 3 до 6 са показани измерените показатели на разреждащия се акумулатор – напрежение $U_{АБ}$ [V], ток $I_{АБ}$ [V], температура $T_{АБ}$ [^{o}C] и степен на заряд SOC [%]. Напрежението U_{LED} [V] и тока I_{LED} [A] на товара са дадени в колони 7 и 8; капацитетът [Ah] и електрическата енергия [Wh], отдавани от акумулатора и консумирани от LED осветителя са представени в колони 9 и 10. Продължителността на експерименталното отчитане на данни от режима на разреждане е два часа (колона 1).

Табл.1

Разреждане на акумулатор 100 Ah през осветителен товар (LED матрица 18 W/12 VDC) през тъмна част от денонощието. Дата: 08 март 2013 г.									
Час на измерване	Напрежение на PV модул	Напрежение, ток, температура и степен на заряд на акумулатор с капацитет 100 Ah				Напрежение и ток на товара		Капацитет и електроенергия, отдавани от акумулатора през товара	
	U_{PV} [V]	$U_{АБ}$ [V]	$I_{АБ}$ [A]	$T_{АБ}$ [^{o}C]	SOC [%]	U_{LED} [V]	I_{LED} [A]	[Ah]	[Wh]
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
18:50	1,3	12,6	-7,3	18	50	12,6	7,3	0,0	0,0
18:51	1,1	12,6	-8,4	18	48	12,6	8,4	0,2	5,9
18:52	1,0	12,5	-8,9	18	46	12,5	8,9	0,4	8,3
18:53	0,9	12,5	-9,4	19	47	12,5	9,4	0,6	10,3
18:54	0,8	12,5	-9,9	19	46	12,5	9,9	0,7	12,4
18:55	0,8	12,4	-10,3	19	46	12,4	10,3	0,9	14,6
18:56	0,7	12,5	-9,7	19	47	12,5	9,7	1,1	16,7
18:57	0,7	12,4	-9,3	20	47	12,4	9,3	1,2	18,7
18:58	0,7	12,5	-8,7	20	47	12,5	8,7	1,4	20,6
18:59	0,7	12,5	-8,5	20	47	12,5	8,5	1,5	22,4
19:00	0,6	12,5	-8,3	20	48	12,5	8,3	1,6	24,3
19:05	0,6	12,5	-7,6	21	47	12,5	7,6	1,7	32,3
19:10	0,5	12,5	-6,9	21	48	12,5	6,9	3,0	39,5
19:15	0,6	12,5	-6,9	21	50	12,5	6,9	3,3	46,7
19:20	0,5	12,5	-6,7	21	48	12,5	6,7	4,2	53,7

Табл.1. (продължение)

Час на измерване	Напрежение на PV модул	Напрежение, ток, температура и степен на заряд на акумулатор с капацитет 100 Ah				Напрежение и ток на товара		Капацитет и електроенергия, отдавани от акумулатора през товара	
	U_{PV} [V]	$U_{АБ}$ [V]	$I_{АБ}$ [A]	$T_{АБ}$ [°C]	SOC [%]	U_{LED} [V]	I_{LED} [A]	[Ah]	[Wh]
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
19:30	0,5	12,4	-6,7	21	48	12,4	6,7	5,3	67,6
19:40	0,6	12,4	-6,7	21	46	12,4	6,7	5,6	81,5
19:45	0,6	12,4	-6,7	21	46	12,4	6,7	6,1	88,6
19:50	0,6	12,6	-3,6	21	50	12,6	3,6	6,7	95,0
20:00	0,6	12,6	-3,5	20	49	12,6	3,5	7,7	102,6
20:30	0,6	12,5	-3,5	19	46	12,5	3,5	8,9	124,5
20:40	0,6	12,5	-3,5	18	46	12,5	3,5	9,8	131,8

От получените резултати по време на измерване на процесите в PV-LED осветителя чрез дисплей LCD-MeTer, се установява, че от момента на включване на товара в продължение на един час, токът на разреждане на акумулатора (който е равен на тока през товара) е значително висок и променлив по стойност. След 1 час от стартиране на разреждането, същият ток на разреждане се понижава значително и се установява приблизително на 3,5 А.

Подробно са представени резултатите за едночасовия преходен процес, за който токът през товара е много висок. LED осветителя се включва в 18:50 ч. Данните, получавани на дисплея, се отчитат и записват ежеминутно в продължение на 10 минути, през които токът достига своя пик – от 10,3 А в 18:55 ч., след което се понижава (намаляваща експонента) и се установява в границите от 6,7 А до 6,9 А, но продължава да бъде сравнително висок – фиг.6.

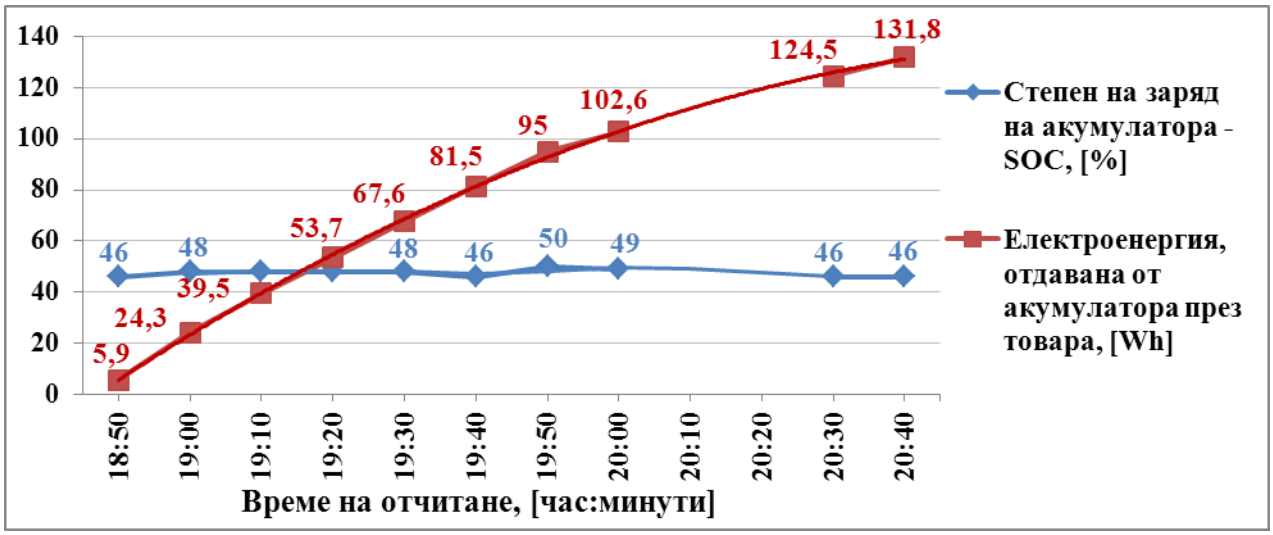
Фиг.6. Изменение на тока $I_{товар}$ през LED осветителя

След един час от момента на включване на товара, стойностите на тока се понижават със скок и се установяват в интервала от 3,2 А до 3,6 А до самия край на работа на товара. Констатира се, че времето на работа е с различна продължителност за различните нощни часове в зависимост от натрупаната електроенергия в акумулатора през деня, т.е. от степента на зареждането му, която от своя страна е в пряка зависимост от слънчевата радиация, имаща относително по-ниски стойности през зимните месеци.

От графичната зависимост на тока през товара $I_{товар}$ във функция от времето (фиг.6) е добавена линия на тренда с подвижна средна стойност за периода на избраната серия от данни. Този период е от началния момент на отчитане – в 18:47 ч., до края на измерването – в 20:40 ч. Причината за добавяне на допълнителна линия на тренда се състои в това, че се използва дългосрочно отчитане на изменението на електрическия ток през осветителя, съчетано с различна честота на получаваните и записвани данни. Стойностите на тока не се отчитат през еднакъв времеви интервал (стъпка) върху абцисната ос. За някои периоди той е приблизително константен и отчитането става на по-големи интервали. За други (през първите 20 минути от включването на LED осветителя), изменението е динамично, отчитането на стойностите трябва да се извършва на близки интервали – получава се неравномерно нанасяне на стойности във времето върху диаграмата. Чрез линията на тренда се наблюдава устойчиво направление в изменението на тока във времето през товара $I_{товар}$ и се постига необходимата прегледност на получаваните резултати.

Изменението на тока във времето през товара е идентично и за останалите вечерни часове от другите дни (опитно е установено), но акумулаторът трябва да бъде достатъчно зареден и соларния контролер да може да „позволи“ включване на товара през тъмната част от денонощието.

На фиг.7 са показани изразходваната електрическа енергия от акумулатора през светлодиодния осветител и изменението на степента на заряд SOC в акумулаторната батерия за период от 110-минутно отчитане на разреждането ù.



Фиг.7. Изменение на степента на заряд SOC в [%] и изразходвана електрическа енергия в [Wh] от акумулатора през LED уличен осветител с мощност 18 W

При отчитане на степента на заряд (SOC в) на акумулаторната батерия и отдаваната от същата и консумирана от осветителното тяло през тъмната част от денонощието електрическа енергия в [Wh], отново е използвана линия на тренда. В периода от 20:00 ч. до 20:30 ч. не са записвани стойности, но е известен устойчивият характер (зададена е подвижна средна стойност) на изменение на двата електрически параметъра. Електрическата енергия, отдавана от акумулатора през осветителя, се изменя по нарастваща експонента. След 19:50 ч. се регистрира намаляваща интензивност на отдаване на електроенергия, което се обяснява със скокообразното понижаване на тока на разреждане (респ. тока на консумация) от този момент нататък (фиг.6).

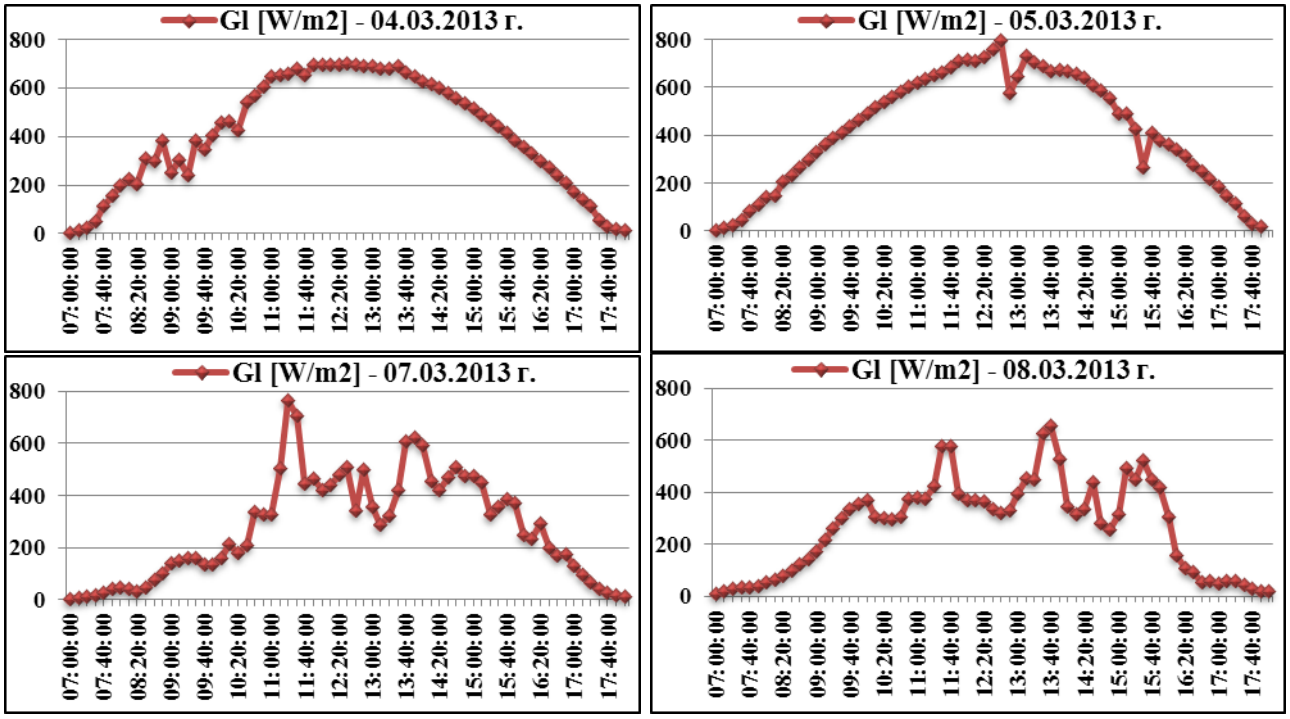
Включването и изключването на светлодиодния осветител се извършва чрез управление по осветеност, т.к. електрическото напрежение на PV модула U_{PV} е пропорционално на околната светлина (интензитета на слънчевата радиация). От експерименталните изследвания се установява, че вечер LED осветителя се включва автоматично, когато напрежението на фотоволтаичния модул се понижи под 1,3 V. Сутрин осветителя се изключва отново автоматично (ако акумулаторът има достатъчен капацитет за да работи лампата цяла нощ) при стойност на напрежението на PV модула: $U_{PV} \approx (1{,}1 \div 1{,}3)$ V (с нарастващ ход, защото интензитета на слънчевата радиация се увеличава).

В табл.2 са представени резултати от измервания на протичащи в акумулаторната батерия (капацитет 100 Ah) зареждане през светлата част от денонощието и разреждане през нощните часове.

Табл.2

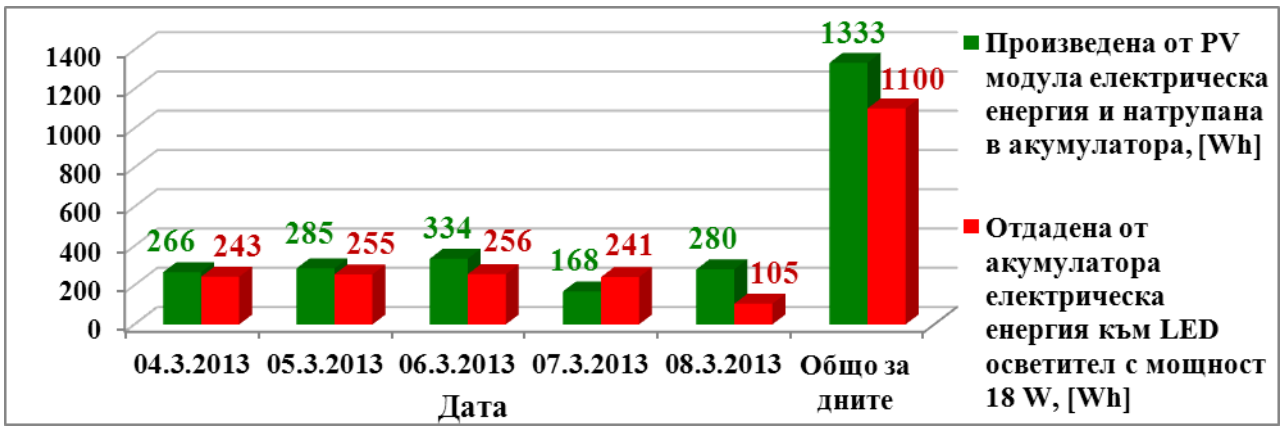
Дата	Режими на работа на PV-LED системата			
	Зареждане на акумулатор 100 Ah в продължение на 9 часа (при наличие на дневна светлина) – от 8 ч. до 17 ч.		Разреждане на акумулатора в продължение на 6 часа (през тъмната част от денонощието) – от 18:45ч. до 00:45ч.	
	Произведена от PV модула електроенергия и натрупана в акумулатора [Wh]	Създаден от PV модула капацитет в акумулатора [Ah]	Отдадена от акумулатора електрическа енергия към LED осветител [Wh]	Отдаден от акумулатора капацитет към LED осветител с мощност 18 W [Ah]
04.03.2013	266	13,7	243*	19,5*
05.03.2013	285	15,3	255	20,4
06.03.2013	334	15,1	256	20,4
07.03.2013	168	14,6	241	19,4
08.03.2013	280	13,5	105*	10,5*
Общо	1,333 kWh	72,2 Ah	1,100 kWh	90,2 Ah
Забележка: Стойностите, отбелязани със знак * показват, че акумулаторът се разрежда в продължение на 5 часа – от 18:45 ч. до 23:50 ч.				

В началото на март LED осветителя работи 50 % от тъмната част на денонощието: от 18:50 ч. до 00:40 ч. – 6 часа, защото акумулаторната батерия не може достатъчно да се зареди.
На фиг.8 е представен дневния ход на изменение на глобалната слънчевата радиация Gl при осреднени 10-минутни стойности за четири дни от месец март (04, 05, 07 и 08 март), през които се изследват работните режими на PV-LED системата. Стойностите на радиацията се получават чрез софтуер за дистанционно отчитане от пиранометър Kipp & Zonen.



Фиг.8. Изменение на глобалната слънчевата радиация

На фиг.9 е показана произвежданата през деня и натрупвана в акумулатора електрическа енергия и същата, отдавана от акумулатора и консумирана през осветителния товар в нощните часове за отделните дни от март, 2013 г. Показани са сумарните стойности на акумулираната и изразходвана електроенергия за разглеждания период.



Фиг.9. Произвеждана от PV модула, отдавана от акумулатора и консумирана през LED товара електрическа енергия

Произвежданата от PV модула електроенергия зависи от метеорологичните условия през деня и продължителността на слънчевото греене (годишния сезон), а стойността на консумираната електроенергия – от степента на заряд в акумулаторната батерия и продължителността на работа на осветителното тяло.

5. Заключение

От изследваните режими на зареждане и разреждане на акумулатора се установява следното. При 5-дневно зареждане на акумулатора общата натрупана електроенергия е 1330 Wh (табл.2 и фиг.9) в началото на март, когато средната стойност на интензитета на слънчевата радиация е 418 W/m^2 за ден при слънчево време (05.03) и 266 W/m^2 при облачно (08.03) – фиг.8.
От провежданите измервания на разреждане на акумулатор през уличен осветител се констатират два момента: при включване на LED осветителя, един час токът на разряд е висок – до 10,3 A (фиг.6) при номинален на товара 1,5 A (18 W/12 V); след 1 час от момента на включване на осветителя, токът се понижава със скок и се установява в (3,2 ÷ 3,6) A до изключване на осветителя.
Консумираната през светлодиодния осветител електроенергия за периода от сутринта на 04.03 до вечерта на 08.03.2013 г. е 1100 Wh (таблица 2 и фиг. 9), като се отчита, че поради недостатъчния капацитет в акумулатора, LED осветителя работи половината от нощните часове.
За подобряване на режимите на работа на PV-LED системата трябва да се избира акумулатор с подходящ капацитет и соларен контролер, с възможност за рационално задаване на нощния режим на работа на осветителното тяло в зависимост от периода на годината.

Литература

[1] Налчаджийски Б., С.Платиканов, ***Внедряване на светлодиодни матрици в осветители за парково и улично осветление***, XIV Национална конференция с международно участие BulLight 2010, Варна, юни 2010.
[2] Платиканов С***., Фотоволтаично електрозахранване на светлодиодно външно осветление***, X Международна научна конференция УНИТЕХ'10 – Габрово, Габрово, 19-20 ноември 2010.
[3] Гишин С***., Акумулатори – избор, поддръжка, тестване и експлоатация***, ТУ-София, 2003.
[4] БДС EN 13201. ***Норми за улично осветление***.
[5] *www.dial.de*, ***DIALux – software for lighting***.
[6] *www.epsolarpv.com*, BEIJING EPSOLAR TECHNOLOGY CO., LTD.

Автори: Милко Йовчев, ас. инж., катедра ЕСЕО, Технически Университет-Габрово, E-mail address:*milkoyovchev1986@gmail.com*; Стойо Платиканов, доц. д-р инж., катедра "Електроснабдяване и електрообзавеждане" (ЕСЕО), ТУ-Габрово, E-mail address:*stoyoplatikanov@gmail.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** гл. ас. д-р Р. Станев

ИНОВАТИВЕН МЕТОД ЗА ДОБИВАНЕ НА ВЪЗОБНОВЯЕМА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Марин Вълков, Иван Петров

Резюме: *Енергийно ефективните генератори за електрическа енергия започват да намират все по-голямо приложение в сферата на енергетика. В Швейцария през 20-ти век е бил изобретен енергийно ефективен генератор за електрическа енергия, не използващ никакви външни източници на енергия, които да го захранват, а напротив това устройство генериращо 230V / 400V напрежение доставя електричество в продължение на повече от 30 (!) години в количества достатъчни за задоволяване на цялата духовната общност Метернита, Линден в Швейцария, включително и намиращите се там производствени работилници. Сумарната мощност на системата осигурява повече от 750kW „чиста" електрическа енергия.*

Ключови думи: *Възобновяема електрическа енергия, електростатичен генератор, „Тестатика"*

INNOVATIVE METHOD FOR GENERATING RENEWABLE ENERGY

Marin Valkov, Ivan Petrov

Abstract: *Energy efficient generators of electricity began to find more and more applications in the field of energy development. In Switzerland in the 20th century was invented energy efficient generator of electricity, which doesn't use any external energy sources to power it up, but rather that device generating 230V / 400V voltage supply electricity for more than 30 (!) years in sufficient to meet the entire Methernitha Christian Alliance, Linden, Switzerland, including its workshops there. The total capacity of the system provides more than 750kW clean energy.*

Keywords: *Renewable energy, electrostatic generator, "Thestatika"*

1. Въведение

Електростатичният генератор е механично устройство, което създава статично електричество или електричество с висок волтаж и малък постоянен ток. За създаването на електростатичен заряд генераторите използват триене или електростатична индукция.

Днес вече не е нужно устройството да е механично и за създаването на заряд устройството може да ползва повишаващ трансформатор и изправяне на изходното напрежение. И в нашия език повече се използва "високо напрежение", вместо „висок волтаж", но това не е грешка - означава същото, както и ако се

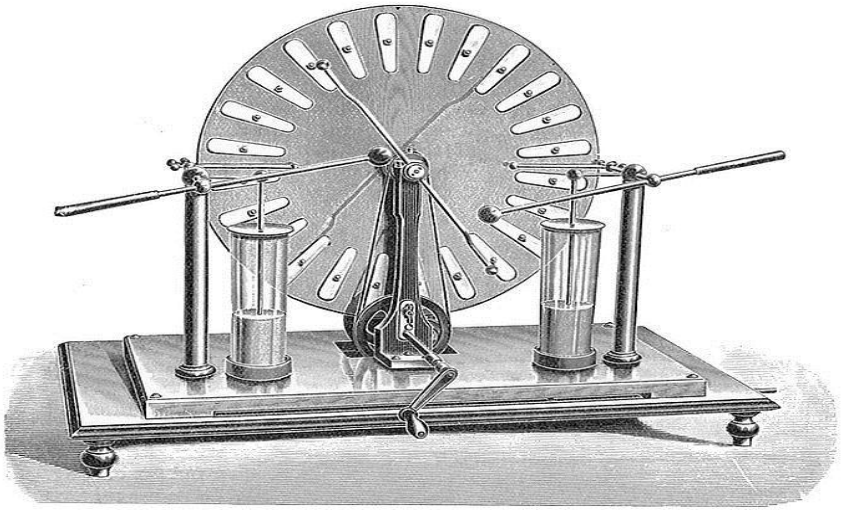
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

каже и голяма потенциална разлика. Без претенции за изчерпатемост на писаното ще изброим три типа генератори за получаване на статично електричество:
- чрез електростатична индукция (инфлуентна машина) - генератор на Вимшурст;
- чрез триене (фрикционна машина) – генератор на Ван де Грааф;
- чрез повишаващ трансформатор и изправяне на изходното му напрежение.

2. Инфлуентна машина на Вимшурст

Ще обърнем по-специално внимание на инфлуентна машина на Вимшурст. Изобретена е през 1883 г., състои се от два диска от изолационен материал (стъкло примерно) разположени близко един срещу друг (със съвпадащи оси) и въртящи се в противоположни посоки. По външните страни на дисковете са разположени радиално на равни разстояния метални плочки (пластини или фолио). По диаметъра на всеки диск от външната страна са поставени метални /проводящи/ шини с четки от двете страни. Идеята им е да неутрализират / разпределят заряда между две срещуположни пластини. Шините на двата диска са 90° една спрямо друта и на 45° от хоризонтала / вертикала и са част от статора /не се въртят/. Продължаваме със статора - хоризонтално един спрямо друг са разположени електроди предназначени да обират натрупаните по пластините заряди. Електродите са във формата на гребени (корониращи остриета) за да снемат натрупаните по пластините заряди. Електродите са свързани с лайденски стъкленици (кондензатор /първообраз/ състоящ се от стъклен съд, чиито външна и вътрешна стени са покрити с метално фолио, а тук служат да натрупат събраните от корониращите електроди заряди) и искрище (два електрода с пространство между тях, което в случая може да се наглася).



Фиг.1. Инфлуентна машин на Вимшурст

Работен принцип на инфлуентната машина на Вимшурст – ако към заземен (свързан с меден проводник към земята) метален предмет доближим положително зареден предмет, ще предизвикаме приток на електрони от земята през проводника към предмета. Това е електростатична индукция. Ако след това прекъснем връзката със земята (тази работа в машината се изпълнява от двете

перпендикулярни шини с четки в двата им края) предметът остава наелектризиран а електроните ще се разпределят по повърхността му. Ако положително зареденият предмет е метал, имаме кондензатор. Ако сега отдалечим положително зареденият предмет имаме вече разделяне на зарядите, каквото става в описаната машина. Раздалечаването на електродите на кондензатор изисква някаква енергия за да се преодолее силата на привлечане. Тази енергия се превръща в електрическа - зарядът се увеличава. Теоретично за да се стартира процесът трябва някакъв заряд. Практически е достатъчна малката разлика в зарядите върху плочите, за да стартира процеса.

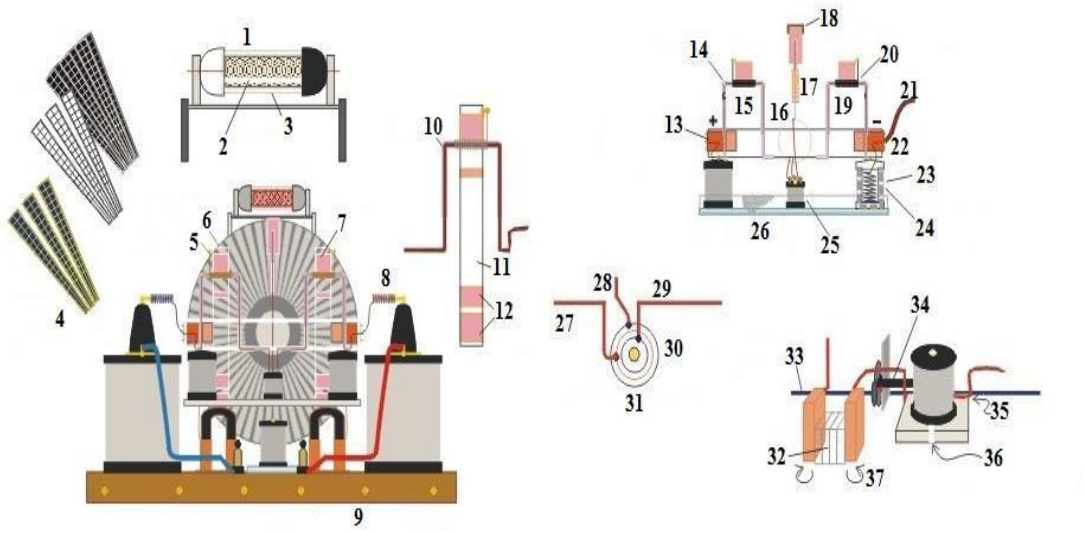
3. „Тестатика" - електростатичен генератор за добиване на възобновяема електрическа енергия

Твърдението, че машината „Тестатика" на швейцарската група Метернита се базира на електростатичният генератор на Вимшурст, но в модернизиран вариант. Тя следва принципа на разпределение на зарядите като е част от голямото разнообразие на разработените около 1900 година на електростатични (възбудителни) генератори. По този начин работи машината на Пиджън от 1898 г. , която се занимава с токовите кръгове.

50-те стоманени сегмента или ламели на диска са отличителен знак за машината на групата Метернита (виж фиг.2), но по принцип представителите на тази група са последователи на предишните изследвания и патенти за вълнообразни сектори, от които е открито, че те са по-ефективни от плътните. Тази група са последователи на един подобен пример появил се по-късно - алуминиевите сегменти, които се разпределят като спици на колело от един изолиран плексигласов център.

Една друга специфична функция на дисковете спрямо перфорираните ламели (които са перфорирани, за да могат да поемат по-лесно зарядите) е как те пренасят заряда от въртящите се дискове към четките понеже в генератор на Вимшурст има проводими четки или шини със заострен край, които действително докосват дисковете или достига много близко до тях, но във машината „Тестатика" групата Метернита зарядът трябва да премине паралелно през въздуха до сегментите. И за тази цел са така подредените металорешетъчни ламели. Вихровият ток (с малка стойност) от заредения въздух от горните слоеве се разпределя по металните елементи и по този начин могат да бъдат индуктирани зарядите към колекторите. Този процес предналежи към категорията за добив на електрическа енергия с променлив капацитет.

Трябва да се обърне внимание на това как представителите на групата Метернита използват тяхната основоположна идея взаимстване от машината на Пиджън със дълъг оглед материализирания запас, който изравнява и стабилизара противоположните заряди. Зарядите от един тип се разпределят и индуктират спрямо другите, така че полярността зарядите се разпределя равномерно по специфичните области на двата диска.

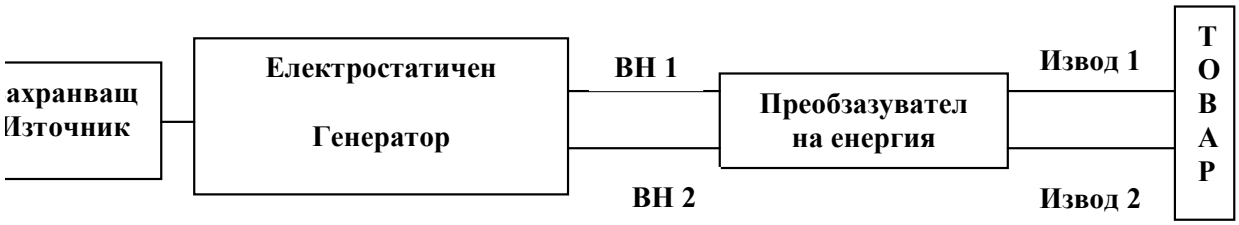


1. Мрежа (в решетъчна бобина)
2. Катод
3. Електронна лампа
4. Ламели на предния и задния дискове (50 на 18 cm)
5. Преден горен ъгъл на 5-ти ламел
6. Задна бобина на 6-ти ламел
7. Антенни ключове (бутони)
8. Високоволтов извод
9. Мед (колове) – мрежа/изолирана ламаринена основа
10. Пластмасови тръби
11. Обединяващи шини
12. Антенните ключове (бутони)
13. Антенните ключове са еднослойни и двуслойни в краищата
14. Пластмасови тръби
15. Индукционна бобина
16. Ролка
17. Месингова бобина
18. Магнит и рийд реле
19. Индукционна бобина
20. Възможно е да има месингова бобина вътре в тръбата
21. Високоволтов извод
22. Колектори
23. Краищата на ламаринените кутии са „Лайденски стъкленици”
24. Алуминиев цилиндър (неперфориран)
25. Бобини от алуминий
26. Мрежа отпред (черна)
27. Средна бобина
28. Външна бобина
29. Централна бобина
30. Централната бобина и средната бобина са навити последователно (бифилярни намотки)
31. Централна взаимноиндукционна бобина (ML2) свързана като бифилярна намотка
32. Електронно каскаден (лавинен) генератор
33. Син кабел за свързване на връзките
34. Тръба за предпазване на кабелите
35. Кабелът минава зад плексигласа (в буркана)
36. Скрита връзка към задните изпражени бобини и/или до края на кондензатора
37. Бобини свързани наобратно

Фиг.2. „Тестатика” - основни елементи

5. Система за добиване на електрическа енергия при „Тестатика”

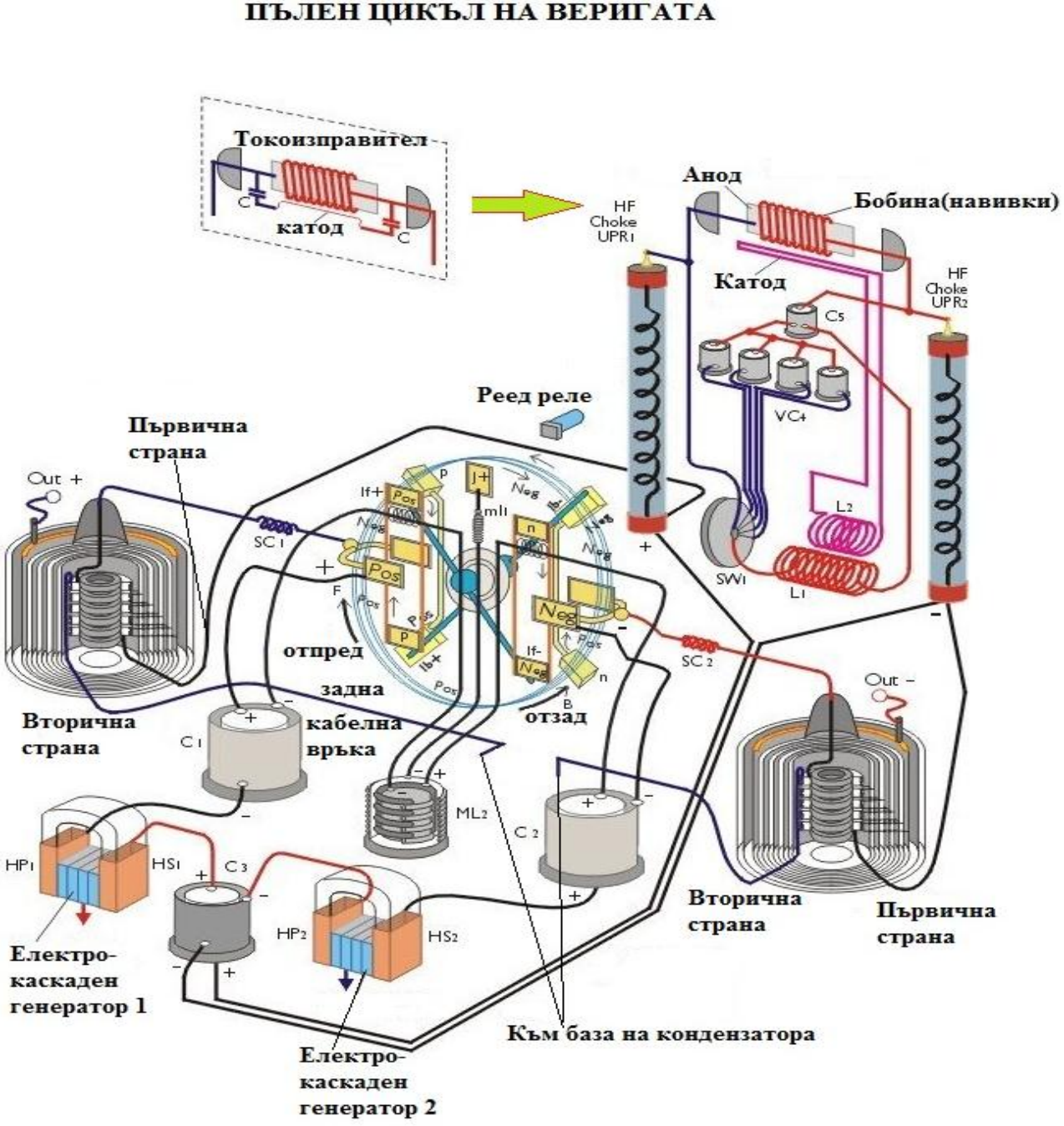
Системата за добиване на електрическа енергия се състои от две части: безчетков електростатичен генератор и високоволтов преобразувател на енергия. На блок схемата (виж фиг.3) е показан пълният процес за добиване на електрическа енергия. Този процес е изцяло базиран на електродинамиката.



Фиг.3. „Тестатика” - блок схема за добиване на електрическа енергия

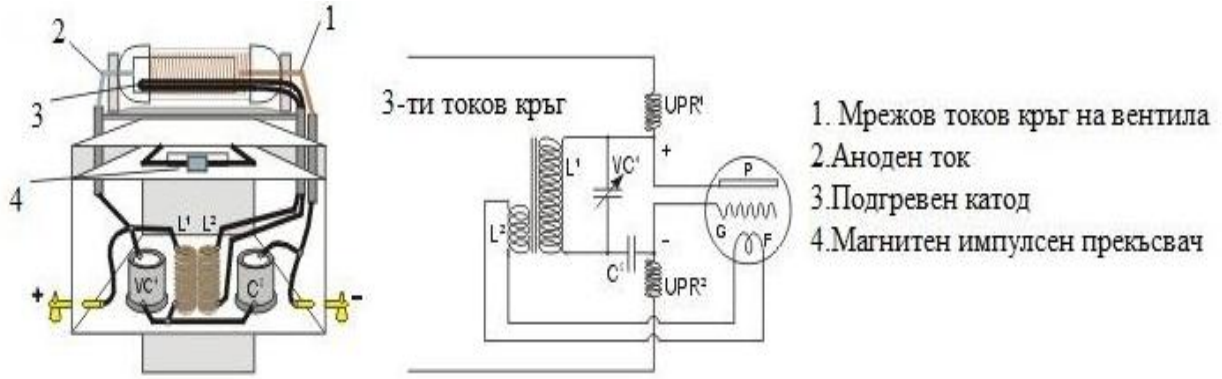
6. Пълен цикъл на веригата на „Тестатика”

За да работи веригата (виж фиг.4) трябва да извършва трептения (да генерира) и след това трептенията трябва да бъдат изправени, така че постояннотоковите импулси могат да бъдат насочени през индукционните бобините към „големите кутии” и преобразувани в голям ток към DC (постояннотоковия) извод. Изправителният диод (вентил), заедно с бобини **L1** и **L2**, и кондензаторите **C5** и **VC4** са една от многото конфигурации, която създава трептения и ги изправя.
Токоизправителят трябва да има бобина (подгряваща спирала), за да провежда електрони от катода и неговата ефективност е значително подобрена като вътре представлява електронна лампа (виж фиг.5). Рийд-релето се задейства от магнитите разположени в краищата на диска да осигури времеви импулс, който да отчете оборотите на диска.

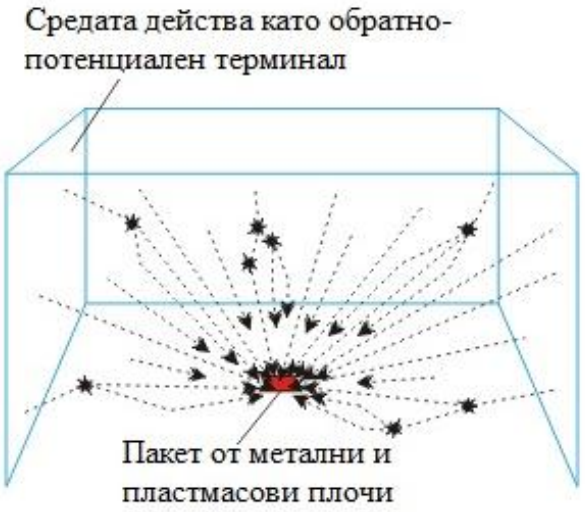


Фиг.4. Схема на пълен цикъл на веригата на „Тестатика”

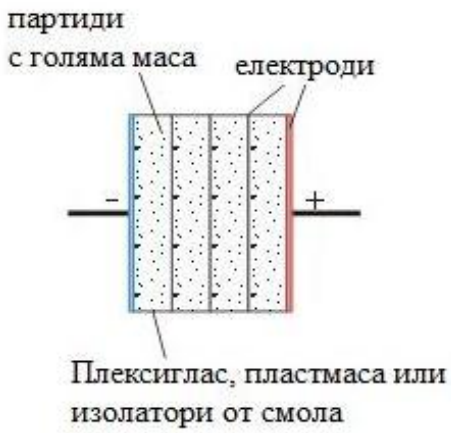
Какво прави тази машина да бъде „над останалите” и как нейната способност увелича основния си принос, и това така като създава и оползотворява ефекта Електронна каскада (Електронно-каскаден ефект) (виж фиг.6), който йонизира и поляризира въздуха в средата заобикаляща двета подковидни магнита (основно от генериращите диелектрични блокове с висока честота и високо напреженови импулси) (виж фиг.7), молекулите на въздуха се ускоряват с висока скорост право към диелектричните блокове, така че да предизвикат сблъсъци с други молекули, да е възможно отделянето на свободни електрони, които от своя страна също ускоряват скоростта си, за да могат да освободят още повече електрони и т.н.



Фиг.5. Токов кръг в горната част на веригата

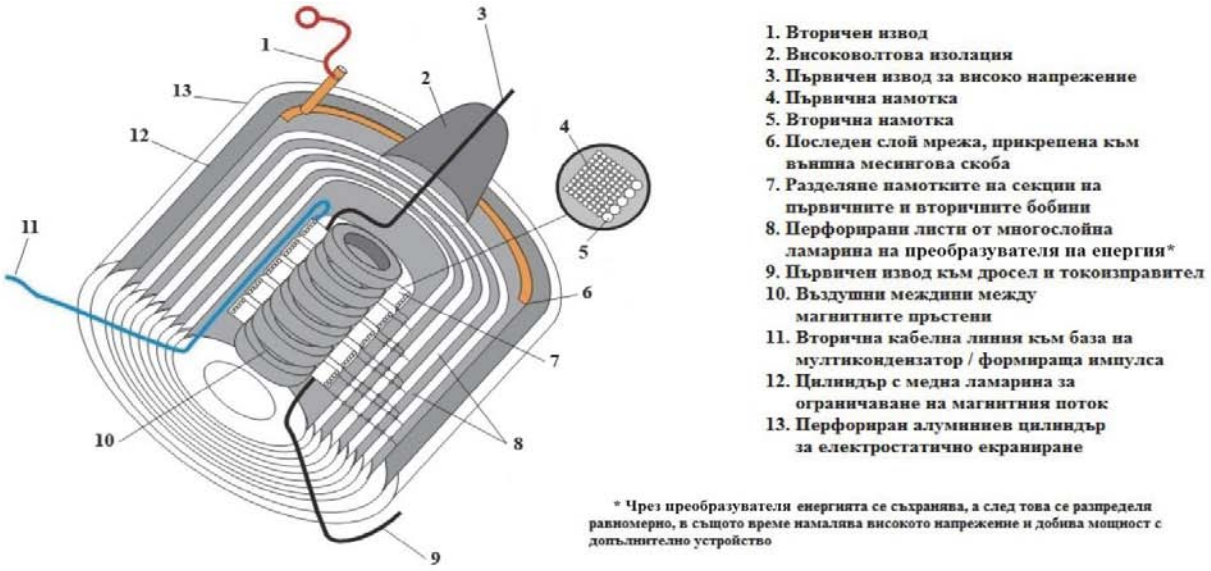


Фиг. 6. Електронна каскада



Фиг. 7. Електронно-каскаден генератор

Тази резултантна лавина прониква в заобикалящата ги среда. Всяка „голяма кутия” е високоволтов кондензатор от множество навивки на намотките и прикрепени по особен начин към тороидалния магнитопровод, така че да усили полето и да произведе, което зарежда отделно „Преобразувателя на енергия”, което създава зареждането за извода електростатично екраниране в „големите кутии” е осигурено от външния перфориран алуминиев цилиндър, а магнитното екраниране е осигурено от солиден меден цилиндър (виж фиг.8).

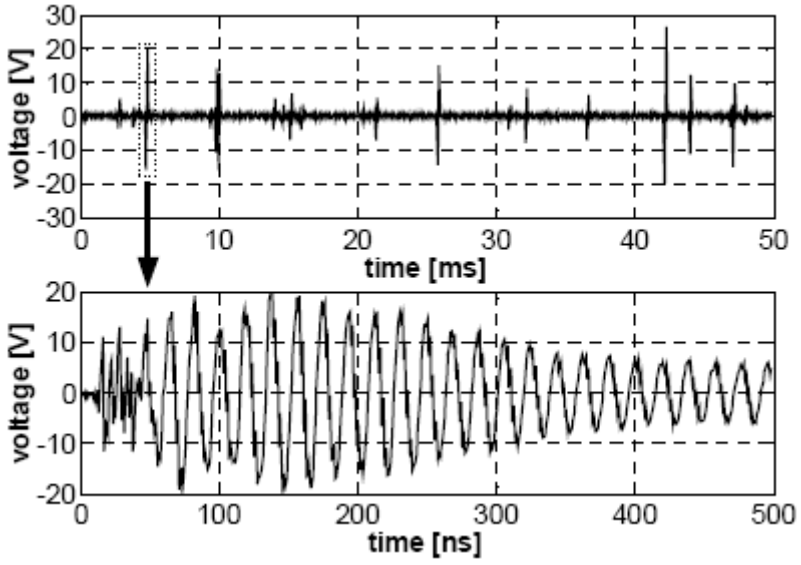


Фиг.8. Преобразувател на енергия

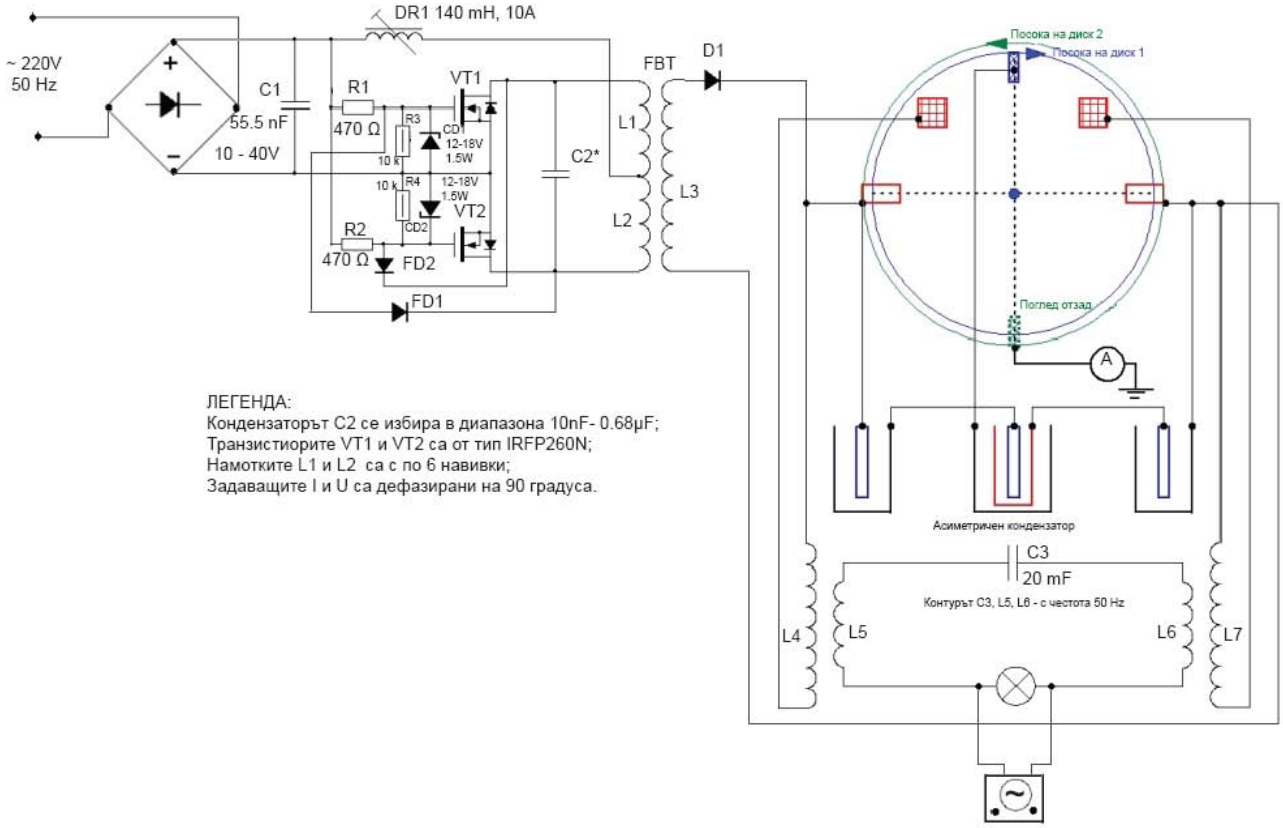
7. Опитни резултати

Измереното изходно напрежение на товара с високоволтово възбуждане от електростатичен генератор е показано на фиг.9. Генераторът се състои от следните параметри показан на фиг.10: 2бр. въртящи се дискове в различни посоки, всеки с диаметър 200mm. 16 сектора на диск приблизително 10 завъртания за секунда, изходно напрежение - постоянно напрежение приблизително 30kV. Ясно може да бъде забелязано, че системата трепти при избрана резонансна честота. Трептенията намаляват поради захранващата мощност на товара. Повтарящата се честота от тези трептения се определя от високото напрежение освободено от импулс с повтаряща се честота, която в този случай е непоройдъчна 100÷400Hz.

Основната захранваща мощност на товара е ≈10mW. Като се има предвид загубите в искровата междина и преобразувателя на енергия, тази стойност е в съгласие с теоретичните постановки, които прогнозират изходната мощност от електростатичния генератор около 80mW.



Фиг.9. Измерено изходно напрежение при товара



Фиг.10. Принципна схема на електростатичен генератор

8. Заключение

„Тестатика” е енергийно ефективнен генератори за добиване на електрическа енергия. Разработването на тази машина би помогнало да се решат много от проблемите в електроенергийната система, както и да се повиши ефективността и стабилността на системата. Това би било оптимален вариант за разрешаване на социалните проблеми, свързани с настоящата употреба на енергия. Това е нашата алтернатива за получаване на екологично „чиста” и свободна енергия.

Литература

[1] NEWENERGYBG.COM: „Не ни трябва Свободна енергия – трябва ни безплатна енергия!” http://www.newenergybg.com/

[2] Harms G., Deutsche Vereinigung für Raumenergie (DVR) „Testatika – Berichte” http://www.testatika-berichte.richard-taube.de/

[3] „TESTATIKA” – http://www.progettomeg.it/testatika.htm

[4] The World of Free Energy – www.free-nrg.blogspot.com

Автори: инж. Марин Вълков, докторант, катедра „Електроснадяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”; Иван Петров, доц. д-р, катедра „Електроснадяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *ivanpetrov60@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** Проф. д-р инж. Н. Трифонов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА БЪЛГАРСКИЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЕН ПАЗАР

Мария Кънева, Николина Петкова

Резюме: *Либерализацията на пазара на електрическа енергия на практика осигурява отваряне на пазара за независими доставчици и търговци на електрическа енергия. След въвеждане на дерегулацията на енергийния сектор очакванията бяха да се рационализират производството и потреблението на електроенергия и енергийния баланс на страната. Осигурява се възможност за участие на частни инвеститори в производството, разпределението и търговията с електрическа енергия. Направеното изследване в статията е предназначено да повиши степента на информираност относно развитието на българския електроенергиен пазар и да анализира характерни негови особености.*

Ключови думи: *електроенергиен пазар, еластичност на потреблението, видове договори*

STUDY OF BULGARIAN ELECTRICITY MARKET

Maria Kaneva, Nikolina Petkova

Abstract: *Electric power system development is essential for economic and social activity in every Country. The deregulation of the power sector is intended to provide open market to independent suppliers and trades of electricity. The production, consumption and energy balance are supposed to be rationalized after the establishing of the energy sector liberalization. Private investors have an opportunity to take part in the production, distribution and marketing of electricity. In this paper, the information about development of the Bulgarian electricity market is intended to increase as well as some specific features to be analyzed.*

Keywords: *electricity market, elasticity of consumption, type of contracts*

1. Въведение

Една от основните цели на енергийната политика на Европейския съюз е създаване на вътрешен енергиен пазар до 2014 година и интегриране на националните пазари. За да се постигне тази цел, Европейската комисия разработва три големи основни законодателни инициативи (първи, втори и трети енергиен пакет) и допълнително развива така наречените регионални инициативи за електроенергия. Пакетите за вътрешния енергиен пазар задават регулаторните рамки, а в регионалните инициативи работят заедно участниците в пазара и регулаторните органи. Въпреки тези мерки, продължават да съществуват значителни раз-

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

лики между енергийните пазари на държавите-членки. Днес европейският вътрешен пазар все повече се разширява и развива и затова се очаква реален икономически растеж в редица страни, една от които е и България. Без значителни технологични постижения по отношение на използването на енергията, в по-голяма степен на възобновяемите ресурси, този растеж ще бъде последван от много интензивно разходване на невъзобновяемите изкопаеми горива - нефт, газ и въглища. В доклада се разглеждат някои особености на електроенергийния пазар в България и се определят негови основни характеристики.

2. Монопол - олигопол

На електроенергийния пазар производителите на електрическа енергия разполагат с прекомерна власт, което води до установяване на олигополова структура не само в България, но и в други пазарни икономики в Европа [1].

Особеностите на пазарите с идеална конкуренция, опигополния и монополния са следните.

В един идеално конкуриращ се пазар намаляването на цените от страна на една компания ще има незначителен ефект върху нейните конкуренти и те няма да трябва да действат в отговор на това намаление на цените. При идеалната конкуренция нито една компания не разполага с достатъчно пазарна мощ да влияе върху цените чрез промяна на собственото си производство и предлагането на стоки и услуги.

Проблемът с монопола е, че монополистът е в състояние да ограничи производството и по този начин да увеличи цената на стоките или услугите.

Олигополният пазар заема междинно положение между конкурентния и монополния пазари. При олигопола намалението на цените бързо ще привлече клиентите на останалите две или три конкуриращи се компании, като ефектът ще е толкова сериозен, че те ще трябва незабавно да реагират, като намалят цените си.

В рамките на един олигополен (олигополистичен) пазар съществуват няколко големи производители на даден хомогенен продукт (или различни взаимозаменяеми продукти) и в хода на развитието на пазара решенията на производителите относно предлаганото количество и неговата цена се влияят от действията на другите участници на пазара Структурните условия на олигополния пазар са такива, че те не се конкурират един с друг по отношение на цената и имат малко стимули да се конкурират по друг начин. Тези производители, имащи възможност да влияят върху цената и стремейки се да увеличат своята печалба, установяват цени значително по-високи, отколкото ако съществуваше идеална конкуренция на пазара. Поради тази причина през последните години Европейският съюз предприе редица стъпки за либерализация на пазара на електроенергия и природен газ в рамките на съюза. Подписани са редица договори, които определят правилата и предметите на действия (като хармонизация на енергийното данъчно облагане, прозрачност при образуване на цените). Това се реализира с цел да се подобри пазарната ефективност, да се подобрят и увеличат връзките производител - потребител и да се стигне до създаване на условия на реална

конкуренция на пазара. Един от най-големите проблеми на либерализацията е, че по-голямата конкуренция ще доведе до по ниски цени в краткосрочен и средносрочен план, което няма да е достатъчен стимул за реализирането на дългосрочни инвестиции в страните производителки. Липсата на инвестиции от своя страна ще доведе до недостиг на доставки и рязко покачване на цените, като може да се стигне и до срив в някои икономики, където зависимостта от доставките на природен газ и електроенергия е прекалено голяма. Възможност за Европейския съюз е да субсидира някои от производителите с цел компенсиране на по-ниските цени, като това може да се окаже по-евтино за Европейския съюз от плащането на високи цени.

Много малко пазари се характеризират с идеална конкуренция. Повечето са олигополни. При това има много пазари, където има няколко играча и при все това съществува голяма конкуренция, както и такива, където може да има множество икономически играчи и въпреки това механизмът на конкуренцията да не работи.

Но така или иначе, въпросът за пълната либерализация на пазара стои отворен. На пазара на електроенергия все още няма реална конкуренция и той продължава да бъде олигопол. Затова този пазар представлява голям интерес за редица изследователи, които използват различни подходи при неговия анализ. При анализирането на ситуацията на пазара и разработването на най-различни модели почти винаги се търсят отговори на няколко основни въпроса:

- Съществува ли равновесие на пазара на електроенергия между търсенето и предлагането?
- Ако съществува равновесие, единствено ли е то?
- Как може да се намери?
- Какви политически и икономически изводи и интерпретации могат да е направят?

Подход, който подпомага отговорите на тези въпроси е изследването на еластичността на потреблението на електроенергия.

3. Изследване на еластичността

Еластичността на търсенето позволява да се измерва степента на чувствителност на потреблението на електроенергия при вариране на цената й. Това отношение обикновено е отрицателно, тъй като при растеж на цената потреблението спада.

Когато търсеното количество от даден продукт се променя в по-голяма степен отколкото цената на продукта, т.е. потребителите имат висока чувствителност към измененията в цената, казваме че имаме еластично търсене

Когато търсеното количество се променя в същата степен като цената на продукта то потребителите имат нормална чувствителност, т.е. нормална еластичност към изменението в цената на продукта.

Ако търсеното количество се променя в по-малка степен отколкото цената на продукта, това означава че потребителите имат ниска чувствителност към изменението в цената на продукта.

Коефициентът на ценова еластичност на търсенето или потреблението се определя по следния закон:

$$e = \frac{\frac{\Delta Q}{Q}}{\frac{\Delta P}{P}} = \frac{\Delta Q}{\Delta P} \times \frac{P}{Q}$$

където: *e* - коефициент на ценова еластичност на търсенето/потреблението;
Q - количество на потребената стока (потребената електроенергия);
P - цена на стоката (на електроенергията);
ΔQ - изменение на количеството на потреблението;
ΔP - изменение на цената на стоката (електроенергията);
$\Delta Q / Q$ - относителното изменение в количеството на търсенето;
$\Delta P / P$ - относителното изменение в цената на продукта.
Могат да се различат три случая:

а) първи случай - това е случаят на продукти от първа необходимост или на тези, за които не съществуват заместващи продукти, като например: наеми, застраховки, абонаменти (за телефон, телевизия, интернет), вода, електроенергия, др.

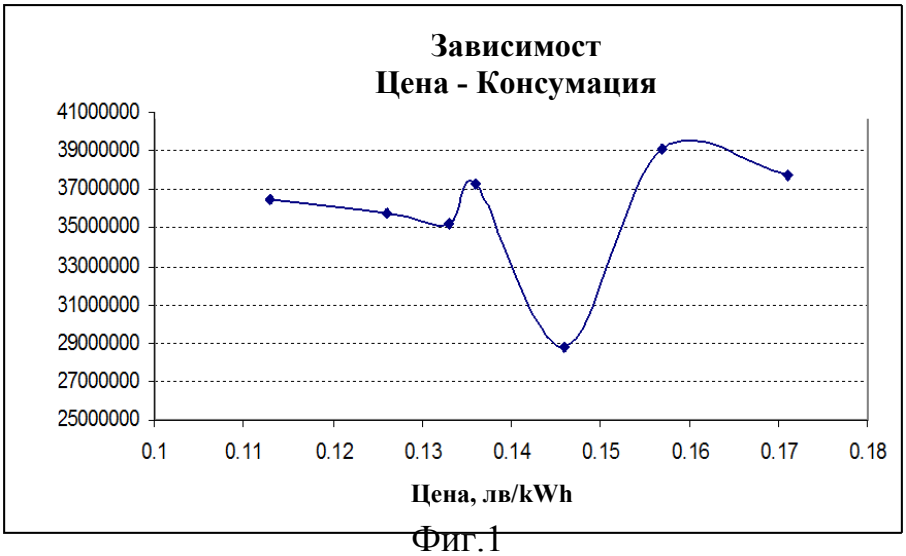
б) втори случай - друг случай е когато цената пада, но потреблението не расте, т.е. достигнато е ниво на задоволяване на потребностите от дадения продукт.

в) трети случай - нулева еластичност в краткосрочен план. В дългосрочен план може да не се запази, защото увеличаването на цената може да доведе до търсене на заместващ продукт (например петролът).

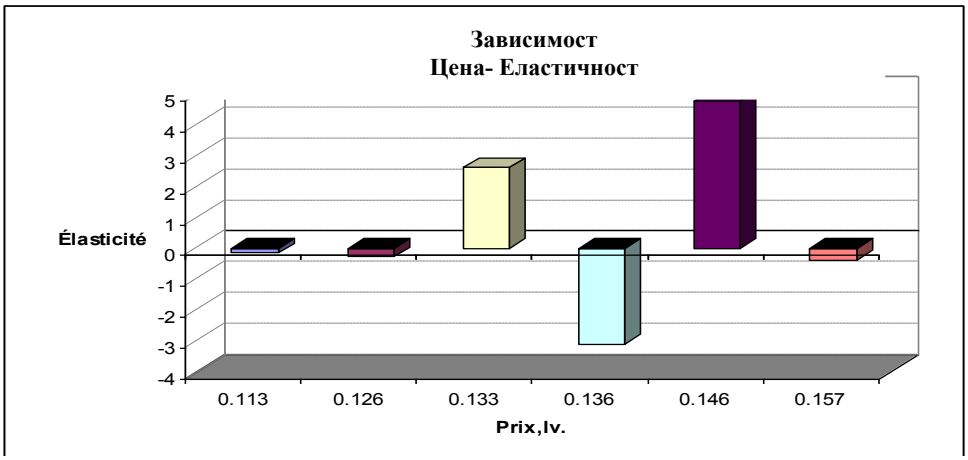
Кривата на еластичността на търсенето, която е чисто еластична се представя с хоризонтална линия.
Кривата на еластичността на търсенето, която е чисто нееластична се представя с вертикала линия.
В България за периода 2003-2007 са получени следните данни за еластичността на търсенето:

Табл.1

Година	Консумация, kWh	Цена, лв/kWh.	Еластичност на консумацията
2002	36441265	0.113	-0.15618
2003	35786493	0.126	-0.27073
2004	35248243	0.133	2.610598
2005	37323859	0.136	-3.10747
2006	28795719	0.146	4.762622
2007	39128420	0.157	-0.3889
2008	37771494	0.171	-



Фиг.1



Фиг.2

4. Видове договори

Основните пазарни условия могат да повлияят върху формирането на стратегиите на фирмите, отнасящи се до произведеното и продаденото количество и това са:

- Търсенето на продукта;
- Договорните задължения;
- Пределни разходи на фирмите.

Както се вижда, освен разгледаната в предния раздел еластичност на търсенето има и други условия.

Договорните задължения

Договорните задължения не влияят върху наклоните на отделните функции на предлагането. Те влияят върху свободните коефициенти на функциите на предлагане, но промяна в свободния коефициент за определена фирма не оказва влияние върху свободните коефициенти или наклони на функциите на нейните конкуренти. Продавайки на договорния пазар, фирмата може да увеличи равновесното количество, предложено на пазара, но ще намали и цената, което би се случило и ако фирмата предприеме по-агресивна стратегия на обикновения па-

зар. Така при положение, че фирмата може да получи същите резултати просто чрез по-агресивна стратегия на обикновения пазар, то това означава, че трябва да има нещо друго, което да прави „продажбата" на договори атрактивна. И това нещо може да е възможността на фирмата да влияе върху стратегията на своя конкурент. Ако увеличението на договорните количества на фирмата доведе до намаление на тези на конкурента, то това ще направи конкурента по-малко агресивен на обикновения пазар, позволявайки на първата фирма да има по-голям пазарен дял. В този случай обаче, увеличаването на продажбата на договорни количества от първата фирма води до намаляване на равновесното количество на конкурента, но неговата стратегия (функция на предлагане) си остава същата, т.е. че в равновесната точка (равновесната цена) фирмите няма да предлагат договори.

Но обикновено в практиката се оказва, че договаряната цена надвишава очакваната цена на обикновения пазар, като по този начин производителите имат по-голям мотив да продават на договорния пазар – получават по-големи приходи. Наличните данни всъщност показват, че производителите покриват по-голяма част от своите продажби на договорния пазар, като цените са били над тези на обикновения пазар.

Пазарният модел на вътрешния пазар на електрическа енергия в Европа е основан на изискването за свободен достъп на трета страна до мрежата, при който сделките се осъществяват чрез директни двустранни договори между производители/ търговци и потребители и балансиращ пазар (на който се купуват недостигащите количества и се продават оставащите излишъци по двустранните договори) [1]. В преходния период на поетапна либерализация у нас взаимоотношенията между пазарните участници се осъществяват на регулиран и на свободен пазар на електрическа енергия

Съгласно изискванията на европейските директиви, пазарът на електроенергия се отваря поетапно по начин, който дава възможност на производителите и търговците да имат свободен достъп до преносната и разпределителните мрежа и да се договарят пряко с крайните потребители, придобили правото на такъв достъп.

Първоначално, достъп до мрежата и възможност да сключват директни договори получават най-големите потребители (привилегировани) като постепенно техният кръг расте с намаляването на изискванията за минимално годишно потребление (понастоящем теоретично няма разлика между потребителите).

Видовете договори на пазара на електрическа енергия биват:

- Договор за достъп до електропреносната мрежа и предоставяне на системни услуги;
- Договор за пренос на електрическа енергия през електропреносната мрежа;
- Договор за достъп и пренос на електрическа енергия през електроразпределителната мрежа;
- Договор за продажба на електрическа енергия;

- Договор за предоставяне на студен резерв;
- Договор за предоставяне на допълнителни услуги;
- Договор за участие на балансиращия пазар с доставчик на балансираща енергия;
- Договор за балансиране с координатор на балансираща група;
- Договор за участие в балансираща група;
- Договор за комбинирани услуги;
- Договор за откриване и обслужване на специална сметка;
- Договор за участие в организиран пазар „ден напред“;
- Договор за обмен на информация за данните от измерването;
- Рамков договор [3].

Създаването и работата на конкурентен пазар на електрическа енергия правно е осигурено посредством пакет от нормативни документи, с които се урежда юридическото отваряне на електроенергийния пазар, а именно:

- Закон за енергетиката;
- Правила за търговията с електрическа енергия;
- Правила за условията и реда за достъп до електропреносната и електроразпределителните мрежи;
- Наредба за регулиране на цените на електрическата енергия;
- Насоки за регулиране на българските електропроизводствени дружества;
- Наредба за лицензиране на дейностите в енергетиката;
- Правила за управление на електроразпределителните мрежи;
- Правила за управление на електроенергийната система;
- Правила за измерване на количеството електрическа енергия.

По отношение на достъпа до мрежата е избран вариант на регулиран достъп, който има някои предимства пред договорния достъп: редуциране до минимум на потенциалните спорове между страните; осигуряване на отварянето на пазара в случай на пазарен кандидат с доминираща позиция и на интегрирана структура; при необходимост от значителни инвестиции в преносната мрежа. Законово въведени са и изисквания по отношение на достъпа, който следва да бъде осъществяван при недискриминационни, прозрачни и честни процедури, както и при условия, които стимулират конкуренцията [2].

Пределни разходи на фирмите

Пределни разходи на фирмите и търсене на продукта са две пазарни характеристики, които имат голямо влияние върху избора на фирмите за това какво количество да предложат. Необходима е информация на фирмите за еластичността на търсенето. Въпреки че са фактори с голямо значение, фирмите не се нуждаят от информация за договорните споразумения на другите участници. Цялата информация от която се нуждаят, е ценовата еластичност на търсенето, което е лесно достъпна информация, и фирмените пределни разходи, което е вътрешна информация за фирмата. Единственият проблем е свързан с пределните разходи

на конкурентите. Но предполагайки, че тази информация е налице, фирмите могат да използват модела на Курно, за да предскажат и изчислят количеството, което да предложат на пазара занапред преди още да са започнали да произвеждат. Така те могат да стигнат до равновесие за кратък период от време, без да се нуждаят от информация.

5. Заключение

При недостиг на ресурси и увеличаване на тяхната цена с времето, равновесната цена на продукта, използващ тези ресурси има тенденцията да расте и индустрията, използваща тези ресурси е с нарастващи разходи. Повечето индустрии имат такава тенденция във времето. Такъв е и електроенергийният сектор.

Създаването на успешно функциониращa национална електроенергийна борса би имало положителен ефект в развитието на конкурентен пазар на електрическа енергия в България и региона.

Постигането на тази цел изисква усилия от страна на всички институции в сектора, които имат пряко отношение към създаването на електроенергийна борса, дълбоко разбиране на процесите, свързани с търговията на електрическа енергия, анализ на постигнатия опит до момента и желание за промени и усъвършенстване на пазарния модел. В този смисъл изследването на еластичността на търсенето, както опитът вече доказа у нас, представлява интерес и ще доведе до практическа полза.

Литература

[1] Green R.J., (1999), ***The Electricity Contract Market in England and Wales***, The Journal of industrial Economics, 0022-1821, 1999 г.

[2] Стоилов Д., Янев К., (2011), ***Режими на електроенергийни системи,*** София, Издателство на ТУ-София, 2011 г.

[3] Държавен вестник, (2011), брой 64, 2011 г.

Автори: Мария Кънева, доц. д-р, катедра „Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mkaneva@tu-sofia.bg;* Николина Петкова, гл. ас. д-р, катедра „Теоретична електротехника”,Факултет Автоматика, Технически Университет - София, E-mail address: *npetkova@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Д. Стоилов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ОСВЕТИТЕЛИ, КОМПЛЕКТОВАНИ С РЕТРОФИТ ЛАМПИ

Милена Недева

Резюме: *В статията се анализират заснети светлоразпределителни криви (СРК) на светлинни източници и битови осветители с разпределителен фотометър. Изчислява се коефициента на полезно действие (КПД) на осветителите. Предлага се сравнителен анализ на СРК на изследваните източници и осветители.*
Ключови думи: *разпределителен фотометър, светлоразпределителна крива, ретрофит лампи.*

STUDY LIGHT DISTRIBUTION FOR LIGHTING, COMPLETE WITH RETROFIT LAMPS

Milena Nedeva

Abstract: *This article analyzes captured light distribution curves at light sources and luminaries for domestic distribution photometer and calculate the efficiency of the luminaire. There is a comparative analysis of light distribution curves test sources and luminaires.*
Keywords: *distribution photometer light distribution curve retrofit LED lamps.*

1. Въведение

Светлоразпределителна крива. Разпределителен фотометър

Светлоразпределението на всеки светлинен източник може да се представи графично в пространството чрез радиус-вектори с начало светлинния източник и големина, пропорционална на интензитета на светлината.

Интензитетът на светлината е излъченият елементарен светлинен поток dΦ в безкрайно малък пространствен ъгъл dΩ, в който dΦ може да се счита за равномерно разпределен (фиг. 1а).

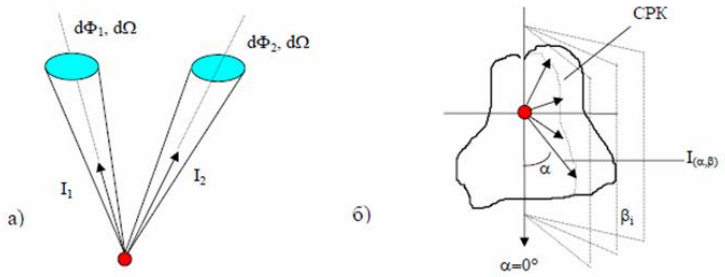
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}[cd] \qquad (1)$$

За точковиден източник, при равномерно разпределение на светлинния поток Φ в границите на пространствен ъгъл Ω, интензитетът на светлината по оста на пространствения ъгъл е I=Φ/Ω. За практиката с достатъчна точност, за точков се приема източник, който е с размер поне 10 пъти по-малък от разстоянието на

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

измерване на интензитета. За нагледност пространственото представяне на интензитета на светлината се извършва с фотометрично тяло (фиг.1.б), което е геометричното място на върховете на интензитетите в пространството.



Фиг.1. Интензитет на светлината: а) определяне; б) фотометрично тяло и СРК

Сечението на фотометричното тяло с равнина, преминаваща през източника на светлина, определя светлоразпределителната крива /СРК/ за съответната секуща равнина. За кръговосиметрично излъчващ източник е достатъчна една СРК за определяне на пространственото разпределение на светлинния поток. При кръговосиметрично излъчващо тяло, интензитетът не зависи от ъгъл β и се работи със зонален ъгъл [1].

При таблично представена СРК, измереният светлинен поток е:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} I_{\alpha} \, \Delta\Omega_i \tag{2}$$

където: I_α е определен за $\alpha=(\alpha_1+\alpha_{i+1})/2$, $\Delta\Omega_i = 2\pi\left(cos\alpha_1 - cos\alpha_{i+1}\right)$

Построяването на СРК $I_\alpha = f(\alpha)$ на светещи тела с крайни размери е възможно като се използва закона за квадратичното отдалечение. Осветеността, създавана от точковиден източник, е пропорционална на интензитета на светлината в дадена посока и косинуса на ъгъла на падане на светлината и обратно пропорционална на квадрата на разстоянието до светлинния източник.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I_\alpha \cos\beta}{l^2} \tag{3}$$

където:

E – осветеност, lx

I_α - интензитет на светлината по посока на осветяваната повърхност, cd

l - разстояние между светлинния източник и осветяваната повърхност, m

Когато приемната повърхност на луксметъра е перпендикулярна на падащия лъч, $I_\alpha = E.l^2$. Тази зависимост се използва при измерване на пространственото разпределение на светлинния поток на източници и осветители [2].

За реалните измервания на осветеностите от изследваните източници и осветители е изработен разпределителен фотометър. Той представлява конструкция с движещо се рамо, на което се закрепя фотоприемника на луксметъра (измервателна сонда). При фиксирано разстояние (1m) между светещото тяло и повърхността на измервателната сонда, от $0^0 \div 180^0$, през 5^0 се измерват осветености, които формират съответната СРК. Разстоянието на фотометриране е над 10 пъти

по-голямо от размера на светещото тяло, което позволява то да се приеме за точковидно [2].

Настоящото изследване обхваща заснемане на светлоразпределението на два вида конструкции на битови осветители, комплектувани с различни светлинни източници: съвременни халогенни нажежаеми лампи с повишена ефективност, компактни луминесцентни лампи и вариант на опростена конструкция на светодиодна ретрофит лампа.

2. Резултати от проведеното изследване

2.1. Заснемане на светлоразпределителни криви на изследваните изделия

Заснемането на СРК на изследваните светлинни източници и осветители е проведено в лаборатория на Технически колеж - Смолян. За целта е изработен разпределителен фотометър с дължина на движещо се рамо 1,1м. Закрепя се измервателната сонда на луксметъра на движещото се рамо на фотометъра и се фиксира разстояние от 1м до светещата част на изследваното изделие. Измерват се осветеностите от $0^0 \div 180^0$, през 5^0. Данните се въвеждат в Exel файл. Със специализиран софтуер, по данните от измерванията, се изчертават СРК (cd/klm) за условен светлинен поток Φ_y=1000lm. В процеса на работа е проследена температурата на корпуса на работещи лампи и осветители, при отчетена температура и влажност на околната среда. Данните са обобщени в табл.1.

Фиг.2. Разпределителен фотометър

Осветително тяло 1 Осветително тяло 2

Фиг.3. Битови осветителни тела

Табл.1

Измерени температури, ^{0}C		
Усъвършенствана нажежаема лампа 73,4 ^{0}	Компактна луминесцентна лампа 55,8 ^{0}	Светодиодна лампа LED 45
Лампа с осв. тяло 1 43,5 ^{0}	Лампа с осв. тяло 1 35,3 ^{0}	керамика - 34,1 ^{0} тяло - 38,9 ^{0} LED – 49 ^{0}
Лампа с осв. тяло 2 40,4 ^{0}	Лампа с осв. тяло 2 32,6 ^{0}	

Приложение на светодиодни ретрофит лампи [3]

В съвременните светлинни източници трябва да се използват най-мощните (от достъпните) светодиоди, за да се постигне исканата стойност на светлинния поток. Колкото е по-голяма консумираната от светодиода мощност, толкова по-

сложна и с по-големи размери трябва да бъде неговата охлаждаща система, в противен случай светодиодът ще започне да прегрява. При такъв режим на работа рязко спада светлоотдаването и експлоатационният ресурс на лампата. Ситуацията се усложнява в осветителните тела от затворен тип (в ограниченото пространство от колбата и корпуса).

Светодиодите са концентрирани източници на светлина и топлина. Увеличаването на индивидуалната мощност на светодиодите, води до намаляване на техния брой в лампата и намаляване на площта на светене. Повишава се опасността от заслепяване и от намаляване на условията на видимост. Голямата яркост предизвиква силно интензивно осветяване на ретината на очите, при което разлагащият се светлочувствителен пигмент не може да се възстанови и настъпва заслепяване.

За приложение в осветителните устройства са подходящи SMD светодиодите. Те имат по-голяма яркост и по-ниска консумация на енергия в сравнение с използваните диоди в конвенционалните LED лампи. Могат да са с много малки размери и имат широк зрителен ъгъл, благодарение на факта, че нямат стандартното епоксидно покритие, което фокусира лъча. SMD светодиодите почти не излъчват топлина и имат ниско потребление на енергия [7]. Корпусът им е снабден със специална площадка за закрепване към топлопроводимата повърхност, за която може да служи налична печатна платка с някаква топлопроводна основа, без допълнителен радиатор. Съществуващите SMD светодиоди са с малка мащност (до 0,1 W), със средна мощност (0,1-1 W) и мощни (над 1,0 W).
В табл.2 са посочени мощности и съответстващи светлинни потоци на традиционните, халогенните нажежаеми лампи с повишен светлинен добив и съществуващи светодиодни лампи.

Табл.2

Нажежаема лампа		**Халогенна нажежаема лампа с повишен добив**		**Светодиодна лампа**	
Мощност,W	Светлинен поток, lm	Мощност,W	Светлинен поток, lm	Мощност, W	Светлинен поток, lm
25	220÷250	18	220	2,5	250
40	410÷470	30	405	4,0	400
60	700÷810	42	630	7,0	700
75	920÷1060	53	840	9,5	950
100	1300÷1530	70	1200	13,5	1350

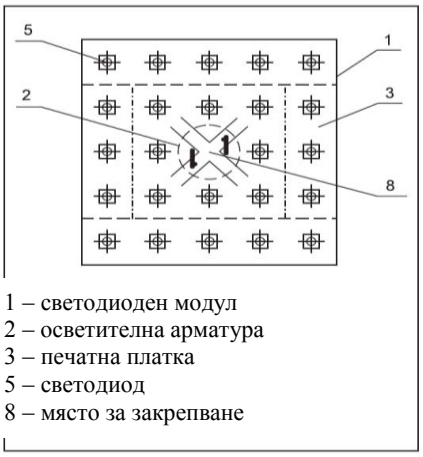
Описание на светодиодна конструкция

Предлаганата светодиодна конструкция е показана на фиг.4 и фиг.5. Тя съдържа светодиоден модул (1) във вид на печатна платка (3) с алуминиева основа (4), на която по метода на автоматичния повърхностен монтаж са инсталирани SMD-светодиоди (5). За светодиодния модул (1) е закрепена осветителна арматура (2), която е изпълнена като винтов цокъл (6) с вграден захранващ блок (7). Светодиодите (5) са монтирани равномерно на печатна платка (3), като всеки един

от тях е с мощност не повече от 0,5 W. За всеки светодиод са предвидени не по-малко от 4 см^2 площ.

1 – светодиоден модул
2 – осветителна арматура
3 – печатна платка
4 – алуминиева основа
5 – светодиод
6 – винтов цокъл
7 – захранващ блок
8 – място за закрепване

Фиг.4. Конструкция на изследвания светодиоден източник



1 – светодиоден модул
2 – осветителна арматура
3 – печатна платка
5 – светодиод
8 – място за закрепване

Фиг. 5. Варианти на устройството

Разглежданата светодиодна ретрофит лампа се характеризира с опростена конструкция, осигуряваща необходимия топлинен режим на светодиодите и компактни размери. Поради липсата на вторична оптика и малките габаритни размери може да се очаква светлоразпределение с тесен ъгъл на излъчване и ограничено приложение. За приложения в битови осветители подходящо би било да се комплектува с вторична оптика, определяща по-широк ъгъл на излъчване.

Получените светлоразпределения при използване на различните видове светлинни източници, комплектувани с двата вида конструкции са представени в табл.3.

Табл.3

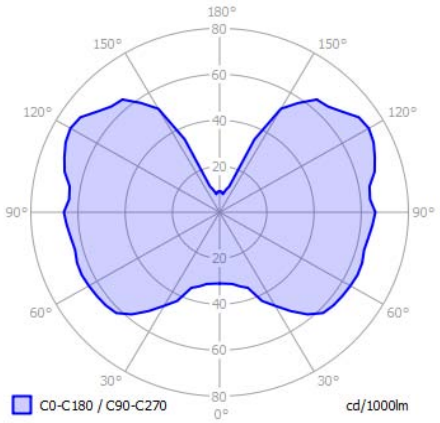
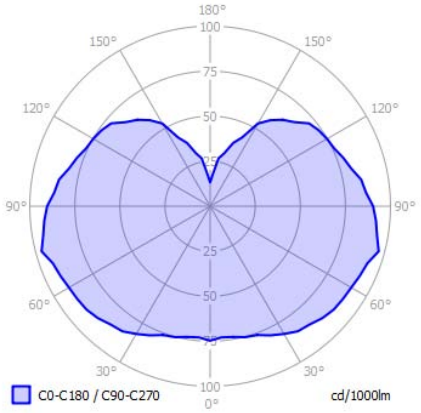
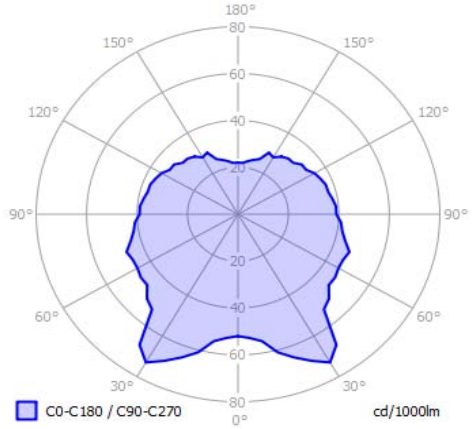
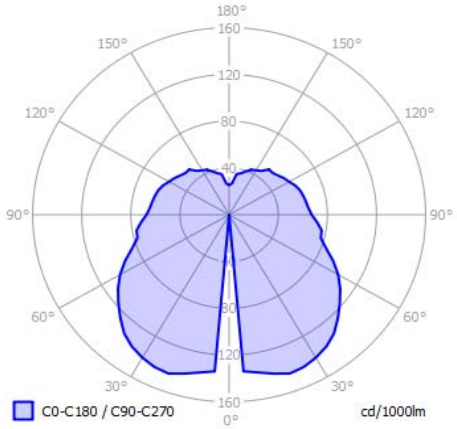
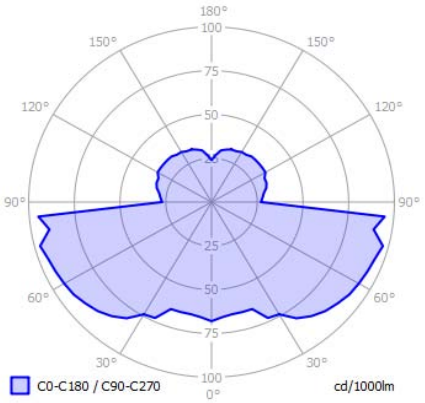
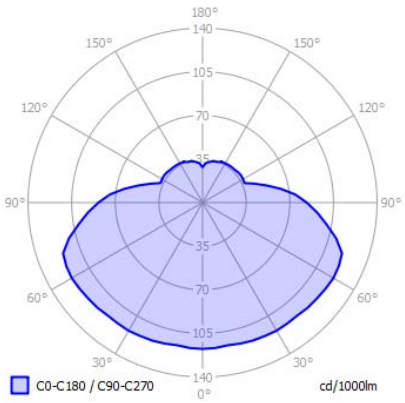
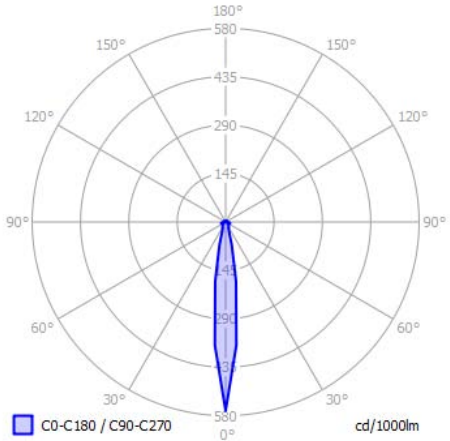
№	Наименование на изследваната конструкция и СРК	№	Наименование на изследваната конструкция и СРК
1.	Halogen ECO - E27/53W 230V/50Hz/2800K/840lm/1000h/клас C 	2.	КЛЛ E27/15W/230V/50Hz 2700K/800lm/10000h/клас A 

Табл.3 (продължение)

№	Наименование на изследваната конструкция и СРК	№	Наименование на изследваната конструкция и СРК
3.	Halogen ECO - E27/53W 230V/50Hz/2800K/840lm/1000h/клас С с осветително тяло 1 	4.	КЛЛ E27/15W/230V/50Hz 2700K/800lm/10000h/клас А с осветително тяло 1 
5.	Halogen ECO - E27/53W 230V/50Hz/2800K/840lm/1000h/клас С с осветително тяло 2 	6.	КЛЛ E27/15W/230V/50Hz 2700K/800lm/10000h/клас А с осветително тяло 2 
	Забележки: *1. Измерванията са проведени с калибрирани уреди:* ▪ *Digital LUX Tester BEHA (93-1065L)* ▪ *Термометър EXTECH* ▪ *Термохигрометър, тип TESTO* *2. Светлотехническите измервания са проведени при номинално захранващо напрежение 220V/AC. Измерванията са проведени при* $t_{ок\ ср} = 24{,}5^0C$ *и влажност 43%*		 LED 45 - E27/2,5W/230V/50Hz/ 30000h

Както се вижда получената крива за светодиодната ретрофит лампа има концентриран характер и ограничено приложение. За оценяване на ефективността на

този вид конструкция в конкретното приложение е необходимо да се направят изследвания в комплект с вторична оптика.

2.2. Определяне на КПД на осветителите [2]

Изчисленият по зависимостта (4) КПД е представен в табл.4.

$$\eta_{осв} = \frac{100.\Phi_{осв}}{1000}[\%] \quad (4)$$

Табл.4

Тип на осветителя	КПД, %
Halogen ECO E27/53W с осветително тяло 1	0,68
Halogen ECO E27/53W с осветително тяло 2	0,95
КЛЛ E27/15W с осветително тяло 1	0,69
КЛЛ E27/15W с осветително тяло 2	0,79

3. Анализ на получените резултати

1. Новите алтернативни електрически лампи са по-ефективни и са в полза на околната среда и потребителите. Въпреки че са по-скъпи, те са по-евтини като цяло, защото изразходват по-малко електричество.

2. Усъвършенстваните нажежаеми лампи (с халогенна технология) са същите по форма и качество на светлината като традиционните нажежаеми лампи, но по-ефективни (НЛ-ECO 53W, отговаря на 70W; НЛ-ECO 70W, отговаря на 92W). Светлоразпределението им е косинусоидално.

3. Компактните луминесцентни лампи са по-ефективни от нажежаемите лампи с халогенна технология. Произвеждат се с цветни температури 2700K, 4300K и 6400K. Ефективност 53-63 lm/W. Енергиен клас „А”. Продължителност на работа 8000-10000h. Не подлежат на димирани.

4. Светодиодните (LED) лампи са универсални заместители на класическите нажежаеми лампи и много по-ефективни и дълготрайни. Те имат около 7-10 пъти по-ниска консумация на енергия и около 10 пъти по-дълъг живот от тях. LED лампите със стандартен цокъл E27/E14 не се нуждаят от никаква допълнителна промяна на електроинсталацията. Издържат на чести комутации. Светват с максимален интензитет от самото начало. С по-богат избор на цветни температури но не всички модели подлежат на димиране. Все още не се използват масово в бита поради високата цена (E27/12W/810lm/60лв; E27/14,5W/1055lm/75лв; E14/4W/200-250lm/25лв) [8].

5. Светлоразпределението на изследваната лампа LED45 е концентрирано и не е подходящо поставянето ú в битово осветително тяло.

6. По-добрият критерий, при избор на лампа е излъчвания светлинен поток (lm), а не електрическата мощност (W). Светлинният поток на изследваната усъвършенствана нажежаема лампа 53W е 840lm. Светлинният поток на изследваната КЛЛ 15W е 800lm. За да се намери равностойна LED лампа, е необхо-

димо да се търси такава, с поток около 800 lm, без да се обръща внимание на електрическата мощност във ватове.

Литература

[1] Пачаманов А., ***Електроснабдяване и осветителна техника I-ва част /Основи на осветителната техника/***, ТУ-София, 2011

[2] Пачаманов А., Рац Н. ***Ръководство за лабораторни упражнения по осветителна и инсталационна техника***, ТУ-София, 2005

[3] Глухов А***., Конструкция светодиодной лампы для прямой замены лампы накаливания общего назначения***, „Полупроводниковая светотехника", 2011, №2, с. 45-48

[4] Недева М., Василев Хр. ***Технически решения за светодиодно осветление на жилища***, Енергиен форум-2013, МДУ „Ф. Ж. Кюри", к. к. „Св. Св. „Константин и Елена" - Варна

[5] *http://ec.europa.eu/energy/lumen/index_bg.htm*

[6] *http:// krushki.com*

[7] *http://www.dianid.com*

[8] *http://led.omega-light.com*

Автор: маг. инж. Милена Недева, Технически колеж - Смолян, докторант докторант, катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *nedeva_m@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** гл. ас. д-р К. Николова

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАГНИТНИ КЛЮЧОВЕ С АМОРФНИ И НАНОКРИСТАЛНИ МАТЕРИАЛИ

Михаела Славкова, Костадин Миланов, Минчо Минчев

Резюме: *В статията се предлага едно ново приложение на аморфни и нанокристални магнитно меки материали с линеен хистерезисен цикъл тип „F” при несиметрични режими в магнитни ключове, използвани в системи за компресиране на магнитни импулси (Magnetic Pulse Compression Systems – MPCS). Първоначалното състояние на магнитопроводите с линейни характеристики при несиметрични режими се възстановява по естествен път и не е необходимо използването на размагнитваща намотка. Представени са основните изисквания към материалите, използвани в магнитни ключове и е аргументиран избора на материали с линейни магнитни характеристики при несиметрични режими. Направена е съпоставка между изчислителните мощности на магнитни ключове с магнитни материали с правоъгълен хистерезисен цикъл тип „Z” и при използване на материали с линеен тип „F” хистерезисен цикъл.*

Ключови думи: *аморфни магнитно меки материали, аморфни и нанокристални материали, линейни магнитни характеристики, магнитни ключове, нанокристални магнитно меки материали, компресиране на магнитни импулси*

STUDY OF MAGNETIC SWITCHES WITH AMORPHOUS AND NANOCRYSTALLINE MATERIALS

Michaela Slavkova, Kostadin Milanov, Mintcho Mintchev

Abstract: *The presented paper proposes a new application of amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials with linear hysteresis loop type "F" at asymmetrical modes in magnetic switches used in Magnetic Pulse Compression Systems - MPCS. The initial state of the magnetic cores with linear magnetic characteristics at asymmetrical modes recovers naturally and the usage of the demagnetization coil is not necessary. The basic requirements for the materials used in magnetic switches are presented and the selection of materials with linear magnetic characteristics at asymmetrical modes is reasoned. A comparison between the computational power of magnetic switches, with magnetic materials with rectangular hysteresis loop type "Z" and the usage of materials with linear hysteresis loop type "F", is made.*

Keywords: *amorphous soft magnetic materials, amorphous and nanocrystalline materials, linear magnetic characteristics, magnetic switches, nanocrystalline soft magnetic materials, magnetic pulse compression*

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. Въведение

Магнитни ключове за генериране на мощни токови импулси са изобретени за първи път от Мелвил през 1940 година и внедрени в радари във Великобритания [1]. Материалът е публикуван през 1951 година със заглавие “The Use of Saturable Inductors as Discharge Devices for Pulse Generators” – това са и първите системи за компресиране на магнитни импулси. Поради високата си цена, голям обем, липса на подходящи магнитни материали, тогава те не придобиват популярност [1].

В последните години, независимо от това старо приложение, с развитието новите феромагнитни материали и технологии магнитните ключове намират твърде разнородни и разширяващи се приложения. Това е следствие и на усъвършенстването на полупроводникови превключватели като тиристори и др., които са с отлични характеристики [1], [2], [3].

Това позволи използването на магнитни ключове с висока скорост на комутация при ниски загуби. Поради високата си честота на повторение, висока стабилност и дълъг живот получената енергия на единичните импулси, генерирана от системи за компресиране на магнитни импулси, има индустриално приложение в импулсно възбуждане на квантови генератори, ексимер лазери, ускоряване на елементарни частици, тиратрони, радиолокационни системи, източници на ултравиолетова светлина и биохимично обеззаразяване [1], [5].

В системите за компресиране на магнитни импулси най-важен компонент е магнитният ключ. Той се състои от дросел с феромагнитна сърцевина. Всички препоръки за проектиране на магнитните ключове са да се изпълняват с магнитно меки материали с нелинейни магнитни характеристики тип “Z” или познатия правоъгълен хистерезисен цикъл [5].

Процесът на комутация се осъществява поради промяна на работната точка на магнитопровода вследствие на насищане на феромагнитния материал. Магнитните ключове се характеризират с магнитна индукция на насищане и с точка на превключване. Необходимо е включването и на размагнитващи намотки, което способства за връщането на работната точка в изходното ненаситено състояние при несиметрични режими на работа [5].

Новата предложена концепция е използването на магнитни материали с линейни характеристики тип „F” или познатият линеен хистерезисен цикъл, при което не е необходимо използването на размагнитващи намотки за правилното функциониране на ключовете при несиметрични режими [6],[7].

Поради високата честота на изменение на работната точка на магнитопровода се работи с динамичните му характеристики. При това влияят и свойствата на самия магнитен материал като магнитна еластичност и вихрови токове, които са зависими и от геометрията и конструкцията на магнитопровода. Затова и в двата случая се използват магнитопроводи с тороидална форма с цел максимално оползотворяване на възможностите на материала [4].

2. Магнитни ключове. Материали

За дросел с тороидален магнитопровод индуктивността в ненаситено състояние може да се определи по формулата:

$$L_u = \frac{\mu_0 \mu_{ru} A_e w^2}{l} \quad (1)$$

където L_u е индуктивността на дросела в ненаситено състояние [H], μ_0 е магнитната проницаемост на вакуум [H/m], μ_{ru} е относителната магнитна проницаемост в ненаситено състояние на магнитномекия материал [-], A_e е сечението на магнитопровода [m^2], w е броят на навивките на дросела [-], l е средната дължина на магнитната силова линия [m]. [1], [4]

За дросел с тороидален магнитопровод индуктивността в наситено състояние може да се определи по формулата:

$$L_s = \frac{\mu_0 \mu_{rs} A_e w^2}{l} \quad (2)$$

където L_s е индуктивността на дросела в наситено състояние [H], μ_{rs} е относителната магнитна проницаемост в наситено състояние на магнитномекия материал [-] [1], [4].

Съотношението на индуктивностите на дросела в наситено и ненаситено състояние се определя като отношението на магнитните проницаемости в съответното състояние или:

$$\frac{L_u}{L_s} = \frac{\mu_{us}}{\mu_{rs}} \quad (3)$$

На база на (3) могат да се формират и изискванията към магнитно меките материали, подходящи за приложение в магнитни ключове. Те зависят от характеристиките на материала в наситено и ненаситено състояние, трябва да са с висока магнитна индукция на насищане, с ниски загуби от пренамагнитване и вихрови токове (с добра междуслойна изолацията на магнитопровода), ниска магнитосткрикция и др. [1], [7].

Една от основните характеристики на магнитния ключ е неговата превключвателна възможност. Тъй като ширината на импулса се скъсява, при поетапното възбуждане на системите за компресиране на магнитни импулси, то превключвателната възможност се влошава. Въпреки това, с цел увеличаване на ефективността и подобрение на проектирането на магнитопроводи за магнитни ключове. е необходимо да се изследват и измерват характеристиките на импулса.[7]

3. Съпоставка на изчислителни мощности при два типа материали

Изчислителната мощност на електромагнитни устройства (както за дросели, така и за трансформатори) е пропорционална на произведението от сечение на магнитопровода и на прозореца на магнитопровода, в който се разполагат намотките.

$$P_{изч} \approx A_e A_w \quad (4)$$

където, A_e е сечението на магнитопровода [m^2], A_w е сечението на прозореца на магнитопровода [m^2],

При проектиране на магнитопроводи с правоъгълен хистерезисен цикъл тип „Z" ("H") се взема под внимание, че размагнитващата намотка е с магнитовъзбудително напрежение не по-малко от това на работната. За работната намотка може да се запише следния израз:

$$wA_e\Delta B = \int u_1 dt \tag{5}$$

където w е броят на навивките на намотката (дросела) [-], A_e е сечението на магнитопровода [m^2], ΔB е изменението на работната индукция [T], u_1 – приложеното напрежение [V], независимо от типа на магнитопровода (с правоъгълен или линеен хистерезисен цикъл). Може да се определи площта на първичната работна намотка чрез:

$$A_c = \frac{wq}{k_3} \tag{6}$$

където q е сечението проводника [mm^2], κ_3 е коефициентът на запълване на намотката [-].

Ако се използва размагнитваща намотка, както е случаят с магнитопроводи от магнитно меки материали с правоъгълен хистерезисен цикъл при несиметрични режими, то нейната площ може да се изчисли по аналогичната формула - (5). Следователно за дросели, с магнитопроводи с тип „Z" (H) хистерезисни цикли, площта на двете намотки се определя с уравнението:

$$A_{c\Sigma} = 2\frac{wq}{k_3} \tag{7}$$

Изменението на работната магнитна индукция ΔB за феромагнитни материали с правоъгълен или "Z" (H) хистерезисен цикъл се определя с:

$$\Delta B_Z = B_s - (-B_r) = B_s + B_r \tag{8}$$

$$B_r \geq 0.95B_s \tag{9}$$

$$\Delta B_Z = 1.95B_s \tag{10}$$

където B_r остатъчната магнитна индукция [T], а B_s е магнитната индукция на насищане [T] на феромагнитния материал.

Изменението на работната магнитна индукция ΔB за феромагнитни материали с линеен или "F" (L) хистерезисен цикъл се определя с:

$$\Delta B_F = B_s - B_r \tag{11}$$

$$B_r \leq 0.05B_s \tag{12}$$

$$\Delta B_F = 0.95B_s \tag{13}$$

Така може да се определи изчислителната мощност за дросели, изработени от двата типа феромагнитни материали. В общия случай за изчислителната мощност може да се запише следния израз:

$$P_{изч} = A_e A_w K \tag{14}$$

където K е коефициент, зависещ от конструкцията и електромагнитното натоварване.

За магнитопроводи с правоъгълен хистерезисен цикъл – "Z" (H) при наличие на размагнитваща намотка, при несиметрични режими на работа, изчислителната мощност се определя с израза:

$$P_{изчZ} = A_e A_w K = \frac{\int u_1 dt}{w\Delta B_z} 2\frac{wq}{k_3} K = \frac{\int u_1 dt}{1.95 B_s} 2\frac{I}{jk_3} K = 1.02\frac{I\int u_1 dt}{B_s k_3 j} K \qquad (15)$$

където j е токовата плътност [A/mm^2]

За магнитопроводи с линеен хистерезисен цикъл – "F" (L) без размагнитваща намотка, при несиметрични режими на работа, изчислителната мощност се определя с израза:

$$P_{изчL} = A_e A_w K = \frac{\int u_1 dt}{w\Delta B_z}\frac{wq}{k_3} K = \frac{\int u_1 dt}{0.95 B_s}\frac{I}{jk_3} K = 1.05\frac{I\int u_1 dt}{B_s k_3 j} K \qquad (16)$$

Получената стойност за изчислителната мощност на магнитопроводи с линейни магнитни характеристики е малко по-висока като стойност при равни други условия. Това ни дава основание да заключим, че е подходящо те да бъдат използвани в определени случаи с цел елиминиране на размагнитващата намотка при несиметрични режими на работа. При симетрични режими на работа работната точка на магнитопровода се възвръща в изходно положение и без размагнитваща намотка и ефективността от използването на магнитни материали с линейни магнитни характеристики не е обосновано. Подходящи материали с линейни характеристики са аморфните и нанокристални материали, тъй като при тях линеаризацията се постига чрез специална термообработка на самия материал преди или след получаването на готовия магнитопровод.

4. Заключение

В статията е предложено ново решение с използване на магнитни материали с линеен хистерезисен цикъл в магнитни ключове работещи при несиметрични режими. С използването на тези материали се елиминира размагнитващата намотка, тъй като магнитоповодът може да се възвърне в първоначалното си работно състояние по естествен път. Направена е съпоставка на изчислителните мощности и е доказана ефективността на магнитопроводите с линейните магнитни характеристики.

Литература

[1] Choi J. (2010), ***Introduction of the Magnetic Pulse Compressor (MPC) - Fundamental Review and Practical Application***, Journal of Electrical Engineering & Technology, 2010, Vol. 5, No. 3, pp. 484-492

[2] Metglas Inc., ***Pulse Power Core***, 2003-2013.

[3] Hitachi Metals Ltd., ***Nanocrystalline soft magnetic material FINEMET***, Brochure No. HL-FM10-C, 2005

[4] Минчев М., Пенчев П. (1976), ***Безконтактни апарати***, Техника, София, 1976

[5] Меерович Л., Ватин И., Зайцев Э., Кандыкин В. (1968), ***Магнитные генераторы импульсов***, Советское радио, Москва, 1968

[6] Magnetics, ***Magnetic Cores for Pulse Compression***, Application Note BULLETIN TWC-S7, 2013

[7] Zhang D., Yan P., Sun Y., Yang J., Zhou Y., Pan R. (2009), ***Characteristics of Magnetic Core in Magnetic Pulse Compression System***, Acta Physica Polonica A, 2009, Vol. 115, No. 6, pp. 1001-1003

[8] Nunnally, W. (1982), ***Magnetic Switches and Circuits***, Los Alamos, NM 87545 Report Number LA-8862-MS, pp. 01-37

Автори: Михаела Славкова, гл. ас., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *michaela_ds@tu-sofia.bg***;** Костадин Миланов, ас., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *k.milanow@abv.bg***;** Минчо Минчев, проф. дтн, катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mintchev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** проф. дтн Илиана Маринова

ЗАМЯНА НА ВЪЗБУДИТЕЛНА НАМОТКА НА ПОСТОЯННОТОКОВ ДВИГАТЕЛ С ПОСЛЕДОВАТЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ С ВЪЗБУЖДАНЕ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Михо Михов, Пламен Накев, Младен Сариев

Резюме: *В работата е представен подход за замяна на възбудителната система на постояннотоков двигател с последователно възбуждане с такава с постоянни магнити. Направени са модели на двата вида машини в средата на FEMM и с получените данни са построени механическата и скоростната характеристики,определена е електромагнитната мощност. Направено е сравнение с резултатите от изпитванията на изходния постояннотоков двигател с последователно възбуждане.*

Ключови думи: *постояннотоков двигател с последователно възбуждане, възбудителна намотка, постоянни магнити, моделиране*

REPLACEMENT OF BRUSHED DC MOTOR`S STATOR SERIES EXCITATION WINDING WITH A PERMANENT MAGNET EXCITATION

Miho Mihov, Plamen Nakev, Mladen Sariev

Abstract: *The presented paper illustrates a speciffic approach of replacing the series excitation winding of a brushed DC motor with a permanent magnet excitation system. There are developed FEMM models for both machines which provide data to construct mechanical and speed characteristics as well as to determine electromagnetic power. Based on the results is created comparison between both machines.*

Keywords: *DC brushed motor with series excitation winding, excitation winding /coil/, permanent magnets, modeling*

1. Въведение

Известни са предимствата на постояннотоковите двигатели с последователно възбуждане /ПТД-ПВ/ при използването им за задвижване на превозни средства. Има информация, че двигатели с последователно възбуждане се използват и за основното задвижване на моторна лодка /скутер/, но поради нужната голяма мощност - от една страна и не особено достъпните цени на съответстващите акумулатори – от друга, тази област на приложението им все още не е в напреднал стадий на развитие.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Оказва се, обаче, че такъв двигател тип **ЕС 1.7/1.2/44-01** се използва успешно за задвижване на устройство за маневриране т.н. „stern thruster", кърмово весло / витло при моторната лодка

И тук, естествено възниква въпросът за потреблението на електроенергия на електродвигателя, тъй като захранването е от електрически акумулатори. От това произтича и задачата на настоящата разработка, а именно – намаляване на електрическите загуби в двигателя, без да се променят параметрите на работната му точка.

Един, станал вече традиционен подход в такива случаи, приложен, например, при ръчния електроинструмент, е замяната на възбудителната система с намотка с възбудителна система с постоянни магнити /ПТД-ПМ/. Последното е обусловено от благоприятното обстоятелство, че постиженията в областта на постоянните магнити са много високи, както по отношение на енергийните показатели - обемната плътност на запасената магнитна енергия, така и по отношение на постигнатите технологични възможности за производството на магнити с необходимите рамери.

Този подход, с такава замяна, ще бъде приложен и при решаване на нашата задача, като ще бъде направен опит да се покаже и част от настъпилите изменения в характеристиките на новата машина - вече с възбуждане с постоянни магнити.

2. Обект на изследване

Обектът на изследване /ПТД-ПВ/ е споменатия по-горе изходен двигател ЕС 1.7/1.2/44-01 от производствената номенклатура на завод „Kostov-Motors [1] със следните данни (по изпитвателен протокол):

$P_n = 1.79$ kW; $U_n = 10.5$ V /постоянно напрежение/ $I_n = 250$ A;

$n_n = 4200$ min^{-1} ; $M_n = 4.07$ Nm; $2p = 4$; $Z_2 = 29$;

$R_{a\,t} = 0.001145\ \Omega$; $R_{c\,t} = 0.002538\ \Omega$; $2\Delta U_ч = 2.78$ V;

Посока на въртене – реверсивен;

Възбуждане – последователно;

Котвената и възбудителната намотки са изработени от шини.

3. Математически апарат за изготвяне на модела

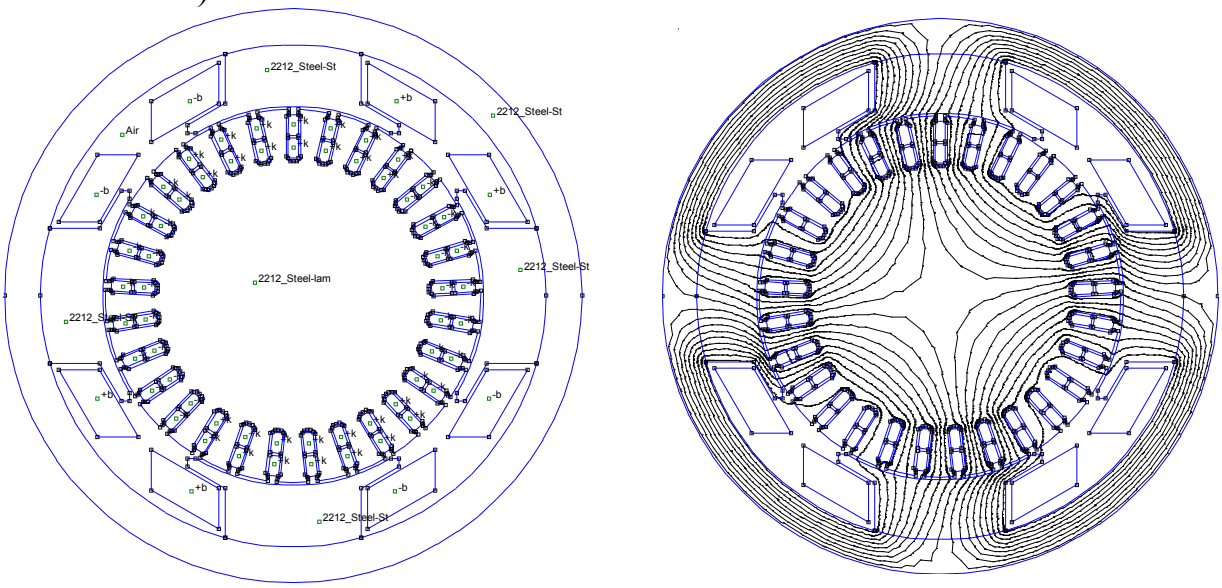
Математическият модел на изходния двигател /с възбудителна последователно свързана намотка/ е изготвен в средата на FEMM [5,6], като едно от благоприятните обстоятелства в случая е, че токът в намотките е постоянен, т.е. решава се стационарна задача за магнитното поле.

Друго благоприятно обстоятелество е , че машината е реверсивна, което определя разположението на четките в геометричната неутрална линия с произтичащото от това разпределението на каналните токове.

4. Решение на задачата

4.1. Избор на възбудителна система с постоянни магнити удовлетворяваща изискването за неизменност на параметрите в работната точка

За да се осъществи коректно замяната на възбудителната намотка с еквивалентни по въздействието си в работната точка на машината постоянни магнити е целесъобразно да се построят модели в една и съща среда (в случая-FEMM), както на изходната машина ПТД-ПВ, така и на новата машина ПТД-ПМ. На фиг.1.а е показан модела на ПТД-ПВ в препроцесора на FEMM, а на фиг.1.б – решението, в частност разпределението на магнитното поле при захранване с номинален ток (отклоненията от симетричното разпределение на полето се дължат на напречната реакция на тока на котвата, и отчасти на нечетния брой канали в котвата).



а) б)

Фиг.1. Модел на ПТД-ПВ в средата на FEMM,
1.а - в препроцесора, 1.б - в постпроцесора

Решението на задачата трябва да съдържа:

- избор на подходяща форма на полюсната система;
- избор на ВН характеристиките на магнита;
- размери – в частност височина /дебелина, обем/.

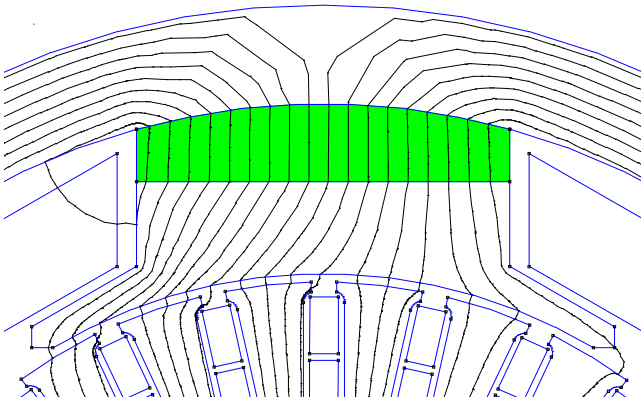
Отчитайки, че съществуващия полюсен накрайник-конфигурацията на полюса към въздушната междина- отговаря на функционалните изисквания на машината е взето решение той да бъде запазен и при ПТД-ПМ.

По технико-икономически съображения при изследванията са използвани магнити от каталога на „Pramiz”[7].

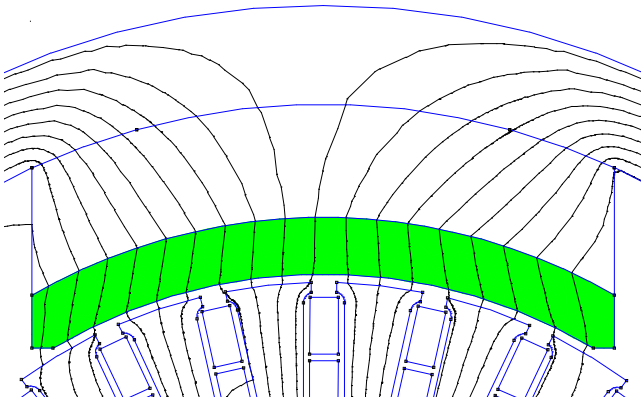
Изследвани са следните полюсни конструкции и материали:

- РЕДКОЗЕМЕН магнит NFB38, като ВЛОЖКА в полюсното тяло - фиг.2;
- РЕДКОЗЕМЕН магнит NFB38 като полюсен накрайник –ДЪГА - фиг.3.

Същата конструкция – ДЪГА (фиг.3) е изследвана и с ФЕРИТЕН анизотропен магнит Hfer 30/22.

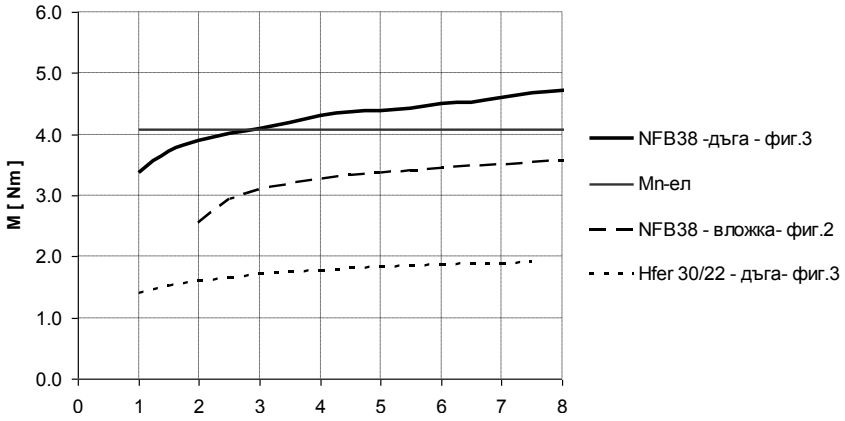


Фиг.2



Фиг.3

На фиг.2 и фиг.3 е маркирано сечението от полюса заето от магнита.



Фиг.4

Изследването за равнозначна замяна на възбудителя е проведено при следните условия и последователност, които биха съответствали на работа с материалния физически обект:

- в модела на ПТД-ПМ в средата на FEMM магнитопроводът на котвата, котвената намотка,тока в нея и магнитопроводът на статорното тяло са същите, както в модела на ПТД-ПВ
- задават се магнитните характеристики на магнита и се правят модели с изменяща се големина на височината му ***h***.
- решава се задачата и в постпроцесора на FEMM се отчита електромагнитния момент M_δ.
- построяват се зависимостите $M_\delta = f(h);\ I = I_n = const.$ за различните типове възбудителни системи и се определя при коя от тях се получава зададения в началото момент. Резултатите от горните построения са показани на фиг.4.

На основата на направените изследвания (фиг.4) са направени следните констатации :

- Вариантите с редкоземен магнит NFB38 - вложка (фиг.2) и с феритен анизотропен магнит (фиг.3) не предлагат решение, тъй като в предоставения обем от конструкцията не може да се получи нужния момент;
- На фиг.4 се вижда, че при варианта с редкоземен магнит NFB38 – полюсен накрайник – дъга (фиг.3) височината на магнита, при която се получава решение е от порядъка на 3 mm. Това решение е вложено в конструкцията на изследваната по-нататък машина - ПТД-ПМ.

4.2. Механична и скоростна характеристики на ПТД-ПМ и ПТД-ПВ

Построяването на механичната (фиг.5) и скоростната характеристики на ПТД-ПМ (фиг.6) с редкоземен магнит NFB38, оформен като дъга с височина /дебелина/ ***h=3mm*** се прави на основата на известните зависмости [2,3,4]:

$$M = \Psi I \tag{1}$$

$$E = \Psi \Omega \tag{2}$$

$$U = E + IR_a + IR_c + 2\Delta U_ч \tag{3}$$

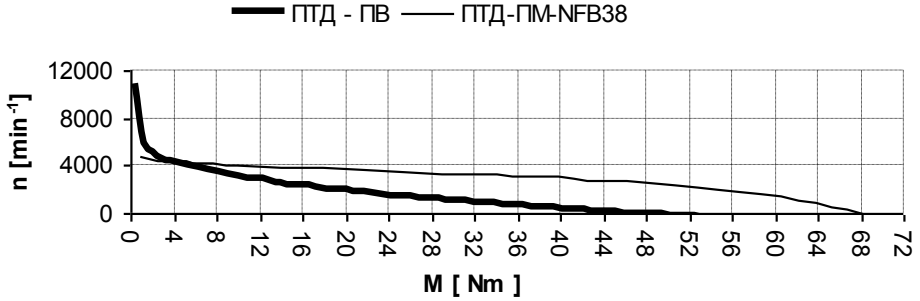
$$\Omega = \frac{U - \left(IR_a + IR_c + 2\Delta U_ч\right)}{\Psi} \tag{4}$$

$$n = \frac{(60)\Omega}{2\pi} \tag{5}$$

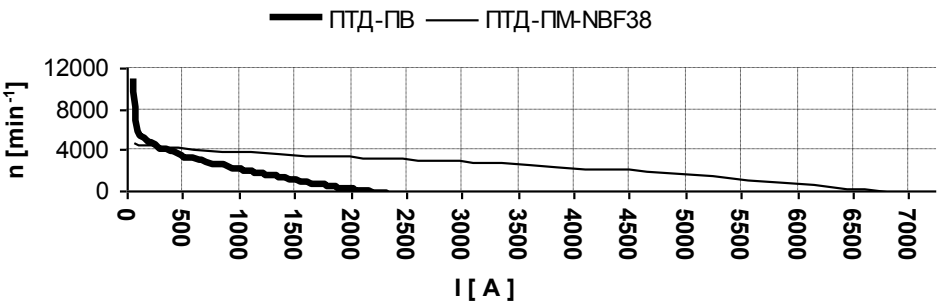
където:

M е моментът отчетен от модела в средата на FEMM при зададен ток I ;

Ψ е потокосцеплението на котвената намотка,определено от (1), независимо, какъв е източникът на възбудителното поле.



Фиг.5. Механични характеристики на ПТД-ПВ и ПТД-ПМ



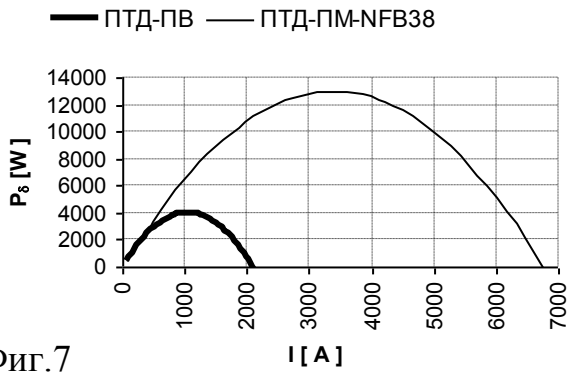
Фиг.6. Скоростни характеристики на ПТД-ПВ и ПТД-ПМ

Възможността да се определи е.д.н. позволява да се определи електромагнитната мощност на машините (фиг.7):

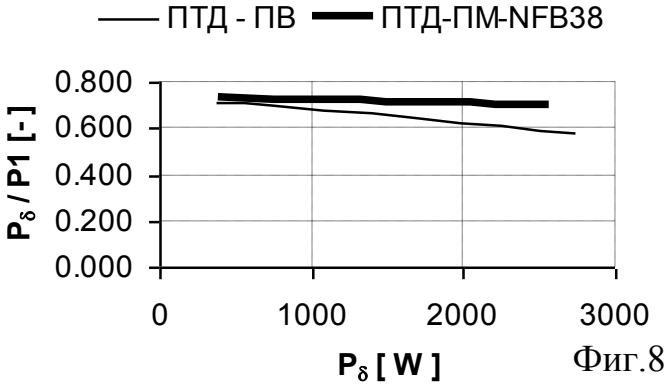
$$P_\delta = E\,I \tag{6}$$

а така също и КПД на електромагнитнта мощност (фиг.8):

$$\eta_\delta = \frac{P_\delta}{P_1} \tag{7}$$

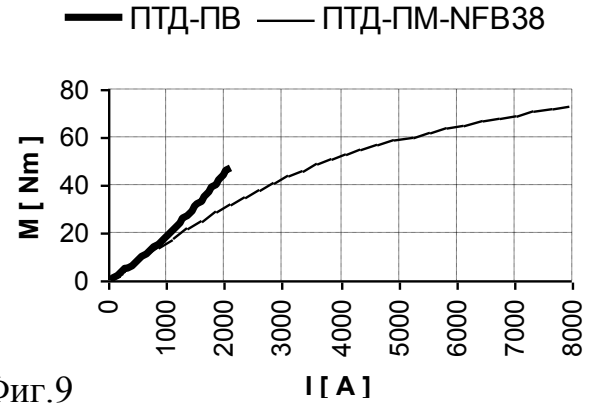


Фиг.7

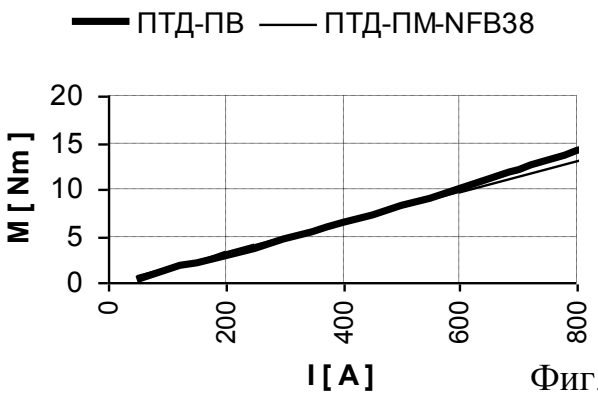


Фиг.8

Моделите на двете машини в средата на FEMM дават възможност да бъде построена и зависмостта $M = f(I)$ фиг.9 и фиг.10, като последната представлява увеличено същото изображение в интервала на натоварване, в който те практически се препокриват.



Фиг.9



Фиг.10

5. Заключение

1. Отклонението между резултатите за номиналната точка на физическия обект – ПТД-ПВ и тези на моделите са представени в табл.1.

2. В резултат от отпадането на загубите във възбудителната намотка, които са от порядъка на ***160 W*** в номинален режим, условно въведения К.П.Д. на електромагнитната мощност при ПТД-ПМ е чувствително по- голям от този при ПТД-ПМ /фиг.8/, което показва положителния ефект от подхода при решаването на поставената задача.

Табл.1

Източник на данни	I_a, A	M, Nm	Откл. на M спрямо протокола	n, min^{-1}	Откл. на n спрямо протокола
Протокол - посл.възб	250	4.07	-	4200	-
Каталог - посл.възб	250	3.69	-9.35%	4400	4.76%
FEMM - посл.възб	250	3.68	-9.50%	4407	4.94%
FEMM - пост.магн.	250	4.04	-0.66%	4390	4.52%

3. Пресечната точка /точката на замяната/ между механическите характеристики в моделите е с координати $M = 3.683\,\mathrm{Nm}; n = 4410\,\mathrm{min}^{-1}$, а при скоростните - $I = 254\,A, n = 4386\,\mathrm{min}^{-1}$ фиг. 5 и фиг.6.

4. В рамките на предоставения обем на конструкцията, електромагнитната мощност на ПТД-ПМ е чувствително по-голяма от тази на ПТД-ПВ фиг.7.

5. Интервалът на изменеие на електромагнитния момент на ПТД-ПМ е по-широк от този на ПТД-ПВ – фиг.9, като в границите на експлоатационните натоварвания двата сравнянвани момента практически са равни – фиг.10.

6. По-големите стойности на пусковия ток при ПТД-ПМ не влияят съществено върху увеличената консумация на ток от акумулаторната батерия по време на пусковия процес, който протича за по-кратко време,отколкото при ПТД-ПВ поради по високия пусков момент.

7. Вижда се, че вида на получените механически и скоростни характеристики на ПТД-ПМ съответства/очаквано/ на тези на постояннотоковите двигатели с ПАРАЛЕЛНО ВЪЗБУЖДАНЕ, което може да се приеме, както като косвено потвърждение за технологично коректното изпълнение на модела, а така също и като добра възможност за прилагане на представения подход за замяна на такъв вид възбудителна система със система с постоянни магнити. В този случай, естественно, може да се осъществи препокриване на характеристиките в още по-широк диапазон.

Литература

[1] “Kostov-motors”, *http://kostov-motors.com*

[2] Ангелов, А., Д. Димитров*, Електрически машини част II”,* С., Техника, 1988

[3] Постников, И.,” *Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин,* М., Высшая школа, 1975

[4] Божилов Г.,” *Преходни процеси и обобщена теория на електрическите машини”,* С., 2007

[5] Meeker D. *Finite Element Method Magnetics, Ver. 3.3, User’s Manual*, May 24, 2003

[6] Брандиски, К., И. Ячева. “*CAD системи в електромагнетизма*”, С., Сиела, 2002.

[7] “Pramiz“, *http://www.pramiz.com/frambgp.html*

Автори: инж. Михо Михов, доц. д-р, катедра ”Електрически машини”, Електро-технически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mpmi@tu-sofia.bg*; Инж. Пламен Накев, изпълнителен директор, Балканкар ЗПДЕА «Г. Костов» АД; Младен Сариев, маг. инж., конструктор, Балканкар ЗПДЕА «Г. Костов» АД

Постъпила на 09.02.2013 **Рецензент:** гл. ас. д-р Адриан Иванов

ИНДУКТИВНОСТИ ПО ОСИТЕ d , q НА СИНХРОНЕН РЕАКТИВЕН ДВИГАТЕЛ С РАЗПРЕДЕЛЕНА СТАТОРНА НАМОТКА – ОПИТНО И ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ

Михо Михов, Димитър Сотиров, Адриан Иванов

Резюме: *В работата е представен подход за определянето на индуктивностите по осите d и q на синхронен реактивен двигател посредством числен модел, който съчетава използване на резултати от изчисленията в средата на FEMM и стойности на величини въведени в обобщената теория на електрическите машини. Характерното в случая е, че той интерпретира утвърден в практиката подход за определяне на индуктивностите чрез физически измервания. Направено е сравнение на резултатите получени и по двата начина.*

Ключови думи: *синхроненен реактивен двигател, индуктивности по осите d и q, FEMM*

d, q AXES INDUCTANCES OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR WITH DISTRIBUTED STATOR WINDING – EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH

Miho Mihov, Dimitar Sotirov, Adrian Iwanov

Abstract*: The work presents an approach to define inductances of d and q axis synchronous reluctance motors using a numerical model that combines the application calculations in the middle of FEMM and values of the variables, introduced in the general theory of electrical machines. What is representative in this case, is that it interprets the well-established approach for determining the inductance by physical measurements. It is presented and a comparison between both models of calculating results.*

Keywords*: synchronous reluctance motor, d, q axes inductances, FEMM*

1. Въведение

В [1,2,3] са показани предимствата и предпоставките за развитие на синхронните реактивни двигатели с разпределена статорна намотка /СРДРСН/. Идеята на този тип електродвигатели стана актуална през последните години [1] вследствие достигане на високите нива на качество, технологичност и достъпност на преобразователната техника, използвана за честотно и векторно управление както за класическите асинхронни задвижвания, така и за този вид реактивни двигатели [4,5].

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

В [3] е показан подход за определяне на индуктивностите на СРДРСН при различни положения на ротора, като резултатите потвърдиха резултати от подобни изследвания [6].

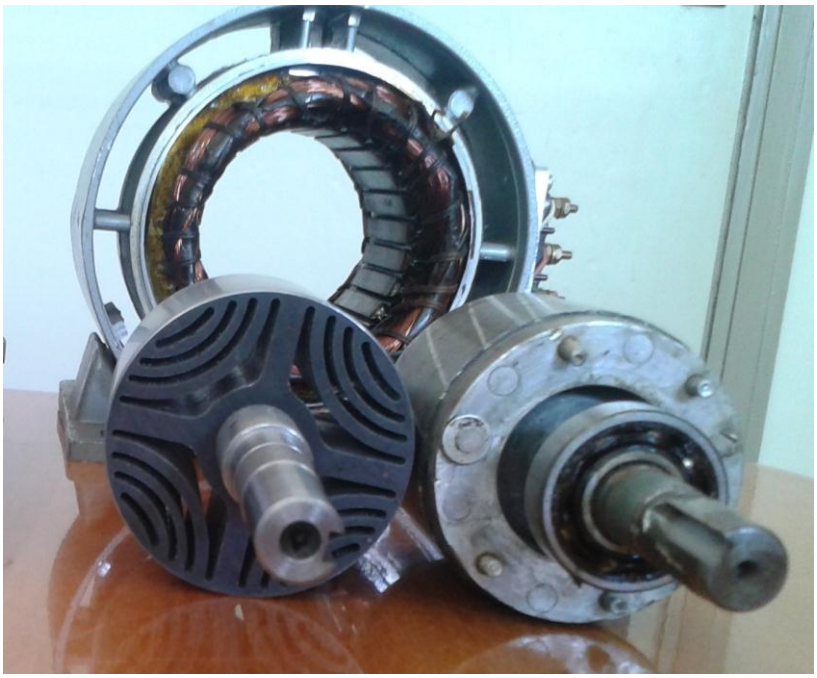
В настоящата разработка са определени индуктивностите L_d, L_q по начин, станал традиционен при експериментално изследване на реактивни двигатели, като резултатите са съпоставени с тези от числения модел в средата на FEMM, възпроизвеждащ обстоятелствата на опита.

2. Данни за обекта на изследването

Физическият обект на изследването е СРДРСН със статор на трифазен асинхронен двигател тип АО-021/4 с данни:

$$U = 380/220V; P_n = 250W; 2p = 4; I_n = 0.73A$$

и реактивен ротор с напречна геометрия, както е показано на фиг.1 [2,3]. Тази конструкция на ротора, съставена от напречно разположени пластини се означава като TLA (Transversally Laminated Anisotropic). Представеният ротор е проектиран и изработен от екип на катедра “ Електрически машини” при ТУ - София.



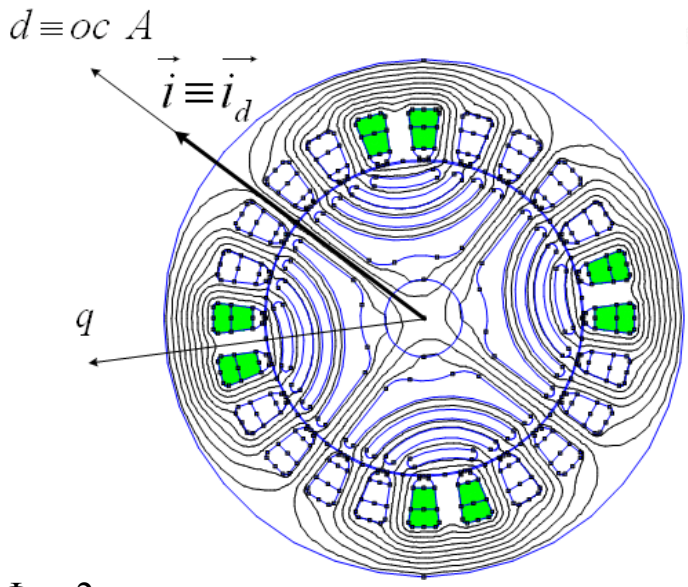
Фиг.1

3. Методика за опитно определяне на L_d и L_q

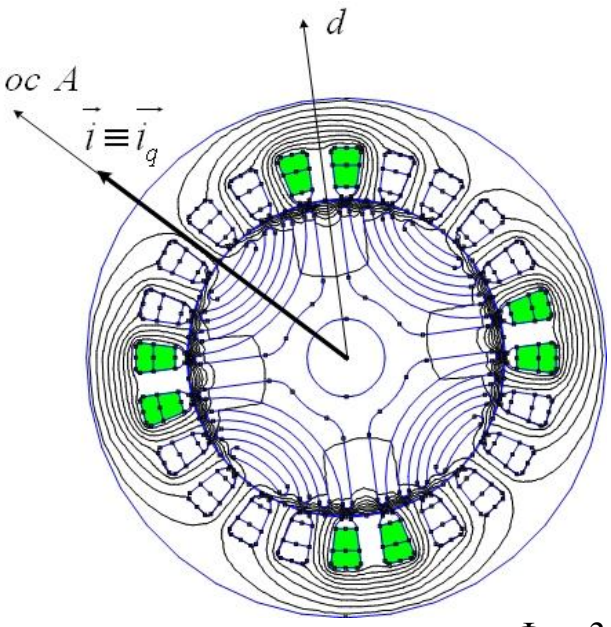
Както беше посочено, този поход е традиционен и в основата му е известната зависимост за електромагнитния реактивен момент:

$$M = \frac{pmU^2}{2\omega^2}\left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d}\right)\sin 2\theta \qquad (1)$$

Очевидно е, че в реален режим на експлоатация $M = 0$, при $\theta = 0; \theta = 90^0$, което се получава, когато магнитните оси d или q съвпаднат с оста на статорната фаза (фиг.2, фиг.3).



Фиг.2



Фиг.3

Електрическият ъгъл между осите d и q е 90^0 ел. и при зададената четирилюсна конструкция съответства на геометричен ъгъл 45^0 , както е показано на фигурите.

При това положение ако се захрани само една статорна фаза, за подаденото напрежение променливо напрежение $\dot{U}$ може да се напише уравнението:

$$\dot{U}_i = \dot{I}\left(r + j\,x_i\right);\ i = d, q \tag{2}$$

При явнополюсните синхронни машини, каквато е СРДРСН между стойностите на синхронните индуктивни съпротивления е в сила съотношението $x_d > x_q$. Следователно, при един и същ ток I съотношението между напреженията при посочените горе две устойчиви положения на ротора е $\left|\dot{U}_d\right| > \left|\dot{U}_q\right|$.

По-нататък:

$$Z_i = \frac{U_i}{I} \tag{3}$$

$$x_i = \sqrt{Z_i^{\,2} - r^2} \tag{4}$$

И търсената индуктивност по съответната ос е:

$$L_i = \frac{x_i}{\omega};\ \omega = 2\pi f \tag{5}$$

Препоръчва се измерването да се проведе при един и същ ток, роторът се поставя последователно в двете устойчиви положения $\theta = 0;\ \theta = 90^0$, при които $M = 0$ и се определят захранващите напрежения. Изчисленията се извършват по (3,4,5).

Резултатите за стойностите на индуктивностите в зависимост от стойността на тока са представени на фиг.4.

4. Числено определяне на L_d и L_q

Изследването е направено чрез моделите в средата на FEMM [7,8,9], обосновката и описанието на които са представени в [2,3].

Подходът при численото определяне на L_d и L_q съчетава използване на резултати от изчисленията в средата на FEMM и стойности на величини въведени в обобщената теория на електрическите машини [10], най-вече в областта на изобразяващите вектори, както следва:

- отправна ос за отчитане на ъглите е магнитната ос на фаза А – в случая единствената захранена фаза (на фиг.2, фиг.3 тя е поместена в маркираните канали);

- по определение изобразяващия вектор на тока е

$$\vec{i} = \frac{2}{3}\left(i_A(t) + \vec{a}\, i_B(t) + \overrightarrow{a^2}\, i_C(t)\right) \tag{6}$$

- в случай, че е захранена само фазата А, $i_B = 0;\ i_C = 0$:

$$\vec{i} = \frac{2}{3} i_A(t) \tag{7}$$

- целесъобразно е фазата А на модела да бъде “захранена” с постоянен ток със стойност равна на ефективната стойност на тока, както е при експеримента;

- в общия случай, в d,q - координатната система изобразяващият вектор има две съставки по двете координатни оси:

$$\vec{i} = \vec{i_d} + j\vec{i_q} \tag{8}$$

- в случай, че оста d съвпадне с магнитната ос на фаза А $/\theta = 0/$ -фиг.2:

$$i = \frac{2}{3} I_a = i_d \tag{9}$$

- в случай, че оста q съвпадне с магнитната ос на фаза А $/\theta = 90^0/$ - фиг.3:

$$i = \frac{2}{3} I_a = i_q \tag{9}$$

- потокосцеплението по оста d е

$$\Psi_d = L_d i_d = w\Phi_d \tag{10}$$

като потокът Φ_d по оста d се определя в средата на FEMM като поток перпендикулярен на оста q в границите на ротора:

$$\Phi_d = \Phi_{n\,q} \tag{11}$$

- потокосцеплението по оста q

$$\Psi_q = L_q i_q = w\Phi_q \tag{12}$$

като потокът Φ_q по оста q е равен на потока перпендикулярен на оста d в границите на ротора:

$$\Phi_q = \Phi_{n\,d} \tag{13}$$

- определянето на индуктивностите става по зависимостите:

$$L_d = \frac{w\Phi_d}{i_d}$$

$$L_q = \frac{w\Phi_q}{i_q} \tag{14}$$

С други думи, технологичната последователност на числено изследване е съответстваща на тази на опитното изследване на физическия обект:

- задава се стойност на тока I_a;

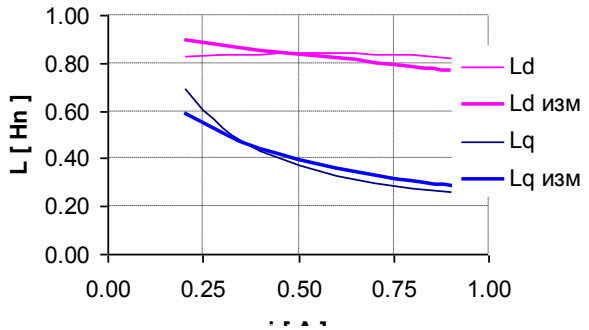
- задава се $\theta = 0$, разпределението на полето е от типа на това на фиг.2;

- използват се функционалните възможности на постпроцессора на FEMM за определяне на Φ_d (фиг.4);

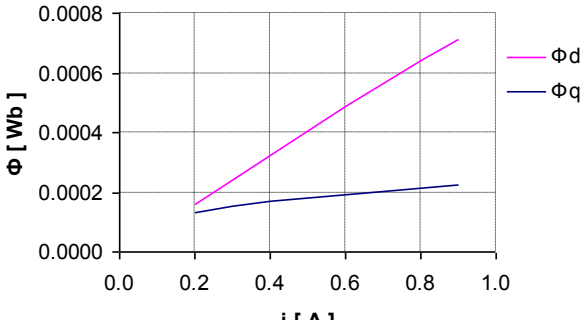
- по зависимост (14) се получава стойността на L_d.

За определяне на L_q се извършва принципно същата процедура с край в зависимост (14) при $\theta = 90^0 / \alpha_{ГЕОМ} = 45^0 /$.

Резултатите от числено решение са представени на фиг.4 съвместно с тези от опита.



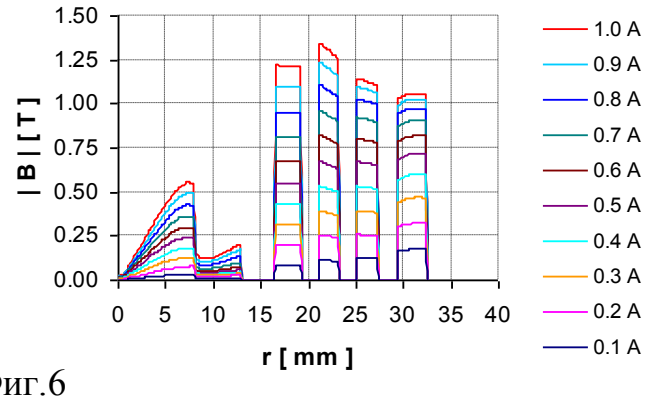
Фиг.4



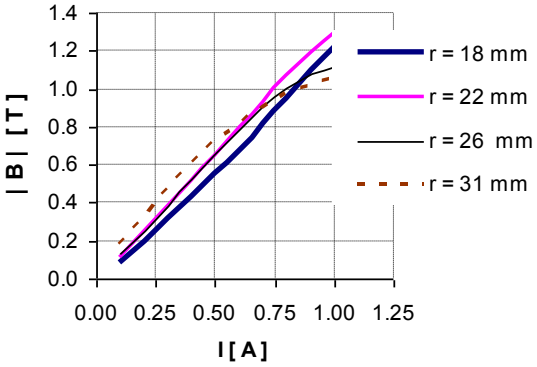
Фиг.5

От показаното на фиг.4 се вижда, че увеличението на тока води в общия случай до очаквано намаляване на измерените индуктивности по двете магнитни оси на машината. Изчислената индуктивност L_d остава практически постоянна, обстоятелство, което се дължи на почти линейната зависимост $\Phi_d = f(I)$ - фиг.5. Това се илюстрира от стойностите на индукцията в разглеждания интервал от токове $|B| < 1.4T$ /фиг. 6/, по оста q за $\theta = 0$ /фиг.2/. и извлечението от същите зависмости за точките от оста q в средите на магнитно проводящите области

между изрезите представено на фиг.7. При номинален ток $I_n = 0.73\,A$ стойността н индукцията е $|B| \approx 1.0\,T$.

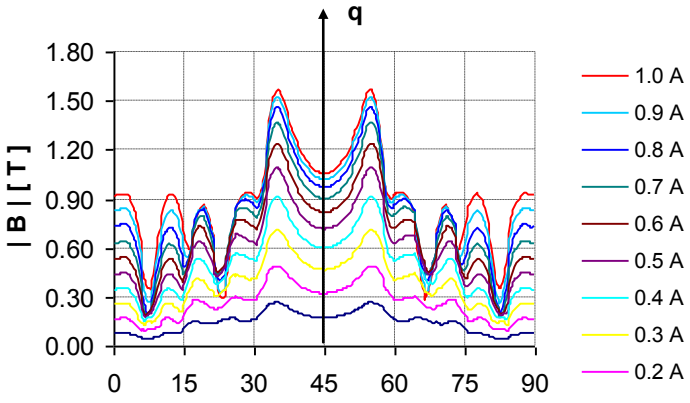


Фиг.6

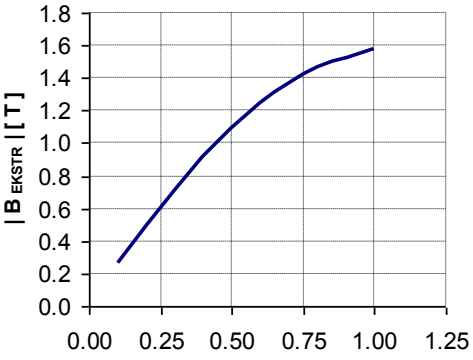


Фиг.7

Също така са ниски и индукциите в т.н. „мостчета" затварящи изрезите откъм въздушната междина. Влиянието на дебелината им върху стойността на електромагнитния момент бе изследвана и коментирана в [1]. На фиг.8 е показано разпределението на магнитната индукция в зоната на мостчетата в симетрично на оста q за разположение на ротора при $\theta = 0$ (фиг.2), а на фиг.9 е показана зависимостта на екстремните стойности на индукцията от фиг.8.

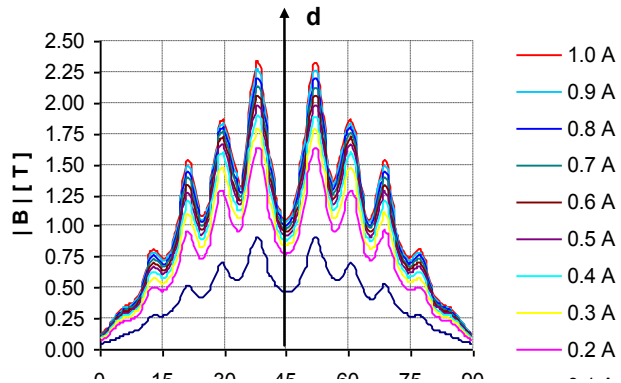


Фиг.8

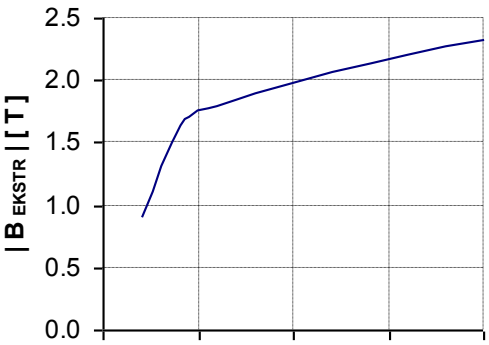


Фиг.9

Вижда се, че в края на разглеждания интервал от токове $|B| < 1.6T$, което е в началото на зоната на насищането на материала, а за номиналния ток на машината $I_n = 0.73\,A$ – все още в зоната на „пропорционалността". Не така стоят нещата, обаче, с магнитния поток Φ_q . От фиг.5 се вижда, че той расте твърде слабо в сравнение с нарастването на създаващия го ток, което обуславя падащия характер на индуктивността L_q - фиг.4. Причината за това е, че при $\theta = 90^0$ насищането на мостчетата става при доста ниски стойности на тока - фиг.10 и фиг.11. Изследването е направено при посочения ъгъл $\theta = 90^0$, симетрично на оста d при разпределение на полето , съответстващо на фиг.3.



Фиг.10



Фиг.11

При това положение на ротора процесът на насищане на „мостчетата", които в случая са основните проводници на магнитния поток (фиг.3), започва при много ниски стойности на тока $I \approx 0.25\ A$, като при номиналния ток екстремните стойности на индукцията са $|B| \approx 2.1\ T$ - фиг. 11, 12.

5. Заключение

Постигнатото съответствие между резултатите получени от изследването на физическия обект и тези на модела е в границите на $\pm 7.5\%$ за L_d и между $+17\%$ и -9.5% за L_q, като по-голямото отклонение е в началото, при малките токове.

Вероятни причини за това са:

- практическата невъзможност за провеждане на измервания при една и съща температура на статорната намотка;
- обективните затруднения при измерване на малки величини, както и при определянето на положенията за измерване, поради малката стойност на момента на машината;
- недостатъчно геометрично съответствие на числения модел с физическия, в частност при построяване на изрезите в ротора;
- трудната идентификация на магнитните свойства на материала на ротора ;
- независимо от отклоненията има достатъчни основания да се смята, че е постигната адекватност между модела и физическия обект, която при изчистване на факторите, които въвеждат грешки, и при „калибриране" на модела би позволила той да бъде използван, както при проектирането, така и при изследване на СРДРСН.

Литература

[1] ABB review – 1/2011, pp 56-61

[2] Михов, М., Д. Сотиров. Синхронни реактивни двигатели с разпределена намотка - моделиране в средата на FEMM. IV научна конференция ЕФ-2012, дни на науката на ТУ-София, 28.09.2012-01.10.2012.

[3] Михов, М. Определяне на индуктивностите по осите d, q на синхронни реактивни двигатели с разпределена намотка. IV научна конференция ЕФ-2012, дни на науката на ТУ-София, 28.09.2012-01.10.2012.

[4] J. Haataja, "A comparative performance study of four-pole induction motors andsynchronous reluctance motors in variable speed drives", Lappeenranta University of Technology, ISBN 951-764-772-7, ISSN 1456-4491, Lappeenrannan teknillinen yliopisto,

[5] Рац Е.,"Векторно управление на електрически машини", С., 2010

[6] MSc Final Project Report, ABB Corporate Research & KTH

[7] Meeker, D. Finite Element Method Magnetics. Ver. 3.3, User's Manual", May 24, 2003.

[8] Брандиски, К., И. Ячева. CAD системи в електромагнетизма. С., Сиела, 2002.

[9] Ячев И., И. Маринова, Ръководство за лабораторни упражнения по числени методи и моделиране на вериги и полета ч. I, София, 2007.

[10] Божилов Г.," Преходни процеси и обобщена теория на електрическите машини", С., 2007

Автори: инж. Михо Михов, доц. д-р, катедра „Електрически машини" Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mpmi@tu-sofia.bg;* инж. Димитър Сотиров, доц. д-р., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *dksoj@tu-sofia.bg;* инж. Адриан Иванов, гл. ас. д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *apiv@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Владимир Лазаров

ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН МОМЕНТ НА ЕДНОФАЗЕН СИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ В РОТОРА

Михо Михов, Ганчо Божилов, Адриан Иванов

Резюме: *В разработката е направено числено изследване в средата на FEMM на еднофазен синхронен двигател с постоянни магнити в ротора, като обект на изследване са функционалните възможности на машината. Представени са подходи за определяне на осите на поотделно* (*самостоятелно*) *възбудените роторни и статорни полета. Определено е индуктираното електродвижещо напрежение в статорната намотка. Построени са статични характеристики на синхронния двигател и тази на средния елктромагнитен момент.*

Ключови думи: *еднофазен синхронен двигател с постоянни магнити, метод на крайните елементи, електродвижещо напрежение, електромагнитен момент,*

ELECTROMAGNETIC TORQUE OF SINGLE-PHASE SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS IN THE ROTOR

Miho Mihov, Gancho Bovilov, Adrian Iwanov

Abstract: *In the paper is made a numerical study in FEMM media of a single phase synchronous motor with permanent magnets in the rotor, where the object of the study is investigation the functionality of the machine. There are presented different approaches for determining the axis of separately* (*independently*) *excited stator and rotor fields. It is defined the inducted electromotive force in the stator winding. There are built both characteristics of the synchronous motor - the static and the average electromagnetic torque`s one.*

Keywords: *Permanent Magnet Synchronous Motor, Finite Element Method, Electromotive force, Electromagnetic torque*

1. Въведение

Разглеждания двигател принадлежи към класа на електродвигателите за домакински уреди – в случая за задвижване на помпата за отработилата вода на домашна перална машина [1]. Електродвигателят е еднофазен - в съответствие с вида на напрежението в бита, синхронен, с концентрирана статорна намотка и възбуждане с постоянни магнити. В настоящата разработка за обозначаването му е прието съкращението ЕСДПМР

Предимство на тези двигатели е несложната и здрава конструкция и определената от нея лека технология по изработването. Известни са и други предимства

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

на синхронните двигатели и в частност на тези с постоянни магнити - твърда механическа характеристика, по-малка консумация и по-добър фактор на мощността в сравнение с другите използвани досега електродвигатели със същото предназначение - например асинхронни двигатели с екранирани полюси.

Известен е обаче и един експлоатационен проблем на синхронните машини изобщо - пускането и влизането им в синхронизъм, дължащ се на отсъствието на пусков момент при тези машини в чистия им вид.

Този проблем е отстранен в достатъчна степен с въвеждане на неравномерна въздушна междина –„с два диаметъра”, както е показано в [2], така че в състояние на покой /изключен от мрежата двигател/ магнитната ос на роторната полюсна система да бъде отместена от тази на възбудената статорна система [2, 3]

В настоящата разработка е предложен още един подход за определяне на пусковия момент и е определен средния електромагнитен момент на ЕСДПМР.

2. Обект на изследване

За да се осъществи съпоставимост и последователност на изследването е използван електродвигател SMP-25/PM, разглеждан и в [3] - фиг.1.

а) б) в)

Фиг.1. Еднофазен синхронен двигател с постоянни магнити в ротора
а/ външен вид на двигателя, б/ възел ротор с преден лагерен щит и работно колело на помпата, в/ възел статор, състоящ се от магнитопровод и намотка

Очевидните конструктивни мероприятия, които са в полза на експлоатационните режими са следните:

- Работното колело е с радиални лопатки, което създава еднакви функционални възможности на помпата (H-Q характеристики) , независимо от посоката на въртене. Това мероприятие отчита обстоятелството, че посоката на завъртане на еднофазния двигател зависи от ориентацията на ротора с постоянни магнити спрямо статорната система, чийто ток има „произволен” поляритет в момента на включване.

- Закрепването на работното колело към вала му осигурява /на колелото/ свободен ход в границите на ъгъл от 180^0. Това конструктивно решение позволява при изключване роторът да спре и да се ориентира в неравномерната въздушна междина преди още флуидът да е спрял движението си, а при включване

на статорната намотка - да се развърти ненатоварен в границите на половин оборот. т.е. потребен му е много малък въртящ момент. Други технически данни на изследвания двигател са:

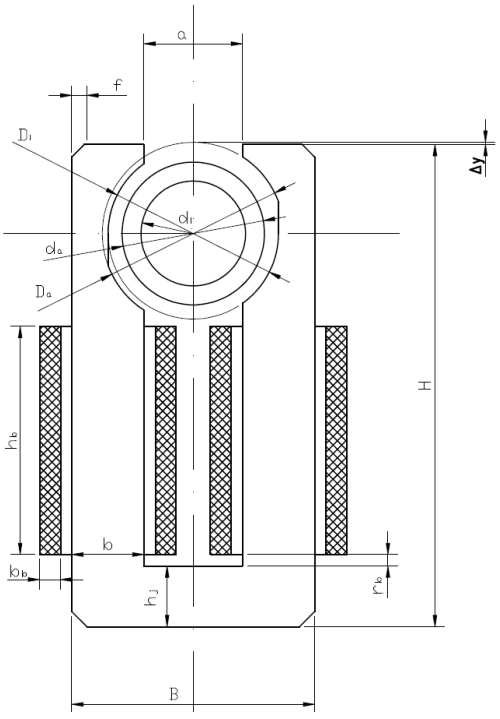
$$P_n = 10W;\ I_n = 0.25\,A; n_n = 3000\,\mathrm{min}^{-1}.$$

Данните за постоянния магнит $B_r = 0.354T; H_C = 240kA/M$ - от типа на предлаганите от [4].

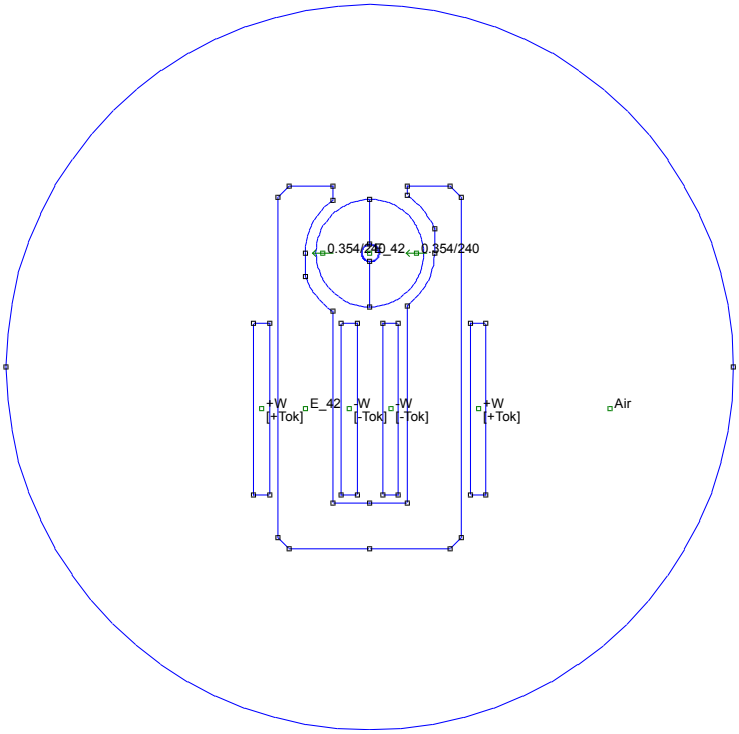
3.Математически модел на изследвания двигател

Относително големите аксиални размери на двигателя и напречната му геометрия позволяват да бъдат пренебрегнати надлъжните краеви ефекти в работната зона и да се състави модел в 2d-средата на FEMM[5,6]. Друго благоприятно обстоятелство от технологична гледна точка при изчисленията е удобния апарат за скриптиране на Lua. Като илюстрация за последното трябва да се посочи, че само при изчисляване на средния електромагнитен момент са направени изчисления за 360 възможности на фазата на тока при пълно “завъртане” на ротора на един оборот, през 10 геометрични градуса, т.е. $n = 360 \times 36 = 12960$ решения.

Геометричните размери на ЕСДПМР са снети от физическия обект - фиг.2. Изработена е методика и Lua-скрипт за автоматично построение по комплекса от входни данни (фиг.2), което позволява по-нататъшното му включване в програми за оптимизационни процедури.



Фиг.2



Фиг.3

На фиг.3 е показано изображението на електродвигателя в препроцесора на FEMM.

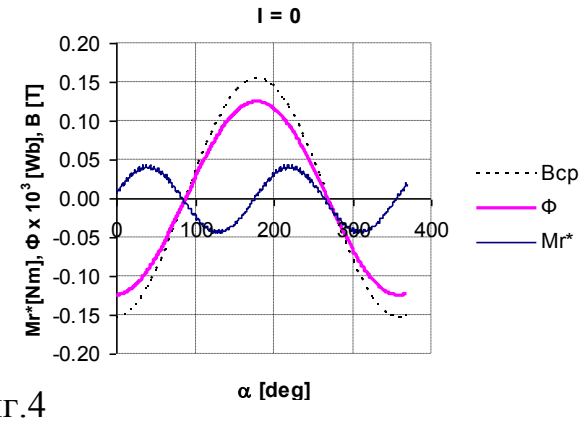
4. Решение на задачата

4.1. Определяне на положението на осите на роторното и сторното магнитни полета при самостоятелното им съществуване (при отсъствие на другото поле)

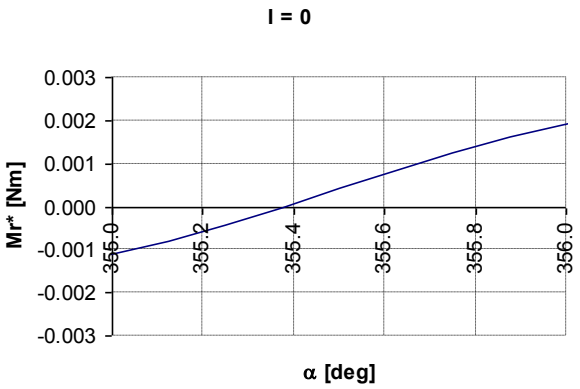
4.1.1. Определяне на положението на магнитната ос на роторните полюси при отсъствие на статорно поле – $I = 0$

Геометричното начално положение на ротора /ГНПР/ е показано на фиг.3. При него оста на магнитното му поле съвпада с оста $-X$.

Определя се статичния електромагнитен момент на ротора (в постпроцесора – опция ***"Steady-state weighted stress tensor torque"***) при различни положения на ротора в границите $0^0 \div 370^0$ със стъпка 1^0 от ГНПР при отсъствие на ток в статорната намотка - $/I = 0/$. Моментът е създаден от магнитното поле на постоянните магнити на ротора и условно е наречен реактивен момент M_r*. Положението при което оста на полюсите е насочена към статорните полюси в зоната на малкия диаметър и M_r*$= 0$ е едното ***устойчиво положение на ротора в покой*** - фиг.4. При зададеното ГНПР то се получава при ъгъл $\alpha = 355.4^0$ от оста $-X$ - фиг.5 или, което е същото: на ъгъл $\alpha = 355.4^0 - 360.0^0 = -4.6^0$. Другото устойчиво положение е на 180^0 спрямо този ъгъл.



Фиг.4

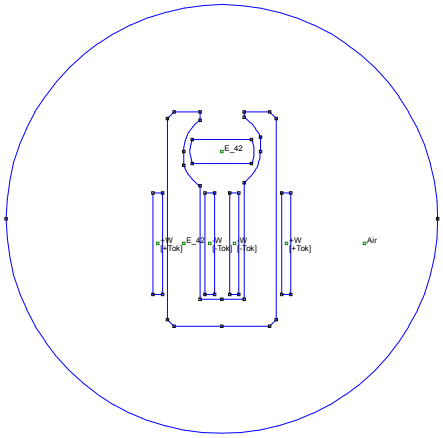


Фиг.5

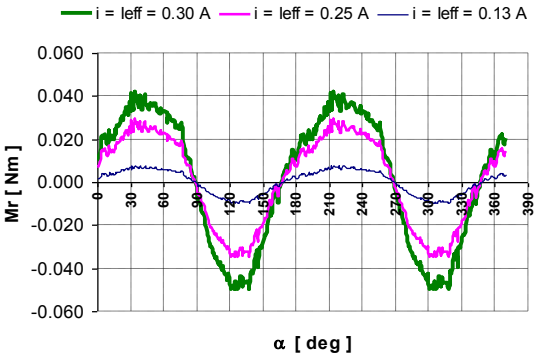
4.1.2. Определяне на положението на магнитната ос на статорните полюси при захранване на статорната намотка - $I \neq 0$ и отсъствие на роторно магнитно поле

Използван е подходът от точка т.4.1.1., като вместо ротор с магнитни полюси е поставен /пасивен/реактивен ротор - фиг.6.

Снети са кривите за различни положения на ротора в границите със стъпка от ГНПР при ток в статорната намотка - фиг.7. На фиг.8 е показано увеличено изображението от фиг.7 в статорната зона с малкия диаметър за различните токове. Вижда се, че моментът $M_r = 0$ при ъгли от порядъка на $\alpha = 347.3^0$, отчетено от оста $-X$.

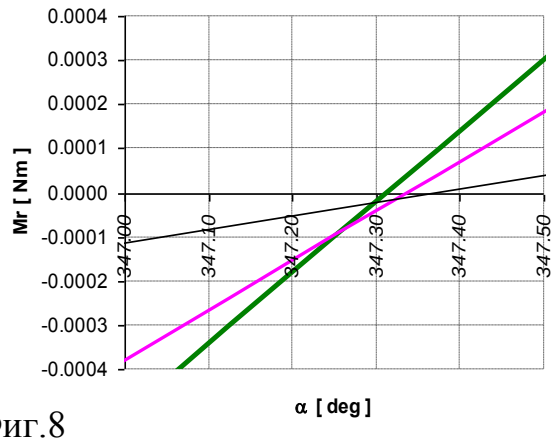


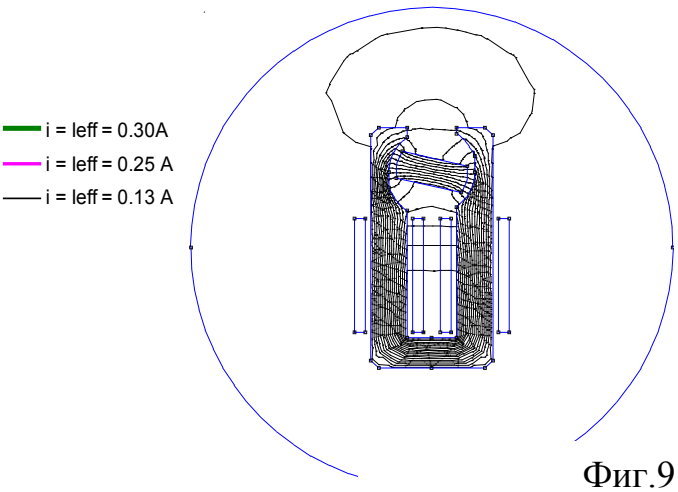
Фиг.6



Фиг.7

Това е ъгълът на разположение на магнитната ос на статорното поле при отсъствие на поле създадено от ротора - решението за полето е показано на фиг.9. Следователно двете полета - на ротора с постоянни магнити и това на статорната намотка ***при самостоятелното им съществуване*** са разместени на ъгъл $\theta^* = 347.3^0 - 355.4^0 = -8.1^0$, което е предпоставка за възникване на въртящ електромагнитен момент при захранване на статорната намотка.





Фиг.8

Фиг.9

4.2. Определяне на положението на осите на роторното и статорното магнитни полета при едновременното им съществуване

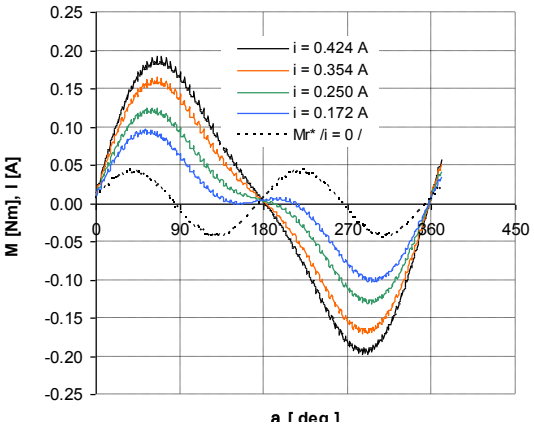
Непосредствено практическо значение за работата на ЕСДПМР има положителния отговор на въпроса, дали при включване на статорната намотка, върху ротора, които се намира в устойчивото положение на покой действа въртящ електромагнитен момент и каква е стойността му. За да се отговори на този въпрос с помощта на модела (FEMM) се определят статичните характеристики на двигателя $M = f(\alpha);\ i = const.$ при няколко стойности на статорния ток (моделът е „захранен" с постоянен ток). Тук трябва да се посочи, че при избора на токовете, е взета предвид ефективната стойност на номиналния ток $i = I_{eff} = 0.25\,A$ и максималната му стойност $i = I_{\max} = 0.354\,A$. За целта на изследването при посочените по-преди стойности на тока в статорната намотка се задават множество положения на ротора – в случая 370 със стъпка 1^0, започвайки от ГНПР . Получените характеристики са показани на фиг.10.

На фиг.11 е показано увеличено изображение на статичните характеристики в интересуващата ни област. Вижда се, че при наличие на ток в статорната намотка и устойчиво положение на покой на ротора при ъгъл $\alpha = 355.4^0$ върху него действа пусков електромагнитен момент M_S, който в зависимост от моментната стойност на тока е в интервала от 0.003 до 0.006 Nm.

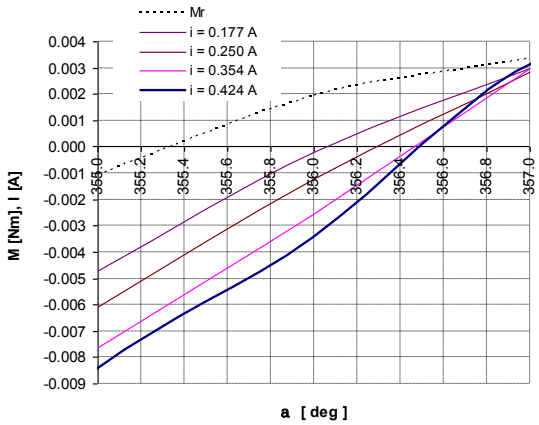
Отчитайки обстоятелствата, че:

- товарният момент има „вентилаторна" характеристика;
- между ротора и работното колело на вала има свободен ход от порядъка на 180^0;
- стойността на момента който в момента на максимума на тока е 0.006 Nm,

има пълно основание да се очаква , че машината ще се развърти при благоприятно съчетание на поляритета на тока и на роторното поле, което се променя с честота 50 Hz – т.е. може да се пропуснат няколко полупериода.

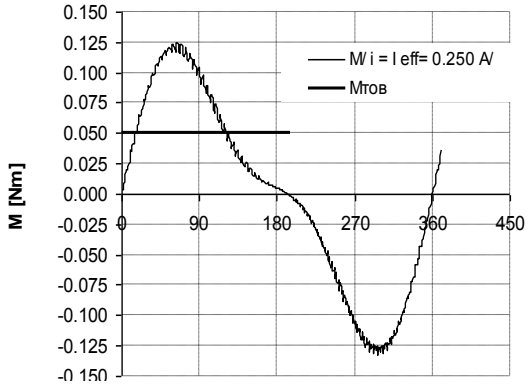


Фиг.10

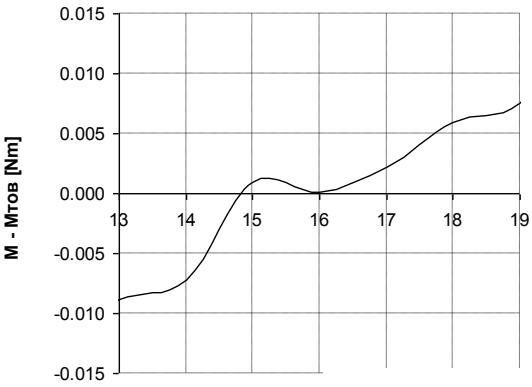


Фиг.11

На фиг.12 е показана статичната характеристика, която е транслирана на ъгъл $\alpha = 356.3^0$ отчетен от фиг.11 за ток $i = I_{eff} = 0.25\,A$.Формално тя е по-близка до ъгловата характеристика на синхронния двигател, тъй като удовлетворява условието $M(\theta = 0) = 0$ От фрагмента на характеристиката $M - M_{тов} = f(\theta)$ (фиг.12) е отчетен ъгълът на натоварване $\Theta \approx 15^o$ при товарен момент $M = 0.0502\ Nm$ [3].



Фиг.12



Фиг.13

4.3. Индуктирано електродвижещо напрежение в статорната бобина (намотка)

На фиг.14 е представено изменението във времето на е.д.н. индуктирано в намотката, средната стойност на индукцията долу в ярема на статора, средният магнитен поток в обема на намотката и момента M_r* при квазистационарно въртене на ротора. При изчислението на е.д.н. е прието, че скоростта на въртене е синхронната за двуполюсна машина при честота $f = 50\,Hz$.

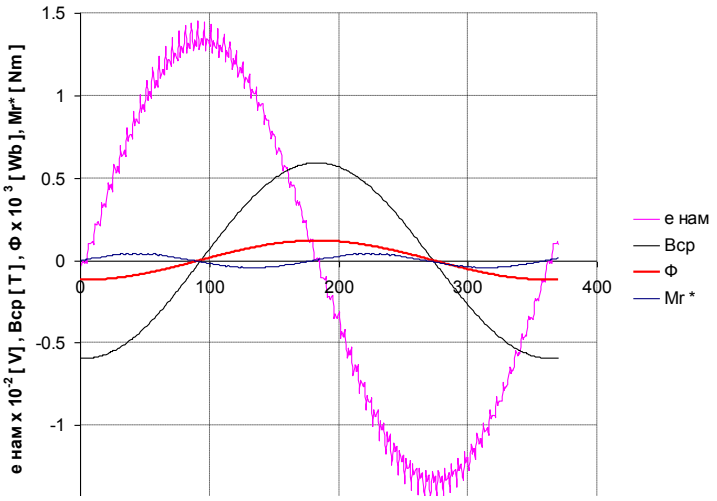
Индуктираното е.д.н. в всяка от бобините с брой навивки w_i се определя по известната зависимост

$$e_{боб\,i} = -w_i \frac{d\Phi_i}{\partial t} \tag{1}$$

При численото решение $d\Phi \approx \Delta\Phi = \Phi(t+\Delta t) - \Phi(t)$, а $\Delta t = \frac{\Delta\alpha}{\omega}$; $\omega = 2\pi f$. Удачно е потокът Φ обхванат от навивка на бобината да се определи на основание на известната зависмост $\Phi = \iint_{L_\Sigma} A\,dl$. с помощта на предоставената в постпроцесора на FEMM възможност: ***Integral of A over selected volume -***. $\iiint_V A\,dV$

Благоприятно в случая поради двумерния характер на решението е, че контурът на циркулация на магнитния векторен потенциал (МВП) A е $L_\Sigma = L_{(+)} + L_{(-)}$, като $\left|L_{(+)}\right| = \left|L_{(-)}\right| = l$. Последното от своя страна е размера на обекта (двигателя) перпендикулярно на равнината на изображението (”екрана”) и по който размер, поради плоско-паралелния характер на полето $A = const.$. На основание на изложеното и свойствата на МВП, средният магнитен поток обхванат от навивка в бобината, е:

$$\Phi = \int_{L_{(+)}} A\,dl + \int_{L_{(-)}} A\,dl = l\left(\frac{\iiint_{V_{(+)}} A\,dV}{V_{(+)}} + \frac{\iiint_{V_{(-)}} A\,dV}{V_{(-)}}\right) \tag{2}$$



Фиг.14

В (2) величините $V_{(+)}$ и $V_{(-)}$ са обемите на лявата и дясната страна на съответната бобина. Използвайки последната зависимост (2) и отчитайки, че двете бобини са последователно магнитно и електрически свързани изразът за моментната стойност на е.д.н индуктирано в цялата намотка ще стане :

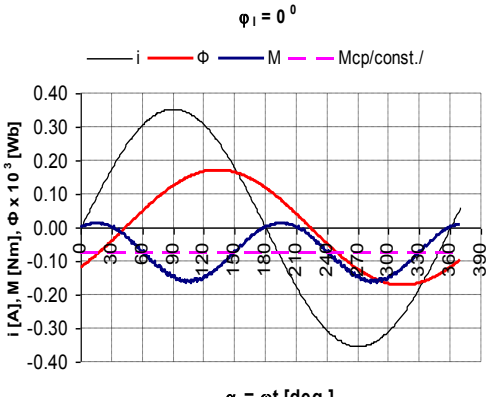
$$e_{нам} = -w_1 \frac{d\Phi_1}{\partial t} - w_2 \frac{d\Phi_1}{\partial t} \qquad (3)$$

В разглеждания случай $w_1 = w_2 = 1800$.

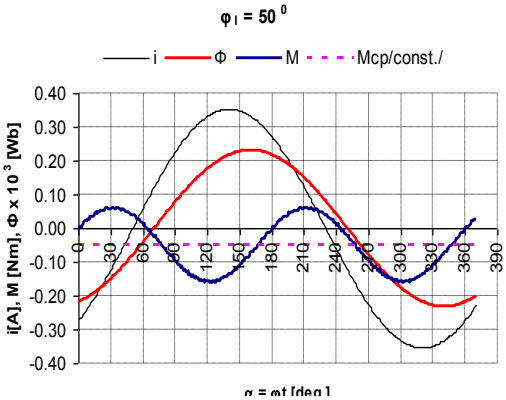
Направена е допълнителна математическа обработка на резултатите на е.д.н. – „филтрирани" са пулсациите и е получено $E_{нам\ MAX} = 134.23\ V$, на което съответства $E_{нам\ eff} = 94.91\ V$. Естествено, този подход може да се приложи и при определяне на е.д.н. под товар при решаване на уравнението на напрежението на електродвигателя.

4.3. Средна стойност на въртящия електромагнитен момент

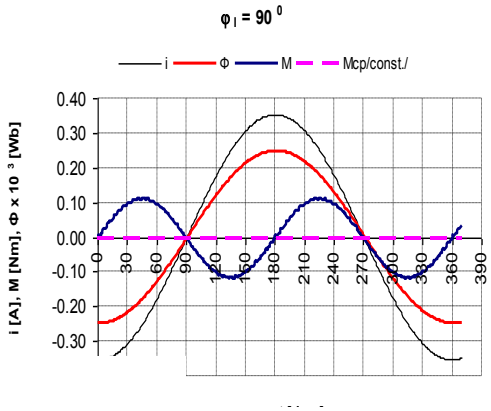
Необходимият за работата на ЕСДПМР електромагнитен момент се създава от взаимодействието магнитния поток в машината и тока в статорната намотка. В най-общия случай, практически при всички въртящи електрически машини, стойността му зависи освен от стойностите на взаимодействащите си физически величини, така и от ъгъла на дефазиране между тях. Тук е направено числено изследване за средния електромагнитен момент в границите на едно завъртане на ротора и един период на изменение на тока, като се приема, че роторът се върти синхронно и при което се изменя положението на постоянните магнити спрямо статора/статорната намотка/ и стойност на тока в нея. Тъй като машината е двуполюсна геометричният ъгъл на завъртане на ротора е равен на електрическия ъгъл в аргумента на синусоидалния закон на изменение на тока $\alpha = \omega t$. За началото на равномерното въртене се счита положението при което $M_r{}^* = 0$. Отнесено към този начален момент на началната фаза на тока φ_I се задават различни стойности и токът се изменя по закона $i = I_{MAX} \sin(\omega t - \varphi_I)$. Отчита се електромагнитния момент при всяко положения на ротора в интервала 0^0 – 360^0 и се определя средната стойност на момента за един оборот.



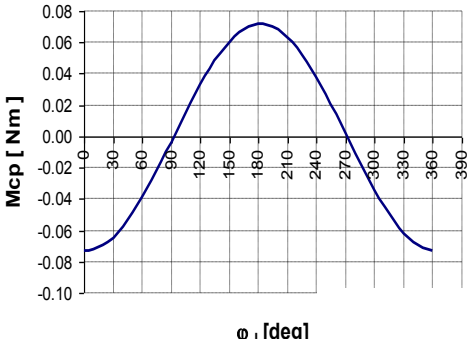
Фиг.15



Фиг.16



Фиг.17



Фиг.18

На фиг.15-фиг.17, е показано изменението на тока, резултантния магнитен поток, въртящия електромагнитен момент и средната му стойност определена за един оборот като на фазата на тока са зададени две характерни стойности - $\varphi_I = 0^0; \varphi_I = 90^0$ и една междинна $\varphi_I = 50^0$. На първите две съответстват максималната по абсолютна стойност и нулева стойност на средния момент. За всички останали случаи средния електромагнитен момент има междинни стойности фиг.18. Очевидно е, че средната стойност се определя от съотношенията на площите на областите с различен знак в площта заградена от кривата $M = f(\alpha = \omega t)$.

5. Заключение

Разработеният модел на ЕСДПМР има следните качествени характеристики:

- в резултат от въвеждане на алгоритъм и програма за построяване на модела, той може да се използва за изследване на всички конструкции от този вид;
- показано е наличието на пусков момент при включване на машината, когато тя е в устойчиво състояние на покой;
- получените резултати по същество потвърждават тези от [3], получени формално с друг числен подход (на со-енергията) в същата изчислителна среда, но дават възможност за по-добро физическо онагледяване на явленията;
- показана е възможността да се определи индуктираното е.д.н. в статорната намотка от обхванатия в нея поток, което създава предпоставки за изготвяне на методика за решаване на уравнението на напрежението на машината с резултатите от числения модел;
- показан е подход за определяне на средната стойност на електромагнитния момент на машината, която в случая е по-меродавна характеристика в сравнение със статичната характеристика снета при неизменна стойност на тока;
- получените резултати, както и подготвения модел служат за отправна точка на по-нататъшни оптимизационни изследвания на този вид електродвигатели.

Литература

[1] *http://www.scribd.com/doc/69775579/ELEKTROELEMENT-vp*
[2] Патент No 4714851/ 22 Дек 1987, “Single-phase synchronous motor with permanent magnets in the rotor”
[3] Petkovska L., Cvetkovski G., “Study on Electromagnetic Field of a Single-Phase PM Synchronous Motor”, The International Conference on Electrical Engineering, July 6-10, 2008, Okinawa, Japan 2008.
[4] *http://www.pramiz.com/frambgp.html*
[5] Meeker D. *Finite Element Method Magnetics, Ver. 3.3, User’s Manual*, May 24, 2003
[6] Брандиски, К., И. Ячева. “*CAD системи в електромагнетизма*”, С., Сиела, 2002.

Автори: Михо Михов, доц. д-р, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mpmi@tu-sofia.bg;* Ганчо Божилов, проф. дтн, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address:*gjboj@tu-sofia.bg*; Адриан Иванов, гл. ас. д-р, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *apiv@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Георги Тодоров

РЕТРОСПЕКЦИЯ НА СВЕТЛОДИОДНОТО ВЪНШНО ОСВЕТЛЕНИЕ В ЕВРОПА

Н. Василев, Н. Янева, М. Вълчев

Резюме: *В настоящия доклад е направен критичен преглед на състоянието на светлодиодното външно осветление във водещи страни в Европа. Приложени са също резултатите от тригодишни изследвания на светлодиодни осветители в акредитираната изпитвателна лаборатория по осветление в ТУ-София.*

Ключови думи*:светлодиоди, светлинен добив, енергийна ефективност.*

RETROSPECTION OF LED OUTDOOR LIGHTING IN EUROPE

N. Vassilev, N. Yaneva, M. Valchev

Abstract: *A critical examination of LED outdoor lighting state in Europe is presented in this paper. Here it is enclosed tree years investigation results of the accredited testing laboratory on lighting by TU - Sofia.*

Key words: *Leds, light efficacy, energy efficiency.*

Въведение

Съвременници сме на нов етап в историята на развитието на светлинните източници - светлодиодите ! С техния изключителен потенциал за намаляване на консумацията на енергия за осветление, забележителна дълготрайност, практически неограничени възможности за динамично регулиране на светлинния поток и много добро възпроизвеждане на цветовете , те безспорно се утвърждават като най-перспективен светлинен източник !

В табл.1 е направен сравнителен преглед на главните светлотехнически, енергийни и експлоатационни показатели на светлодиодни чипове, производство на някои големи фирми за 2012-2013 г. при $T_j = 85^0$ C

Дадените в табл.1 светлинни потоци трябва да се редуцират предвид загубите в драйвера, допълнителната оптика, загубите в галваничните връзки и вследствие повишената Tj температура съгласно фиг.1 - според Heinz [1] и според Khan [2].

В следващите табл.2, табл.3, табл.4 са дадени главните светлотехнически, енергийни и експлоатационни показатели на традиционните светлинни източници използвани понастоящем за улично осветление за 2012–2013 г.

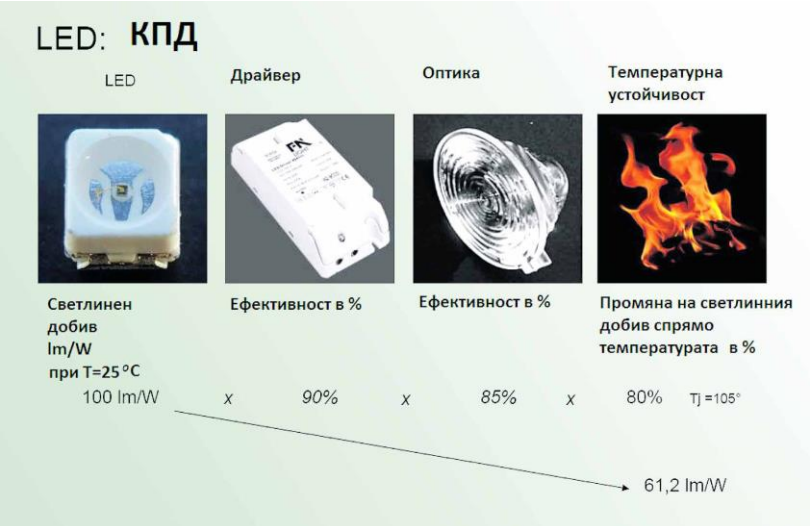
Прави впечатление значителното повишаване на светлинния добив **η** lm/W и трайността **t,** h на традиционните светлинни източници.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Табл.1. Светлотехнически, енергийни и експлоатационни показатели на светлодиоди

Вид LED	P, W	Ф, lm	η, lm/W	Тцв., K	CRI	Heinz	Kahn
Philips							
Tj =85°C							
Luxeon A	1	102	102	4000	80	62,42	73,90
Luxeon R	1	119	119	4000	70	72,83	86,22
Luxeon Rebel PLUS	1	3	103	4000	80	63,04	74,62
Osram							
Tj =135°C							
Golden Dragon Plus	1	82-112	82-112	3000-4000	80	50,18-68,54	59,41-81,14
LCW CR7P.EC-LPLR-5L7N-1	1	140	140	4000	83	85,68	101,43
LCW CR7P.PC-LQLS-5L7N-1	1	164	164	4000	72	100,37	118,82
Nichia							
Tj =135°C							
Вид LED	**P, W**	**Ф, lm**	**η, lm/W**	**Тцв., K**	**CRI**	**Heinz**	**Kahn**
NS9W383	1	124	124	3500	80	75,89	89,84
Seoul Semiconductor							
Tj =85°C							
Z5M/SZ5-MO-WW-CB	1	122	122	2600-3700	80	74,66	88,39
Z5P/SZ-PO-WW-C8	1	112	112	2600-3700	80	68,54	81,14
Z5M/SZ-WW/5AOB	1	100	100	2600-3700	80	61,20	72,45
Z1	1	76	76	2600-3700	80	46,51	55,06
P4/N4218-OH 5630	1	93	93	2600-3700	80	56,92	67,38
CREE							
Tj =85°C							
XTEHVW-H0-0000-00000LBE7	1	93,9	93,9	2600-3700	80	57,47	68,03
XTEHVW-H0-0000-00000LCE7	1	100	100	2600-3700	80	61,20	72,45
XTEHVW-Q0-0000-00000LDE7	1	107	107	2600-3700	80	65,48	77,52
CITIZEN							
Tj =30°C							
CLL010-0305A1-403M1A2	1	117	117	4000	80	71,60	84,77



Фиг.1. Определяне на реалния светлинен добив на светлодиода

Табл.2. Натриеви лампи с високо налягане 2013 г

P,W	Ф, lm	η, lm/W	- 50% изг.лампи.
50	4200 -4400	84-88	40000-70000
70	6400-6600	91-94	40000-70000
100	10000-10700	100-107	4000-70000
150	16500-17500	110-117	40000-70000
250	32000-33200	128-130	40000-70000
400	55000-56500	138-141	32000-70000

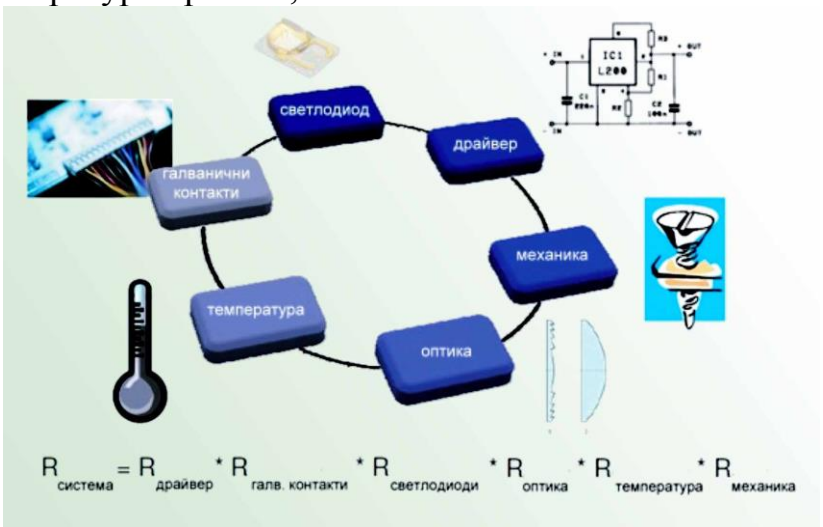
Табл.3 Метал-халогенни лампи с високо налягане 2013 г

P,W	Ф, lm	η, lm/W	t, h- 50% изг.лампи.
50	4500-5100	90-98	19000-43000
70	5600-7640	80-105	18000-43000
100	9000-10900	90-109	18000-43000
150	13500-16200	90-110	18000-43000
250	20500-27700	84-110	20000-24000
Ra = 70 ; Тцв. = 3050 K			

Табл.4 Компактни луминесцентни лампи 2013 г

Вид на лампата	P, W	Ф, lm	η, lm/W	t, h- 50% изг. ламп.
	26	1800	68-69	10000-42000
	32	2400	75	13000-20200
	42	3200	74-76	13000-42000
	57	4300	75	13000-42000

Дълготрайността на светлодиодните осветители е значително по-ниска от трайността на светлодиодния чип. На фиг.2. са показани компонентите на „системата” светлодиоден осветител: светлодиод, драйвер, оптична система, галванични контакти, температурен режим, механична част.

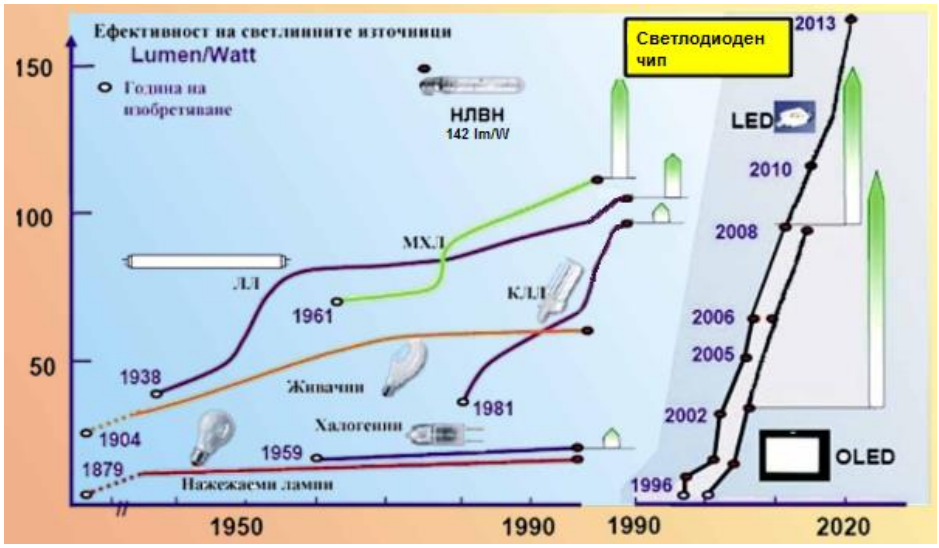


Фиг.2. Вероятност за безотказна работа на светлодиоден осветител

Вероятността за безотказна работа на „системата” светлодиоден осветител се определя с произведението на вероятностите за безотказна работа на отделните компоненти :

$$R_{система} = R_{светлодиод} * R_{драйвер} * R_{оптика} * R \quad * R \quad * R_{механика}$$

За оценка на дълготрайността на светлодиодния осветител често се използва продължителността на работа на осветителя, при която светлинният поток се е намалил до 0,70 Фн. Редица фирми производители на светлодиоди гарантират трайност 50 000 h. Интересна е следната констатация: светлинният добив η [lm/W] и трайността t [h] на натриевите лампи с високо налягане са практически изравнени с тези на светлодиодите. Същите показатели на метал-халогенните лампи са малко по-ниски. На фиг.3 е илюстрирана графично енергийната ефективност на съвременните светлинни източници към 2013 г.



Фиг.3. Непрекъснат ръст на ефективността на светлинните източници

Ретроспекция на светлодиодното външно осветление в Европа

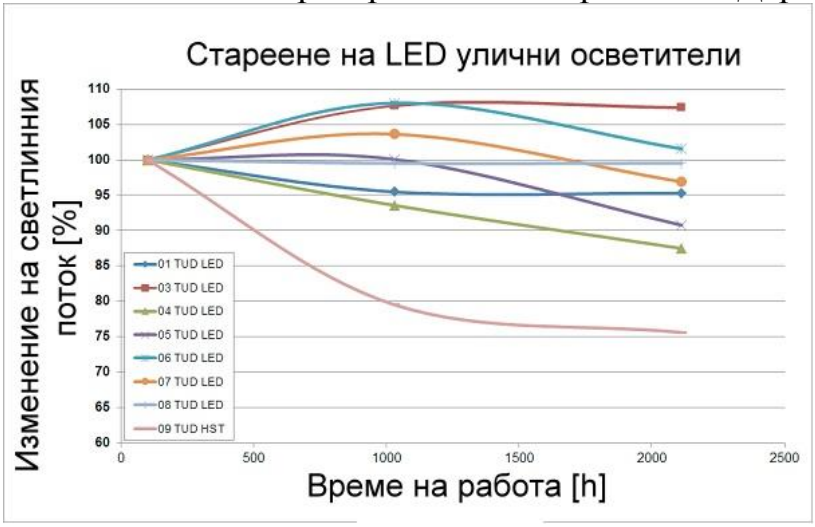
Германия

- Годишно в Германия се подменят 3-5 % осветители През 2012 г. 60 % от подменените осветители са конвенционални, а 40% светлодиодни. Ако се приеме, че занапред броят на подменените годишно осветители със светлодиоди е 70%, през 2020 г. броят на светлодиодните осветители в Германия ще достигне 35%-40%. Министерството на околната среда на Германия (BMU) финансира в продължение на 5 години (2008-2013) модернизиране на уличното осветление с оглед повишаване на неговата енергийна. Понастоящем около 5-7 % от уличното осветление на Германия е със светлодиоди. Чрез тази подмяна съчетана с димиране на осветлението консумацията на енергия се намалява с 50-70 %. Експлоатационните разходи досега са почти еднакви с конвенционалното осветление. Редовното почистване и интервалите за контрол и обслужване, проверките за електро безопасност и на осигурителните показатели практически независят от светлотехническите технологии. Освен това се установява известна деградация в показателите на светлодиодите - намаляване на светлинния поток и срокът на работа на светлодиодите в реални експлоатационни условия. (*Lichttagung Dresden 2013, S. Fischer, Konventionelle Beleuchtungstechnologien – eine Auslaufmodel)* .
- М-во на околната среда на Германия (BMU) чрез програмата „Иновационна програма за околната среда” (UIR) стимулира през 1999-2011г. повишаване на енергийната ефективност в 18 общини. Съществуващото осветление е със стара

технология отпреди повече от 20 години, лошо поддържана и със силно замърсени осветители. Светлинните източници са с ниска енергийна ефективност: живачни лами с високо налягане, тръбни и компактни луминесцентни лампи с ниско налягане. Осветителите са предимно сферични, конични („гъбообразни”) или дълги за тръбни луминесцентни лампи със стара оптична система и неподходящо светлоразпределение. Реконструкцията на осветлението е осъществена с метал-халогенни и натриеви лампи с високо налягане и компактни луминесцентни лампи 24W. В някои градове като пилотни проекти са монтирани светлодиодни осветители. По-мащабно са използвани светлодиодни осветители във външното осветление на градовете: Goldenstedt – 98 бр., Lippenstadt - 178 бр., Main Taunus – 86 бр. В някои случаи подмяната на осветителите е съчетана със система за димиране на осветлението, напр. редуциране на осветлението с 50% от 22 до 06 часа.Реализирана е намаление на консумацията на енергия 60-70%. Срокът на изкупуване на инвестициите за преустройството на осветителните уредби е от 5 до 10 години.

(Lichttagung Dresden 2013, K. Fischer, Bundeswettbewerb “energiee efficient Strassenbeleuchtung” des BMU- Sachstandt und Schlussfolgerung).

Дармщадт - На фиг.4 са показани измерените светлинни потоци на 8 светлодиодни осветители след 1000h и 2000h работа на открито. Изследванията са проведени от Светлотехническата лаборатория на Университета в Дармщад [1].



Фиг.4. Намаление на светлинните потоци вследствие стареене на осветителите, изследване в Дармщадт [1]

Австрия и Виена - Виена с население 1 700 000 жители се осветява от 150 000 осветители, т.е. една лампа на 11 жители. Австрия с население 8 500 000 жители се осветява с 1 400 000 осветители ,т.е. една лампа на 6 жители. Подобно на Германия 60% от осветителите са със стара технология, енергийно не са ефективни и в някои случаи като в България са опасни. Според австрийската практика общите „доживотни” разходи на уличното осветление се формират от 20% инвестиционни и 80% експлоатационни разходи. Около 700 000 съществуващи осветители подлежат на сменяване. Следва ли те да бъдат тотално заменени само със светлодиодни осветители ? Как се оценява качеството на наличните светлодиодни осветители в уличното осветление на Австрия ? Безспорно има нови качествени и енерго ефективни светлодиодни осветителни уредби. Но до-

сега не са провеждани изследвания как се променят техните технико-икономически показатели в реални експлоатационни условия. Засега няма никаква информация в какво състояние ще бъдат светлодиодите след 50 000 часа ? Твърде често обаче има некачествени светлодиодни осветители, неправилно проектирани и инсталирани. Характерни и разпространени са следните недостатъци и проблеми на редица монтирани вече светлодиодни осветители: лошо светлоразпределение, заслепяващо действие, липса на защита от пренапрежения и преходни токови режими, липса на селективност на защитата на компонентите на осветителя, наличие на химически реакции в светлотехническата част на светлодиодния осветител (разтворители, лепила, пластификатори), комплициран монтаж и пр.

Налице е невероятна неосведоменост относно физическите принципи, закони, норми и реалната действителност, в която ще работят светлодиодите. Разпространява се учудваща информация, че светлодиодите почти не консумират енергия, не се нуждаят от обслужване и се изплащат след 3-4 години. Въз основа на този анализ се прави констатацията, че въвеждането на нови светлодиодни осветителни уредби за улично осветление трябва да бъде технико-икономически обосновано с проект,. Качеството на осветителите трябва бъде съобразено с действащите европейски норми и директиви. Доставчикът на светлодиодните осветители трябва да гарантира 5 години комплектни материали и сменяеми части и 10 години електроника

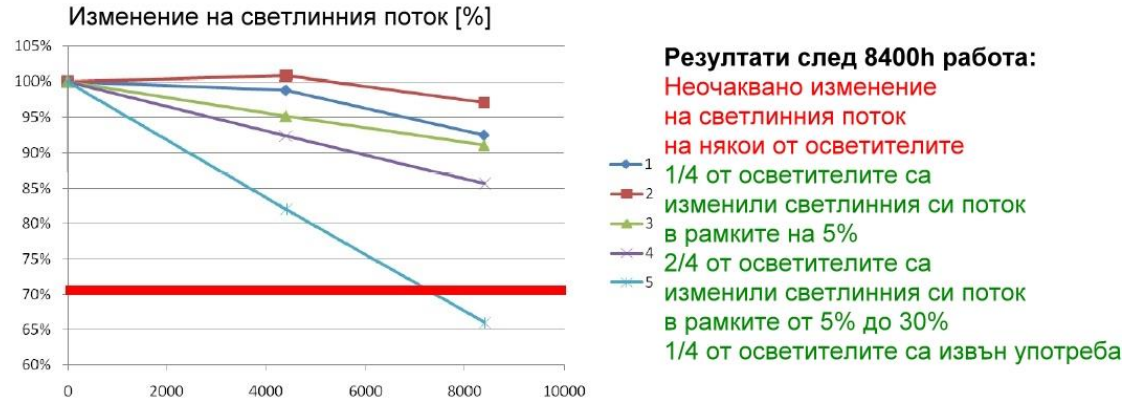
LED технологията във Финландия . LED уредбите във Финландия в повечето случаи са опитни уредби, обикновено състоящи се от малко на брой осветители (от 1 до 30). По груба оценка има около 100 опитни уредби с около 1000 инсталирани LED осветители. Опитът с първите инсталирани LED уредби във Финландия в повечето случаи бе отрицателен. Но през последните години значително се развиха и се появиха много разработките на оптиката, топлинния контрол и управление, увеличението на времето на живот, проектирането, конструкцията и електронната технология при LED осветителите. Заедно с разширяването на познанията на производителите и консултантите се разшириха познанията в областта на LED технологиите и на общинските администрации и всички др. власти ангажирани с този процес.

Потенциалът на LED технологиите в адаптивното външно осветление е добре известен, но най-големият проблем при внедряването на тези технологии преодоляването на относително високите разходи за изграждане.

LED технологията в Полша - В Полша има все още малко на брой малки LED осветителни уредби. Изводите за вече инсталираните улични осветители с LED, които се основават на мнението на крайните потребители и на някои научни изследвания, представени на конференции са, че уредбите са с различно качество и могат да се определят като първи пилотни проекти за оценка на тази нова технология. Някои от тези инсталации са снабдени с фотоволтаици или вятърни генератори. От икономическа гледна точка тези инсталации все още не могат да конкурират осветителите с натриеви или метал-халогенни лампи. Също така е важно да приемем значителната роля на точното законодателство по отношение на правилната работа на външното осветление. Липсата на точно законодателс-

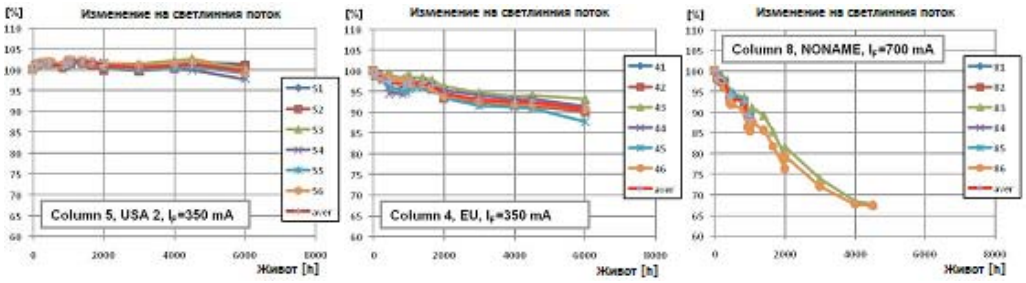
тво и проблеми със собствеността по отношение на инфраструктурата на осветителните уредби са основните причини за забавянето и дори до отказ за инвестиции за обновяване на външното осветление в Полша. Може да се обобщи, че подобрението на съществуващото законодателство и възникването на подходящи критерии („зелени") ще ускори процеса на обновление.

Белгия - Подобни изследвания са проведени в Брюксел на улични осветители 8400 часа след тяхното монтиране.



Фиг.5. Лабораторни измервания на светлодиодни осветители в уличното осветление в Брюксел 8400 h след монтирането им [11]

Унгария - В Техническия университет в Будапеща и в Университета в Панония са изследвани групи светлодиодни осветители след 6000 часа светене [12]. Изследвани са 7 светлодиодни осветители от САЩ, чиито светлинни потоци не са променени - фиг.6.a. Светлинните потоци на 7 европейски светлодиоди след 6000 часа са се намалили с 10% - фиг.6.b. Светлинните потоци на светлодиоди на неизвестен производител са се намалили с 35% - фиг.6.c. Главната причина за значителното намаляване на светлинния поток на осветителите след 6000 часа светене е постепенното повишаване на термичното съпротивление и съответно на Tj - Junction temperature.

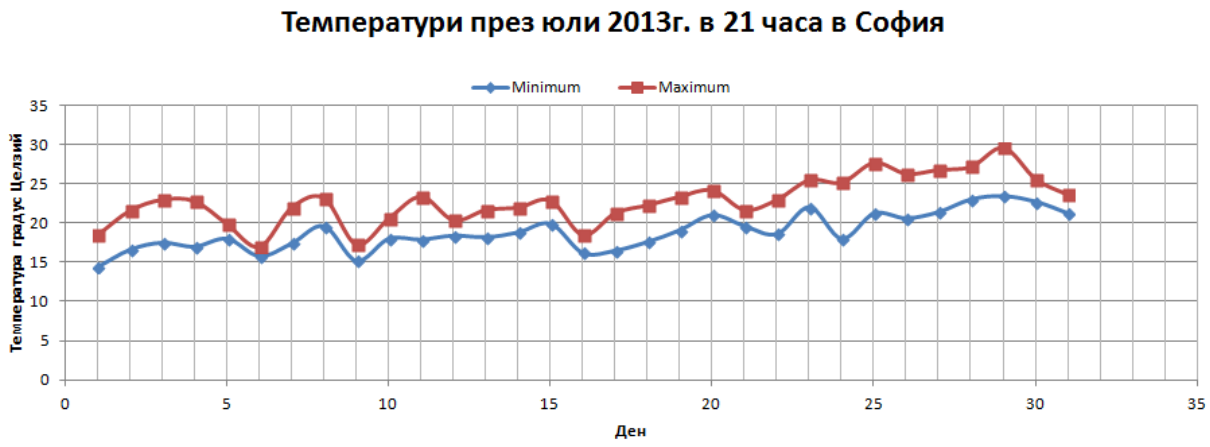


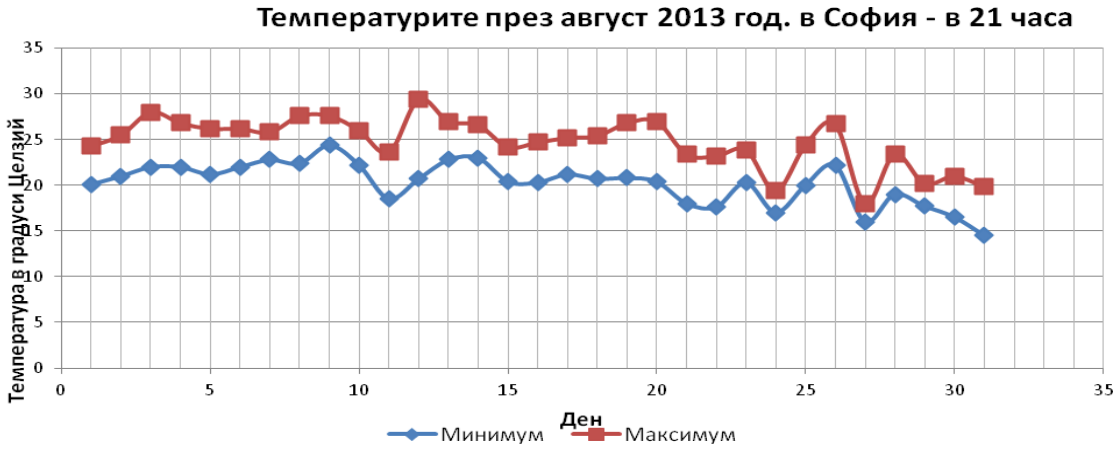
a. b. c.

Фиг.6.a,b,c Изменение на светлинните потоци след 6000 часа работа

Подобен е опита на страни като Холандия, Норвегия, Швеция, Италия, Англия и др.

България - Предвид силното влияние на околната температура върху работата на светлодиодните осветители са интересни резултатите от наблюдаваните температури в София през лятото на 2013 г., показани по-долу.





Не разполагаме със **статистически данни** за наличното светлодиодно улично осветление в България. Предвид на това ще се ограничим с резултатите от контролните измервания на светлодиодни външни осветители проведени в Лабораторията по Осветителна техника при Технически Университет - София.

2010 г.:

- Температури на корпуса: Min t = 29°C Max t= 85°C
- Max P = 191 W max Φ = 17424 lm max lm/W = 126 lm/W

2011 г.:

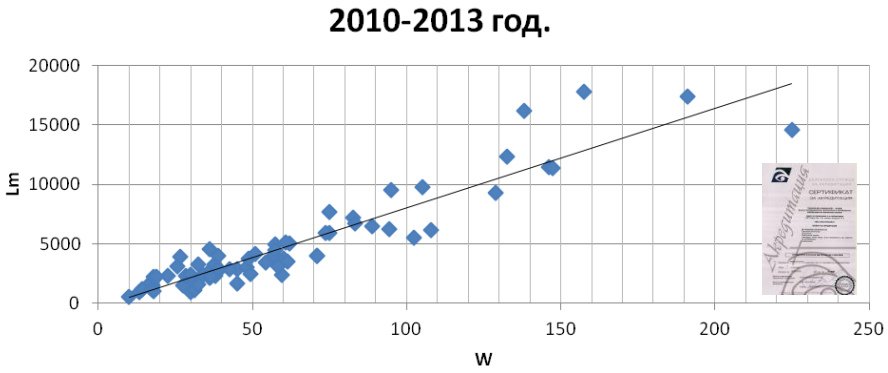
- Температури на корпуса: Min t = 27°C Max t= 55,7°C
- Max P = 225 W max Φ = 14567 lm max lm/W = 87,6 lm/W

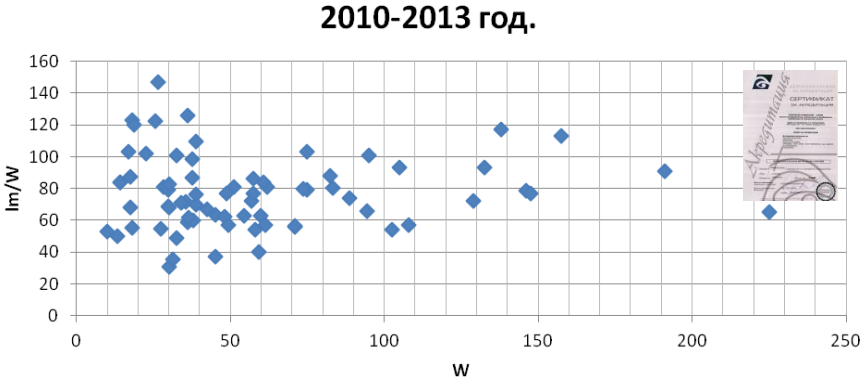
2012 г.:

- Температури на корпуса: Min t = 25°C Max t= 58°C
- Max P = 157,5 W max Φ = 17835 lm max lm/W = 117 lm/W

2013 г.:

- Температури на корпуса: Min t = 29°C Max t= 47°C
- Max P = 83,2 W max Φ = 6688 lm max lm/W = 147 lm/W


2010-2013 год.
20000
15000
10000
5000
0
Lm
0
50
100
150
200
250
W


2010-2013 год.
160
140
120
100
80
60
40
20
0
lm/W
0
50
100
150
200
250
W

Тренд на светлинната ефективност
120
100
80
60
40
20
0
Ефективност, lm/W
2010
2011
2012
2013
Години

Тренд на средния светлинен поток в годините
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Светлинен поток, lm
2010
2011
2012
2013
Години

Заключение

След тази ретроспекция на светлодиодното улично осветление могат да се направят следните констатации:

- Светлодиодите понастоящем предлагат изключителни светлотехнически, енергийни, екологични и експлоатационни предимства. За да бъдат практически реализирани и постигнати са необходими технически познания, професионализъм, опит и контрол.
- Трябва да се има предвид и да се използва няколко годишния опит на Европейските страни, като се проучат и анализират причините за установената деградация на редица светлодиодни осветители работещи няколко години в реални условия.
- Очевидно е необходим организиран сериозен контрол на произвежданите светлодиодни осветители в акредитирани светлотехнически лаборатории, а също така контрол на проектите и особено на качеството на строително- монтажните работи.
- Особено внимание трябва да се обърне на експлоатацията на светлодиодните осветители вкл. ритмичната доставка на необходимите резервни части, материали и уреди.

Литература

1. M. Batarillo, R. Heinz, LED in Außenbeleuchtung, Lichttagung Dresden , 2012
2 Tran Quoc Khanh, Die aktuelle Entwicklung von LED und LED Leuchten, Lichttagung Warnemuende, 2012.
3. R.Muellejans, Rekommunalisierung der Strassenbeleuchtung- die Alternative?! Gesamtkonzept, Kostensenkungen, Ergebnisse und Erfahrungen in der Stadt Dueren, Licttagung Dresden2013
4. S. Fischer, Konventionelle Beleuchtungstechnologien – eine Auslaufmodel, Lichttagung Dresden 2013,
5. K. Fischer, Bundeswettbewerb “energiee efficient Strassenbeleuchtung” des BMU-Sachstandt und Schlussfolgerung), Lichttagung Dresden 2013,
6. B. Wintresteller, LED in der kommunalen Beleuchtung Oesterreichs- Erfahrungen und Vorschlaege, Lichttagung Dresden , 2013
7. М. Вълчев, Адаптивно улично осветление, дипломна работа , ТУ София, 2013
8. Проспекти и каталози на Philips, Osram, GE, Siteco, Nichia, Cree, Citizen, Seul Semiconductor

Автори: Николай Василев, проф. д-р инж., E-mail address: *nvassilev@tu-sofia.bg*; Николина Янева маг. физ., НИИК Лаборатория по осветителна техника, Технически Университет - София, E-mail address: *niya@tu-sofia.bg*; Марин Вълчев – студент

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** Проф. А. Пачаманов

УЧАСТИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛИ ИЗПОЛЗВАЩИ ВЪЗОБНОВЯЕМИ ИЗТОЧНИЦИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИТЕ ПАЗАРИ

Никола Николов, Димо Стоилов

Резюме: *Статията има за цел да анализира механизмите за интегриране в електроенергийните пазари на произведената от възобновяеми източници електрическа енергия, прилагани от водещи държави.*
Ключови думи: *възобновяеми източници, електроенергийни пазари*

PARTICIPATION OF RENEWABLE SOURCES GENERATORS IN ELECTRICITY MARKETS

Nikola Nikolov, Dimo Stoilov

Abstract: *This article is intended to analyze the mechanisms of integration for renewable electricity in electricity markets implemented by leading countries.*

Keywords: *renewable sources, electricity markets*

1. Въведение

Повишаващият се дял на мощностите от възобновяеми източници в общия обем на производство, увеличаващото се количество на непостоянните производствени мощности, както и нарастващата конкурентност между отделните производители, налагат необходимостта от преразглеждане на основните структурообразуващи пазари в електроенергийния отрасъл. Необходим е по-ефикасен и по-търговски ориентиран механизъм, подобряващ равнопоставеността и конкурентоспособността между отделните пазарни участници.

В преструктурираните електроенергийни пазари основани на конкуренция и при традиционно управляваните пазари на дребно съществуват технически и институционални бариери, които затрудняват въвеждането на динамичното и влияещо върху потреблението ценообразуване. Това явление може да има неблагоприятен ефект върху публично провежданите политики, подтиквайки към неефективни инвестиции в развитието на енергийните технологии.

2. Механизми на Немския закон за възобновяема енергия.

Успехът на немския закон за възобновяема енергия лесно може да се определи, като се вземат предвид новите инсталирани мощности, осъществените инвестиции и нарастващия брой на заетите лица в сектора. В още 18 държави членки на Европейския съюз е използван сходен на немския преференциален механизъм дотиращ развитието на технологиите за производство на енергия от ВИ.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Немският закон за възобновяема енергия е изправен пред нови предизвикателства, предвид нарастващия дял на производствените мощности от ВИ. Към настоящият момент операторите продават на еднаква цена произведената енергия, независимо от разликите в пазарната стойност на произведените мощности, която се определя в зависимост от съвпадението с товаровите върхове. По тази причина е необходимо да се въведат стимулиращи мерки, осигуряващи по-висока стойност при съвпадение на производството от ВИ и потреблението. Успоредно с това е необходимо, разходите за производство и снабдяване да бъдат възможно най-ниски, т.е. поне да се запазят на сегашните нива. Постигането на гореописаните цели, трябва да се осъществява без да се застрашава бързото развитие на възобновяемите източници на енергия, необходими за справянето с предизвикателствата свързани с изменението на климата.

2.1. Анализ на алтернативни модели за продажби и балансиране

Обсъждани са били [1] три алтернативни модела за развитие и подобряване на немския закон за възобновяема енергия, с цел развитие на използването на възобновяемите източници. Важно е добрите практики въведени от закона да бъдат запазени. Следва да се отчете и факта, че финансовите разходи на домакинствата не са неоправдано високи.

2.2.1 Модел „търговец на дребно“

Този модел прехвърля отговорността за продажбите на възобновяемите източници на енергия от операторите на мрежата към търговците на дребно. Търговците на дребно биха купували електрическата енергия произведена от ВИ в зависимост от профила на общото производство от възобновяеми източници, както се изисква от закона. По този начин търговците на дребно ще бъдат отговорни за въвеждането на променливото производство от ВИ в ЕЕС. При този модел, търговците няма както досега да получават преобразувано по график (от системния оператор) количество електрическа енергия, като по този начин ще е необходимо да се намери механизъм по който да я напаснат към действителното потребление на техните клиенти. Развитието в конкурентно отношение, което би се получило е стимул при този модел, който ще подтикне търговците да напаснат товарите на техните клиенти, колкото се може по-добре. Налагането на този модел, основаващ се на конкурентност между търговците на дребно, се очаква да намали разходите и да намали цената на електрическата енергия за крайните потребители. Вероятно е по-големите търговци на дребно да организират това въвеждане на енергията от ВИ в пазарите самостоятелно, докато при по-малките дружества с ограничени възможности, това ще се случва с помощта на трети участници, предлагащи балансиращи услуги.

2.2.2. Модел „пазарен посредник“

Основното при този модел са един или няколко пазарни посредници, отговорни за ефективното използване и продажби на електрическата енергия получена от ВИ. Операторите на разпределителните мрежи ще бъдат задължени да изкупуват произведената енергия от производителите и ще плащат енергията по определените от немския закон преференциални цени. След това операторите ще

прехвърлят това количество енергия към пазарния посредник и ще възстановят заплатения към ВИ разход. Пазарния посредник от своя страна ще търси начин за увеличаване на постъпленията си чрез продажбата на тази енергия. Например една от възможностите е чрез продажба на енергия за балансиращи услуги или чрез продажба на енергия на пазара за следващия ден. Допълнително пазарните посредници биха могли да сключват двустранни договори с конвенционалните производители или търговците на конценционално произведена енергия. Друга възможност е прякото снабдяване на крайните потребители – особенно печелившо би било за потребители, способни да напаснат тяхното потребление към изменящата се производствена способност на ВИ.

Разглеждайки сегашната структура на пазарите и ценовите нива, печалбите от продажбата на зелена енергия не биха били достатачни за да се покрие преференциалната цена и разходите свързани с нея. По тази причина е необходимо пазарните посредници да получават надбавка под формата на премия. За да се финансират допълнителните разходи за възобновяема енергия, крайните потребители ще плащат тази добавка към таксите за достъп до преносната мрежа. След което тази добавка ще бъде прехвърлена към пазарните посредници. Резултатът, който се очаква да се постигне е разликата в разходите да бъде включена и да покрива разходите за балансиращия механизъм. Търговците няма както досега да купуват преобразувано по график количество електрическа енергия.

2.2.3. Модел „премийна възможност“

Съществени в модела „премийна възможност“ са стимулите свързани с по-доброто интегриране на произведената енергия от централите използващи ВИ. В модела определен от немския закон се предвижда преференциална цена, имаща фиксирана стойност. Преференцийте са определени от технологиите, които са залегнали при изграждането на централите, като тези преференции намаляват всяка година. Разчита се изцяло на операторите на тези централи да търгуват произведената от тях енергия и по този начин да постигат доходи, по-големи от преференциално залегналите. За разлика от сега действащия закон за възобновяема енергия в Германия, операторите на мрежите няма да бъдат обвързани със закупуването на произведената енергия от ВИ. Частта от доходите, определени от преференциите не са обвързани с ценови риск, като по този начин се запазва методиката на възнаграждение от сегашния закон. Другата част, определена от търгуването на пазарите би била обект свързан с нормално определените цени за електрическа енергия и рисковете свързани с това. В Германия съществува ограничена конкуренция на пазарите между отделните производители, което създава трудности за търгуването при рационални и честни условия. За да се подобрят условията на пазарите за енергия и да се намалят рисковете за инвестиции, би било основателно да се даде възможност на операторите на централи използващи ВИ да продават енергията на преференциални цени, определени от немския закон или да им се предостави премийна възможност за участието им в основните пазари.

Ключът за по-доброто интегриране на възобновяемите източници е в по-доброто разпределение на отговорностите между отделните участници. От трите различни представени модела „търговец на дребно“ внася най-малко изменение в стимулиращият механизъм. При него търговците обслужващи крайните потребители получават непосредствено произведената от ВИ електрическа енергия. Отговорността за адаптацията на производството спрямо товара е тяхна. В модела „пазарен посредник“ един или няколко независими посредници, например като енергийните брокери са отговорни за продажбата на произведената енергия. Моделът „премийна възможност“ прехвърля изцяло отговорността за търговията на възобновяема енергия към производителите.

3. Успешното развитие на възобновяемата енергия в Тексас в условията на конкурентен пазарен механизъм

Тексас притежава един от най-конкурентните пазари за електрическа енергия [2]. Провежданите политики и програми са били наложени на пазара, като се е разчитало пазарните механизми да отговорят на поставените цели. Важно е да се отчита, че степента на развитие на възобновяемите източници не е толкова силно обусловена от чисто пазарни сили. Все пак Тексас е успешен пример за внедряване и развитие на производството от ВИ в пазар движен от силна конкуренция, макар и резкият растеж на вятърното електропроизводство да довежда до някой отрицателни влияния, рефлектиращи върху надеждността на системата и повишаването на разходите.

3.1. Производство и потребление на енергия в Тексас

Тексас е голям консуматор и производител на изкопаеми горива. Щатът консумира приблизително 12% от всички енергийни ресурси, използвани в САЩ. През 2006 година консумацията на енергия на Тексас възлиза на 11,744 трилиона Btu, изпреварвайки Калифорния с близо 39%.

35% от електрическите потребности на щата се задоволяват от изгарянето на въглищни горива. Като един от най-големите консуматори на въглища Тексас е на първо място по отделяне на вредни емисии, като отделя 10% от цялостните за САЩ. Около 85% от електрическото потребление се задоволява, чрез пазарите на Съвета за електрическа надеждност на Тексас (Electric Reliability Council of Texas - ERCOT), управляващ приблизително 90TW производствени мощности. Приблизително 44% от електрическата енергия се добива при използване на природен газ. Като „вътрешно развит - щатски“ пазар, с ограничени междусистемни връзки с други пазари от други щати федералната регулаторна юрисдикция е слабо застъпена. Този необичаен статус, позволява тексаския пазар за електрическа енергия да приема политики и пазарни функции, които се различават от другите пазари в САЩ.

3.2. Развитие на енергията добивана от възобновяеми източници

Едва напоследък Тексас е започнал усиленото усвояване на потенциала на възобновяемите ресурси с който разполага. Законопроект 7 на сената, същият който въвежда конкуренцията в пазарите управлявани от независимия системен

оператор, издава програмни разпоредби за внедряването и развитието на възобновяемите източници на електрическа енергия. Няколко години по-късно Тексас изпреварва Калифорния по изградени вятърни паркове и към средата на 2010 година има над 9000MW инсталирани вятърни мощности. Като допълнение приблизително 120MW са мощностите на изградените фотоволтаични централи след 1999 година, 40,3MW са мощностите от биомаса, 33,1MW са допълнително изградените мощности от ВЕЦ и 80,3MW са от сметищен газ. Следователно допълнително изградените мощности присъединени към мрежата на независимия оператор за десет годишен период са около 9272MW.

Произведената енергия от вятър възлиза на 8,4% от пълната, за периода от 1 януари 2010 година до 31 март на същата година. Тексас е дом на едни от най-големите вятърни паркове в света. Като пример може да се посочи Horse Hollow, който е изграден чрез 421 вятърни турбини с обща генерирана мощност от 735MW.

3.3. Проведени политики, способстващи за растежа на електропроизводството от възобновяемите източници в Тексас

Успехът основно може да се отдаде на огромния потенциал, с който разполага щата Тексас, използването на правилни насърчаващи политики, въвеждането на система от търгуеми кредити за енергия от ВИ, федерални данъчни кредити, създадени за да подтикнат инвестициите в технологиите за производство на енергия от ВИ и благоприятните конкурентни пазарни условия.

Тексас притежава най-големият вятърен ресурс в САЩ. Националната лаборатория за възобновяема енергия е определила потенциал от 1 901 530MW и 6 527 850GWh, което надвишава многократно нуждите на потреблението в щата.

Програмата за търгуеми кредити за възобновяема енергия създава гъвкавост, необходима за осъществяването на поставените цели, като справедливо разпределя отговорностите сред снабдяващите дружества обслужващи потребителите. Според тази програма, всяко дружество трябва да получава кредити, еквивалентни по стойност на дяла, покриващ поставената цел за произведена енергия от възобновяеми източници, за съответната година. Независимият системен оператор (Съвета за електрическа надеждност на Тексас) изчислява този дял за всяко дружество, базирайки се на реализираните продажби на електрическа енергия, произведена от ВИ. Тези кредити се предоставят на сертифицирани от регулаторната комисия на щата производители на тримесечна основа, като се отпускат от Съвета за електрическа надеждност на Тексас. Стойността на кредитите се определя от физически измерените стойности на произведената електрическа енергия, като те могат да се продават, прехвърлят или отстъпват. През 2009 година 150 дружества са притежавали такива кредити, като са продали енергия със стойност 23 594 GWh от 103 производствени компании.

Законопроект 7 на сената разглежда също така и необходимите инвестиции, които трябва да се направят в преносната мрежа за да могат да се присъединят значително увеличените мощности от ВИ. Законопроект 20 на сената от 2005 година задължава регулаторната комисия на Тексас да: (1) раздели щат Тексас

на зони за конкурентност между производителите на електрическа енергия от ВИ в зависимост от ресурсите; (2) се състави план за развитие и разширение на преносната мрежа така че да може да се пренася допълнително произведената мощност от ВИ до големите товарови центрове. Регулаторната комисия дефинира 5 географски зони за конкурентност. За да се свържат тези зони към мрежата управлявана от независимия системен оператор, комисията избира „Сценарий за развитие 2“, предложен от Съвета за електрическа надеждност на Тексас, който предвижда изграждането на 2334 мили (или 3734km) допълнителни преносни електропроводи, с което ще се обезпечи пренасянето на мощност от 18 456MW. Комитетът е определил конкретни линии да бъдат изградени до края на 2012 година, като по този начин ще се намалят „теснините“ в райони с големи инсталирани вятърни мощности.

Федералните данъчни кредити са били основният стимулиращ механизъм на национално ниво за развитието на възобновяемите източници на електрическа енергия. Именно те са направили икономически постижими проектите за изграждане на вятърните паркове в Тексас. Отпускали са се кредити със стойност 2,1 цента/kWh произведена енергия от вятърните паркове. Този стимулиращ механизъм първоначално е бил създаден от Закона за енергийната политика през 1992 година. Чрез Закона за американското възстановяване и реинвестиране, конгресът е разширил Закона за енергийната политика на 31 декмври 2012 година. В момента 30% от плащаните данъци върху доходите се отпускат под формата на кредити за развитието на фотоволтаичните системи.

3.4. Предизвикателства

След като производството от ВИ окончателно е преминало бариерата от 5% спрямо общия микс от производствени мощности търгувани на пазара са се появили множество проблеми свързани с диспечирането. Собствениците и операторите на конвенционални централи са подали множество жалби, по отношение на работата и допълнителните разходи предизвикани от вятърните паркове. Основният упрек е бил насочен към това, че те не са участвали пропорционално в предоставянето на реактивна мощност и не предприемат адекватни действия при изменение на системната честота. Потребителите и търговците са изпитвали притеснения свързани с повишените разходи за допълнителни услуги, както и с трудностите на прогнозиране и управление на вятърните паркове.

Променливият характер по отношение на производствените способности на вятърните паркове подтиква системния оператор да поддържа по-високи нива на резервиращите мощности. През 2008 година, изискванията към цялата система за несинхронизиран резерв са повишени. Услугите свързани с резервирането пряко зависят от големината на инсталираните мощности за производство на електроенергия от вятър. При първоначалната формулировка на пазарните правила всички разходи по отношение на спомагателните услуги са били прехвърляни към дружествата, снабдяващи крайните потребители, възприемайки че тези услуги са свързани с изискванията на потребителите. Вече е осъзнато, че производителите на вятърна електроенергия трябва да поемат част от тях.

4. Ролята на възобновяемите енергийни източници и регулаторните реформи в пазарите на електроенергия в ЕС

Следвайки директиви 96/92/ЕС и 2003/54/ЕС за електрическите пазари, същите са били изцяло либерализирани през 2007 година [3]. Целта на тази либерализация е била да се постигне повишена конкуренция, като по този начин се е очаквало да се намалят цените за електроенергия за крайните потребители. Теоритично конкурентните пазари би трябвало да довеждат до повишаване на ефективността в икономически план. Реалните ползи от повишаването на конкуренцията на пазарите, представляват обект на дебатиране, защото отварянето на пазарите не винаги и незадължително води до пазарна ефективност и конкурентно ценообразуване.

Съществува дебат по отношение на участието на производителите на енергия от ВИ и техният ефект върху цените за домакинствата. По-високата консумация на електрическа енергия, произведена от ВИ, би довела до намаляване на цените на пазарите на едро поради намаляването на променливите разходи, характерни за конвенционалните централи. От друга страна развитието на технологиите за възобновяеми енергийни източници основно се подтиква от публични стимулиращи механизми, които се финансират от пазарите за електроенергия, чрез повишаване на крайната изкупна цена за потребителите. И двете явления (намаляването на цените за пазара на едро и високите цени за потребителите) в случая с използването на датските вятърни паркове са се развивали успоредно. Установено е, че предлаганите тарифи за изкупуване предполагат годишна субсидия от 0,1 – 0,3 милиарда евро към производителите на енергия от вятър, която трябва да се покрива от крайните потребители. Все пак редно е да се отчете, че тази субсидия е частично покривана и от понижените цени на пазарите, получени от по-малките стойности на разходите за производство, които вятърните паркове осигуряват. Като се отчете съчетаването на двете явления цените, които се оказва че трябва да плащат домакинствата, са повишени средно с 0,05 – 0,6 евро цента като следствие на въвеждането в експлоатация на датските вятърни паркове. Всъщност, крайният ефект от насърчаването на ВИ е различен за отделните държави. Например при разглеждането на възможността за намаляване на разходите чрез производство на електроенергия от вятър се е постигнало намаляване на крайните цени за електричество в Германия и в Испания.

Схемата на ЕС за търговия с въглеродни емисии също оказва влияние върху формирането на цените на електрическата енергия, като остойностява част от разходите за опазване на околната среда. Заместването на конвенционалните централи за производство на електрическа енергия с възобновяеми може да доведе до намаляване на общите разходи плащани за отделените вредни емисии, като по този косвен начин се намали стойността на разхода за електрическа енергия.

Изложеното показва, че развитието на електрическите пазари и тяхната либерализация и въвеждането на производители, използващи ВИ са важни фактори при определянето и формирането на крайната цена, плащана от потребителите.

Все още голямата част от технологиите за ВИ са непечеливши спрямо настоящите цени на електроенергията. Следователно тяхното развитие се поддържа чрез различни обществени механизми за стимулиране като преференциално изкупуване, квотни задължения, търговия със зелени сертификати, фискални мерки, данъчни облекчения, инвестиционни субсидии и други. В повечето държави членки на ЕС, промотиращият механизъм за въвеждане на ВИ е под формата на преференциални тарифи за изкупуване на произведената енергия. Изключение правят Обединеното кралство, Швеция, Италия, Белгия и Полша като там основен механизъм за развитието на технологиите от ВИ са квотните задължения.

Развитието на възобновяемата енергия в ЕС се е превърнало във възможност за постигане на целите за опазване на околната среда и намаляване на енергийната зависимост на Европа. Въпреки допълнителните разходи свързани с възобновяемата енергия, плащани от крайните потребители, същите частично се покриват от непреките ползи за обществото. Всъщност цените на електрическата енергия в ЕС са свързани с международните цени на енергийните стоки, като следствие от високата енергийна зависимост. Проведени изследвания показват, че цените на електрическата енергия нарастват при повишаване на енергийната зависимост. Енергията от ВИ дава възможност за намаляването на това влияние и по този косвен начин също се отразява върху цените.

Литература

[1] Langniβ O., Diekmann J., Lehr U., Advanced mechanisms for the promotion of renewable energy – Models for the future evolution of the German Renewable Energy Act, Energy policy, vol. 37, p. 1289-1297, 2009

[2] Zarnikau J., Successful renewable energy development in a competitive electricity market: A Texas case study, Energy policy, vol. 39, p. 3906-3913, 2011.

[3] Moreno B., Lopez A., Garcia-Alvarez M., The electricity prices in the European Union. The role of renewable energies and regulatory electric market reforms, Energy policy, vol. 48, p. 307-313, 2012

Автори: Никола Неделчев Николов, асистент, докторант, в катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *n_nikolov@tu-sofia.bg;* Димо Георгиев Стоилов, доцент катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. М. Кънева

ОГРАНИЧИТЕЛ НА ТОК НА КЪСО СЪЕДИНЕНИЕ

Николай Караджов

Резюме: *В работата се разглежда ограничителите на ток на късо съединение от индуктивен тип. Сравнени са някои видове ограничители на ток на късо съединение ОТКС. Представена е инженерна методика за проектирането им. Проведено е експериментално и симулационно изследване чрез МКЕ на реализирания лабораторен прототип са анализирани получените резултати.*

Ключови думи: *индуктивен ограничител на ток на късо съединение, метод с крайни елементи.*

FAULT CURRENT LIMITER

Nikolay Karadzhov

Abstract: *In the work an inductive fault current limiter is examined. Some types of fault current limiters are compared. Engineer design method is proposed. Experimental and simulation investigation using FEM are made and the results are analysed.*

Keywords: *inductive fault current limiter*

1. Въведение

Максималната стойност на тока на късо съединение (к.с.) е един от най-важните оразмерителни параметри, определящ габаритите и цената на електросъоръженията. Наред с това ограничаването на токовете на к.с. води както до намаляване на максималните токове на к.с. за част от съществуващата апаратурата като трансформатори, електропроводи, прекъсвачи и шини, така и до подобряване на устойчивостта на системата и на някои от показателите за качеството на електрическата енергия. Проблемът свързан с ограничаването на тока на к.с. е особено характерен за вътрешнозаводските мрежи средно напрежение (Ср.Н) използващи напрежение 6kV.

Понастоящем, ограничаването на тока на к.с. в електрическата система става или чрез използване на предпазители, на прекъсвачи, на въздушни реактори или трансформатори с повишено разсейване или чрез промяна в конфигурацията на мрежата. През последните години усилено се разработват нови алтернативни устройства. Особено място сред тях заемат т.нар. ограничители на ток на късо съединение. Те са предназначени чрез промяна на импеданса на мрежата, да ограничат ударния и трайния ток на к.с. до стойности които не предизвикват значително термично и електродинамично натоварване на електросъоръженията.

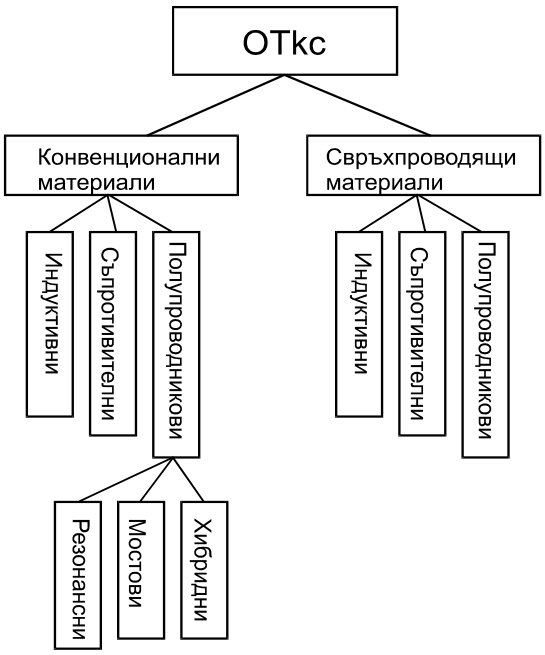
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

В работата се разглежда ограничител на ток на к.с. (ОТКС) изработен от конвенционални материали - със стоманен магнитопровод и две бобини (работна и управляваща). Накратко са представени инженерна методика за изчисляване на параметрите на т.нар.”индуктивен” ОТКС, симулационен модел реализиран с използването на метода с крайните елементи (МКЕ) и резултати от проведени експериментални изследвания в статичен режим.

2. Известни решения

Съществуват различни класификации на известните ОТКС. Според CIGRE WG A3.10, ОТКС са пасивни или активни в зависимост от това променя ли се техния импеданс при преминаване от режим на изчакване в режим на токоограничаване. Според типа на използваните материали, ОТКС се разделят



Фиг.1

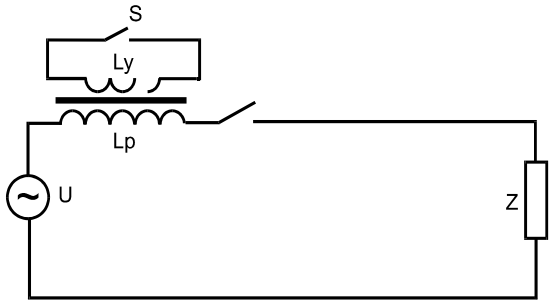
на две групи – ОТКС изработени от конвенционални материали и ОТкс използващи свръхпроводящи материали (фиг.1). В зависимост от това какъв е характерът на преобладаващия импеданс, ОТКС могат да бъдат индуктивни (с насищащ се магнитопровод) или съпротивителни. Особено място заемат полупроводниковите ОТКС – при тях се използват нелинейни индуктивности или съпротивления и мощни полупроводникови елементи осигуряващи подходящ режим на работа на устройството.

За всеки един от посочените видове ОТкс са присъщи едни или други предимства или недостатъци [3,4,5].

3. Ново решение

3.1. Принцип на действие

Работната намотка на електромагнитния ОТКС се включва последователно на товара (фиг.2); чрез комутатора S управляващата намотка е дадена на късо, магнитната система не е наситена, а реактансът на работната намотка е сравнително малък.



Фиг.2

При възникване на к.с. през работната намотка протича на токът на к.с., комутаторът S прекъсва контура на управляващата намотка, протичащият през работната намотка свръхток създава магнитен поток затварящ се през магнитопровода, реактансът на работната намотка се увеличава и ограничава протичащият ток на к.с. до приемливи стойности. В съответствие със закона за пълния ток приложен към магнитна верига с произволна форма, еквивалентната индуктивност на намотката създаваща магнитния поток е:

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{w_1^2 S_a}{l_a + \delta \mu_r} \tag{1}$$

където: S_a е сечението на магнитопровода; l_a – средната дължина на магнитната силова линия; δ – въздушната междина; μ_o – магнитната проницаемост на вакуум; μ_r – специфичната магнитна проницаемост на средата.
Изменението на еквивалентният реактанс на ОТКС става чрез промяна на специфичната магнитна проницаемост на магнитната система.

3.2. Инженерно проектиране на ОТКС *от индуктивен тип*

Нека да са зададени напрежението на мрежата $U_{ном}$, трайният ток на к.с. I_{kc}, индуктивността на ОТкс в режим на ограничаване L_o и параметрите на комутатора S (U_{2Sm}, I_{2Sm}, време за изключване t_u). При проектирането на магнитната верига се пренебрегва разсейването на магнитните потоци.
Инженерното проектиране на индуктивен ОТКС включва следните стъпки:

а/ в зависимост от параметрите на използваната електротехническа стомана се избират стойностите на максималната магнитна индукция $B_{m,1}$ и магнитния интензитет H. Основното съображение е, че в режим на ограничаване магнитната проницаемост μ трябва да има максимална стойност.

б/ избират се геометричните размери на магнитопровода - S_a, l_a, δ и броя навивки на работната намотка w_1:

$$w_1 = \sqrt{\frac{l_a + \delta \mu_r}{\mu_o \mu_r S_a} L_o} \qquad S_a = \frac{U_{\text{ном}}}{4{,}44 f w_p B_{m,1}} \tag{2}$$

Стойности за l_a, δ и w_1 трябва да удовлетворяват условието $\frac{I_{kc} w_1}{H(l_a + \delta \mu_r)} \le 0{,}1$

в/ оразмерява се управляващата намотка, като се отчитат параметрите на използвания комутатор S:

$$w_2 = \frac{w_1}{n} \frac{I_{2S}}{I_{kc}} = w_1 \frac{U_{2S}}{U_{ном}} \tag{3}$$

където n е броят на управляващите намотки.

г/ определя се магнитната индукция и индуктивността на работната намотка в режим на готовност:

$$B_{m,1} = \frac{2{,}55 I_{kc}}{4{,}44 f S_a} \frac{l_a}{l_a + \delta \mu_r} z_{20} \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \tag{4}$$

където z_{20} е пълното съпротивление на управляващата верига,

$$z_{20} = \sqrt{(R_2 + R_{2S})^2 + (X_2 + X_{2S})^2}$$

R_2, X_2, R_{2S} , X_{2S} - активни съпротивления и реактанси съответно на управляващата намотка и на комутатора.

Максималната магнитната индукция в режим на готовност не трябва да надвишава стойност 0,1*T*. В противен случай, геометричните размери на електромагнитната система трябва да се коригират.

След като се определят посочените параметри на електромагнитната система, се избират сеченията на проводниците на работната и на управляващата намотки, изчисляват се електродинамичните сили действащи върху работната намотката при възникване на к.с. и загубите в системата [1,2].

3.3. Симулационно изследване на ОТКС чрез МКЕ

Полето в ОТкс създадено от работната намотка е квазистационарно електромагнитно поле в което източниците на ток и напрежение се изменят във времето по синусоидален закон с честота 50Hz. Счита се, че честотата е достатъчно малка за да се пренебрегнат токовете на електрическа индукция.

Използван е програмен продукт Comsol Multiphysics v.4.3. за изчисляване на магнитни полета в среда „Magnetic Field" в часта му "AC/DC'. За моделиране на геометрията са използвани 3D примитивите, които са вградени в програмата. Зададени са използваните материали за съответните области. Целия обем е разделен на крайни елементи – 132 512 тетраедъри (фиг.3) .

Приложен е закона на Ампер в следната му форма

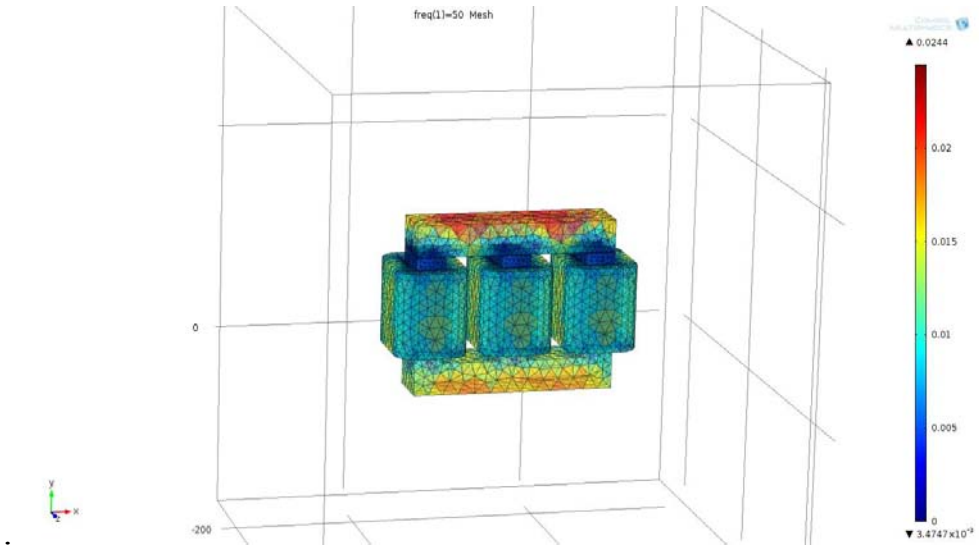
$$\left(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_r\right)A + \nabla \times \frac{B}{\mu_0\mu_r} - \gamma v \times B = J_e \qquad (5)$$

където ε_o е диелектричната проницаемост на вакуум; ε_r – диелектричната проницаемост на средата; μ_o – магнитната проницаемост на вакуум; μ_r - специфичната магнитна проницаемост на средата; J_e – токова плътност.

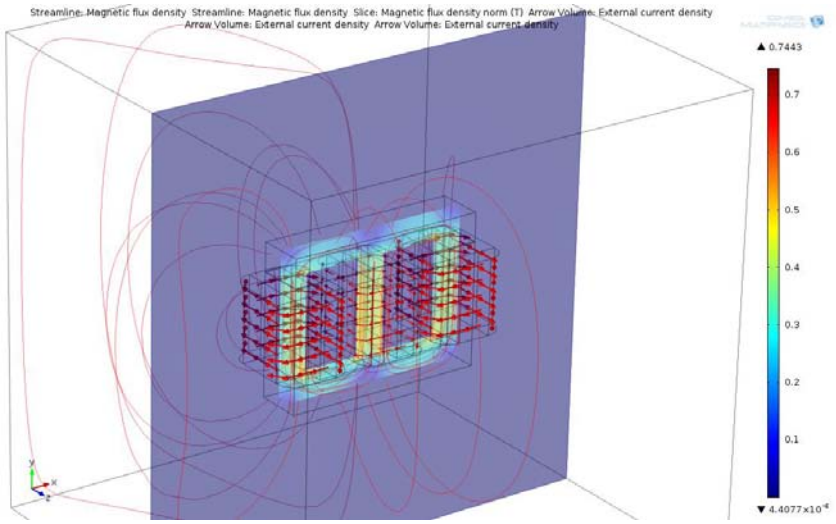
На фиг.3 е показана мрежата от крайни елементи, а на фиг.4 и на фиг.5 са представени разпределенията на магнитните полета на ОТКС и токовата плътност в намотките в режим на готовност ($I_{раб}=3,75A$ и $I_{упр}=50A$) и в режим на ограничаване ($I_{раб}=2,42A$).

4. Резултати

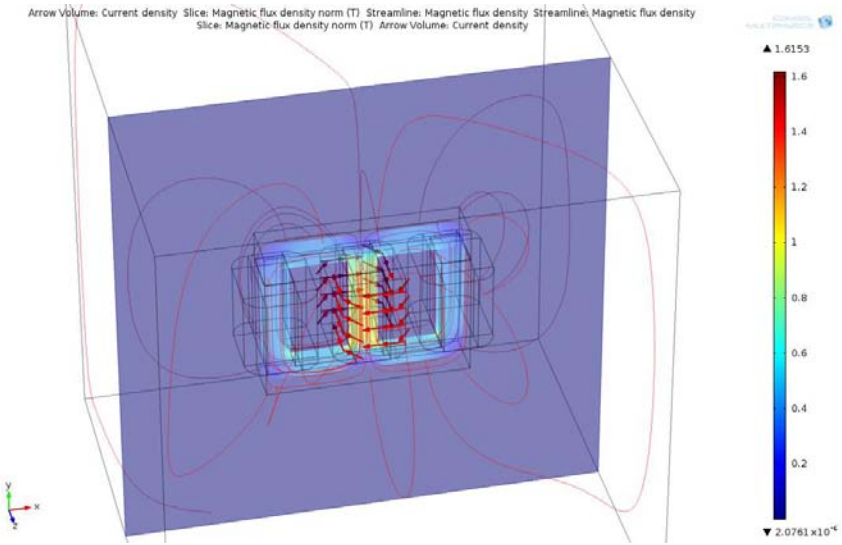
Използвайки посочената методика, е разработен лабораторен прототип на ОТКС с параметри: номинално напрежение $U=90V$, ток на к.с. $I_{kc}=3,75A$, индуктивност в режим на ограничаване $L_o= 100mH$; като комутаторен ключ е използван автоматичен прекъсвач тип NS100N ($U_{2S}=400V$, I_{2S}=63A) на Schneider Electric. Използван е магнитопровод с EI-образна форма изработен от стомана M5/130 със сечение $0,0015m^2$; средната дължина на магнитната силова линия е l_a=0,$444m$, работната намотка е поставена на средното ядро, а двете на уравняващи намотки - на външните ядра, като $w_1=250$, $q_1=1,5mm^2$; $w_2=30$, $q_2=72mm^2$. Прието е, че при магнитна индукция $B_m=1,16T$ магнитната проницаемост има максимална стойност и $\mu=0,041$.



Фиг.3. Мрежа на крайните елементите

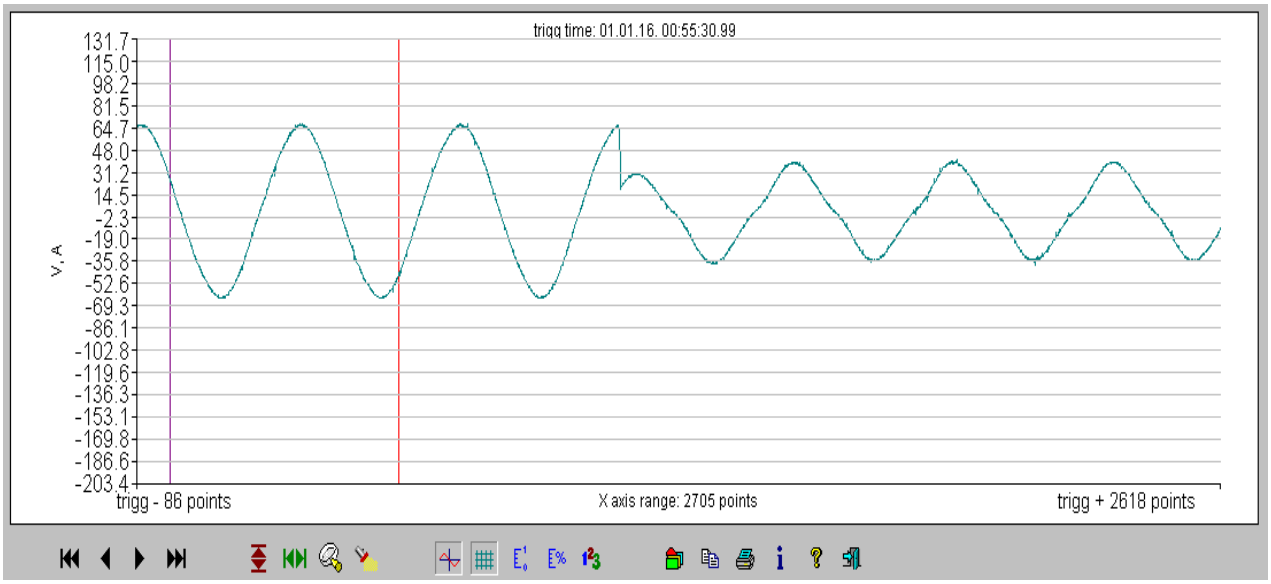


Фиг.4. Разпределение на магнитното поле на ОТКС и токова плътност в намотките в режим на готовност L=38mH



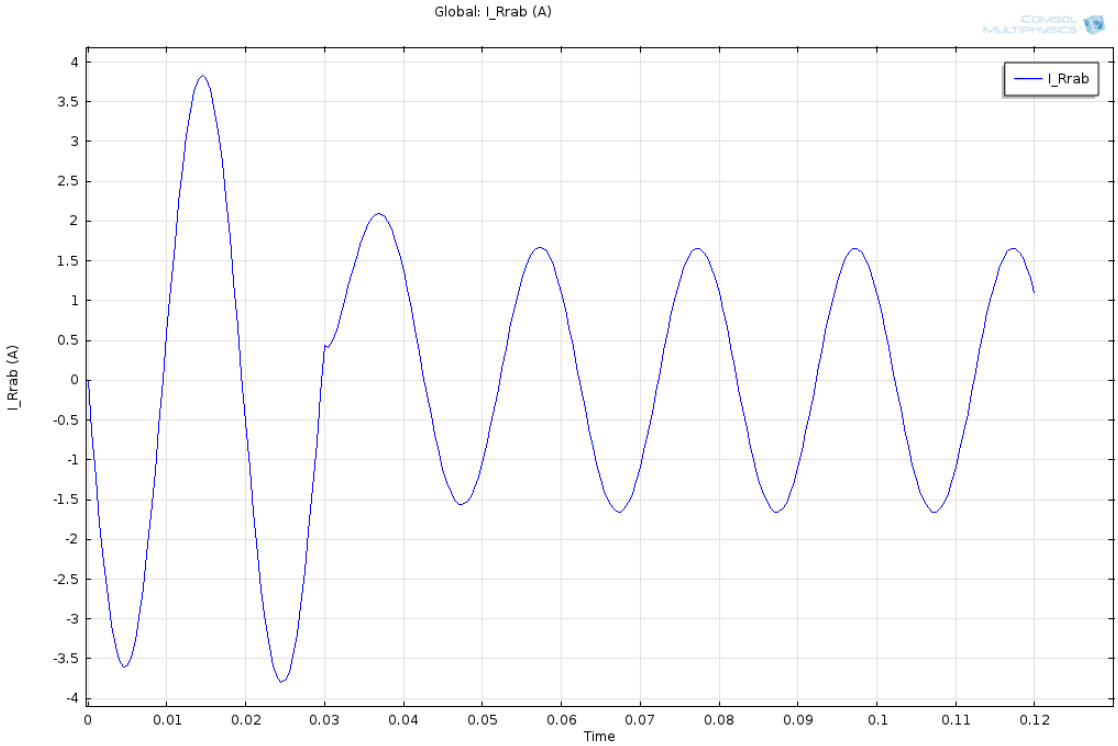
Фиг.5. Разпределение на магнитното поле на ОТКС и токова плътност в намотките в режим на ограничаване L=92.8mH

На фиг.6 е показано изменението на работния ток при преминаване от режим на готовност в режим на ограничаване, регистрирано с анализатор MI2191. Действителните стойности на тока са 10 пъти по-малки от измерените.



Фиг.6. Времедиаграма на работен ток при преминаване от режим на готовност към режим на ограничаване.

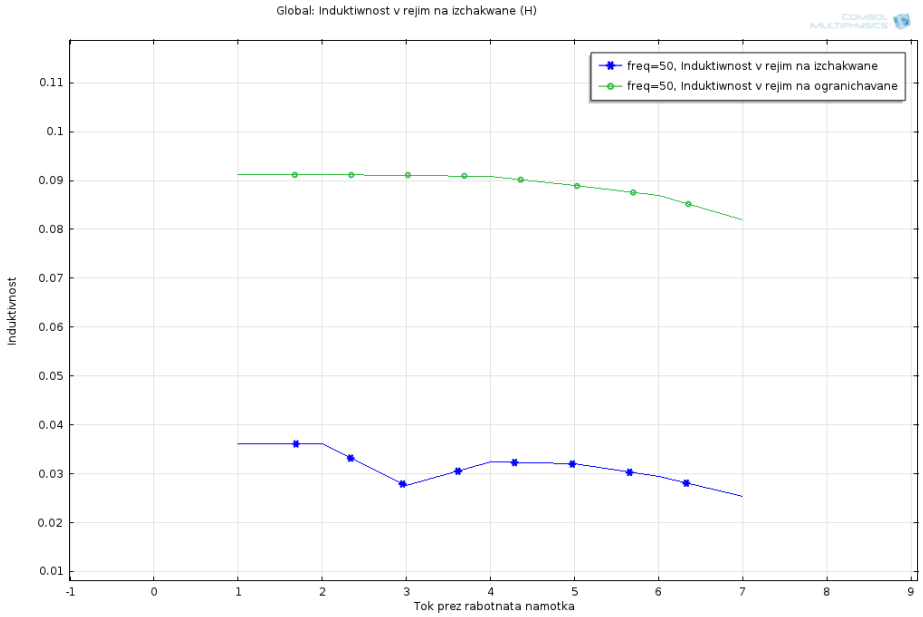
На фиг.7 е показан аналогичен преходен процес при траен ток на късо съединение 4А. При преминаване от режим на готовност в режим на ограничаване амплитудата на тока намалява около 2 пъти спрямо тока във веригата.



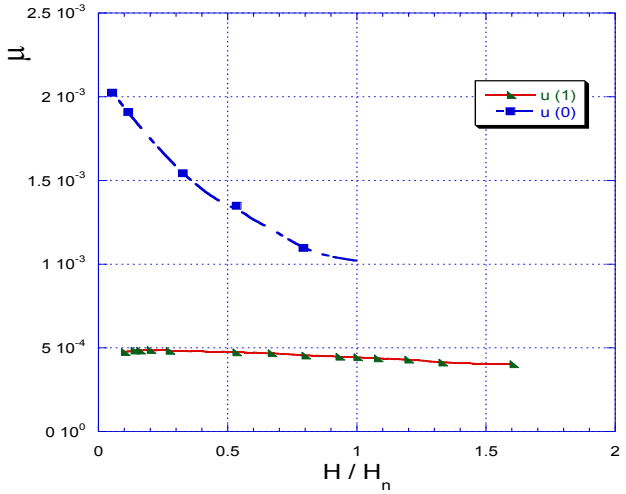
Фиг.7. Времедиаграма на работен ток при преминаване от режим на готовност към режим на ограничаване

На фиг.8 е дадено изменението на индуктивността на работната намотка в зависимост от работния ток в двата режима. На фиг.9 е представено изменението на магнитната проницаемост (с 1 е означен режимът на готовност; с 0 – на ограни-

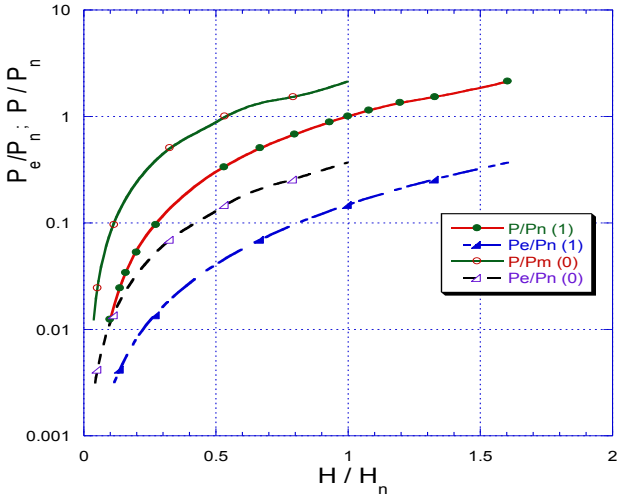
чаване). По абсцисата е нанесен интензитетът на магнитното поле, приведен към интензитета при номинален режим. На фиг.10 е показано изменението на общите загуби и загубите в намотките, приведени към номиналните загуби в зависимост от интензитета.



Фиг.8. Изменението на индуктивността на работната намотка в зависимост от работния ток в двата режима



Фиг.9. Изменение на магнитна проницаемост μ в зависимост от магнитната индукция



Фиг.10. Загуби в намотките и общите загуби в режим на готовност и в режим на ограничаване

5. Анализ

От представените на фиг.6 и фиг.7 резултати следва, че промяната на състоянието на комутатора S (включено/изключено) води до изменение на интензитета на магнитното поле (от 150% до 75%) и на магнитната индукция (от 2% до 15%); в резултат на което относителната магнитна проницаемост в режим на ограничаване е повече от 2 пъти по-голяма от магнигната проницаемост в режим на готовност, а еквивалентната индуктивност на работната намотка се променя от 2,6 до 3,5 пъти.

Колкото стойността на магнитната индукция в режим на готовност (4) е по-малка, толкова изменението на еквивалентният реактанс на работната намотка е по-голямо. В този смисъл, посочената стойност от *0,1T* има по-скоро препоръчителен характер.

В процеса на провежданите изследвания беше установено, че еквивалентните параметри на ОТКС силно зависят от въздушната междина и при увеличаването δ еквивалентната индуктивност бързо намалява.

6. Изводи

При ограничителите на ток на к.с. от индуктивен тип изменението на индуктивността на работната намотка се дължи на изменението на специфичната магнитна проницаемост μ_r на електротехническата стомана, от която е изработен магнитопровода.

Проведените изследвания и представените резултати дават основание да се твърди, че чрез използване на ограничител от индуктивен тип е възможно да се ограничават свръхтоковете в електрическата верига. Проектирането на конкретно устройство от индуктивен тип е свързано с прецизното изчисляване на магнитната верига в двата режима, с отчитане на разсейваните магнитните потоци и избиране на оптимално конструктивно решение.

Благодарности

Проучванията по тази публикация се провеждат благодарение на подкрепата на НИС при ТУ-София (дог.N°122ПД0043-01).

Литература

[1] Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов 1981.

[2] Чунихин А.А. Электрические аппараты, 1988

[3] Fault current limiters, Report on the CIGRE WG A3.10, by CIGRE WG 13.10.

[4] Fault current limiters – application, principles and experience, CIGRE WG A3.16, Tokyo, 2005.

[5] Ganev G., K. Hinov, N. Karadzhov, Fault current limiters – principles and application, Siela 2012

Автор: инж. Николай Кр. Караджов, докторант, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *n_karadjov@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** проф. И. Масларов

ОЦЕНКА НА КОЛЕБАНИЕТО НА НАПРЕЖЕНИЕ В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИ СИСТЕМИ НА ПРОМИШЛЕНИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ ПУСКАНЕ НА МОЩНИ АД

Николай Матанов

Резюме: *При избора на схеми и параметри на елементите на електроснабдителните системи, освен по условията на максималните товари, е нужно да се отчитат и колебанията на напрежение причинени от пусковите токове на мощни двигатели. В доклада е разгледан подход за определяне на напрежението в характерни възли от схемите при пускане на мощни асинхронни двигатели (АД), чрез съставяне на симулационни модели.*
Ключови думи: *колебание на напрежението, пускане на асинхронни двигатели*

ESTIMATION OF VOLTAGE SAGS IN INDUSTRIAL SUPPLY SYSTEMS DURING POWERFUL INDUCTION MOTORS' STARTING

Nikolay Matanov

Abstract: *When selecting schemes and parameters of the elements of the industrial supply systems, apart from conditions of maximum loads, it is necessary to take into account voltage sags caused by the starting currents of the powerful engines. The following paper discusses an approach to estimate the voltage sags at particular points of the schemes during the start of powerful induction motors by using the simulation models.*

Keywords: *voltage sag, induction (asynchronous) motors starting*

1. Въведение

Колебанието на напрежението е кратко, бързо изменения (от 0,5 периода до няколко секунди) на ефективната стойност на напрежението [1]. Основните характеристики на колебанието на напрежение са амплитуда (размах) и честота на изменение. Понякога е целесъобразно вместо честота да се използва продължителността (интервалът) на изменение на напрежението, която се определя от началния момент на възникване на две съседни изменения на напрежението. Тези характеристики са свързани с нормите по ограничаване на колебанието на напрежението в стандарти като *EN 50160*, *EN 61000-2-1* и *IEEE 1159*. При периодични колебания на напрежението, чрез светлинните източници, се влияе зрителното усещане на човека. Това смущение също се нормира чрез оценка на фликер ефекта. В литературата [2, 3] се разглеждат и други характеристики като промяна дефазирането между фазите и несиметрия на напреженията при три-

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

фазните системи. Причините за колебанието на напрежение са известни и са описани в литературата, като основните са пускане на мощни двигатели, мощни токоизправители и честотни задвижвания, къси съединения и др.

Колебанието на напрежението предизвиква електромагнитни и технологични загуби, като съществени са вторите. През последните години има постоянното увеличение на електронна управляваща апаратура в промишлените и стопански обекти, която е чувствителна към този тип смущения. Конкретното влияние на колебанието на напрежението върху различното оборудване в предприятията е изследвано в много работи като [3, 4, 5].

Начините за ограничаване на размаха на колебанието на напрежение могат да се разделят на две групи:

- избор на рационална схема и параметри на елементите на електроснабдителната система;
- използване на специални технически средства.

В тази работа ще бъде представен подход за определяне амплитудата и продължителността на размаха на колебанието на напрежение в етапа на проектиране на електроснабдителни системи с инсталирани в тях мощни асинхронни двигатели (АД). Целта е да се подпомогне изборът на схема и параметри на елементите на електроснабдителната система (трансформатори, кабелни линии, реактори).

2. Постановка на задачата

Постановката на задачата е съобразена с последователността при проектиране на електроснабдителни системи. От гледна точка на проблема, който разглеждаме се разполага със следната входна информация: изчислителни електрически товари на обекта по табла, подстанции, цехове и т.н.; номинални данни на мощните АД в предприятието и режимите им на пускане; допустими нива на колебанието на напрежението на общите шини на подстанциите според стандартите и консуматорите свързани на тях; допустимо напрежение на клемите на АД нужно за развъртането му.

При тази входна информация трябва да се съставят подходящи схеми и определят параметрите на елементите на електроснабдителната система (номинално напрежение, трансформатори, кабели, начин на пускане на АД и др.) отговарящи на следните условия [1]:

- напрежението на общите шини (характерни възли) U_{i*} да не е по-малко от минимално допустимото напрежение U_{i*don}, при което размаха $\delta V_{t\ i\%}$ на колебанието на напрежение ще е в допустимите норми ($\delta V_{t\ i\%} \leq \delta V_{t\ idon\%}$), т.е.

$$U_{i*} \geq U_{i*don} = U_{i*\max} - \frac{\delta V_{t\,idon\%}}{100}, \qquad (1)$$

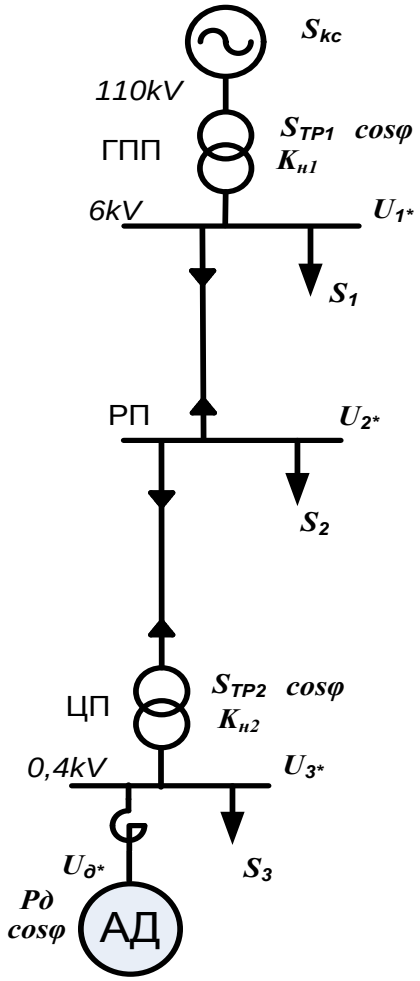
където U_{i*max} е максималното напрежение преди момента на включване на двигателя, о.е.; всички величини U_{i*} са в относителни единици от номиналното напрежение за i-тия възел.

- напрежението на клемите на двигателя да създава условия за развъртане му, т.е $U_{д*} \geq U_{д*доп}$;
- прегряването на двигателя да е в допустимите граници.

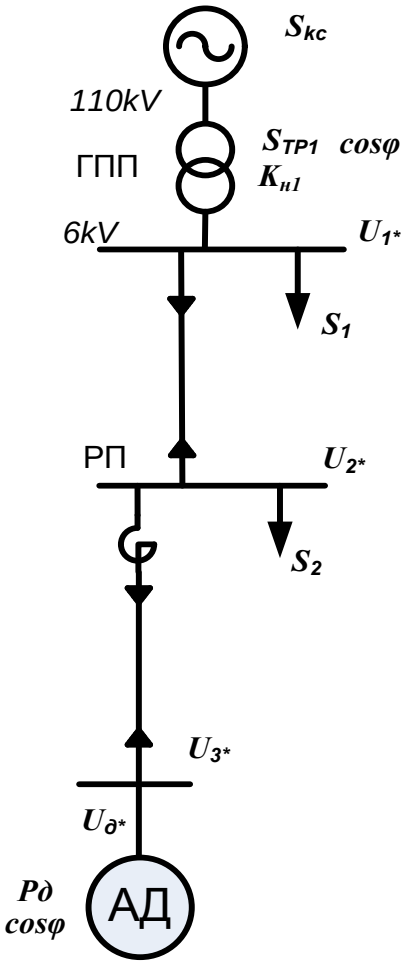
Проверката на условията за нормално пускане на двигателите изисква определянето на напреженията в характерни възли на схемите, като се отчитат параметрите на електроснабдителната система и товарите на останалите консуматори.

Съвременните двигатели с накъсосъединен ротор са оразмерени да издържат електродинамичното и топлинното действие на пусковите токове. В резултат на това, този проблем не се разглежда.

Характерните случаи на пускане на АД в електроснабдителни системи могат да се изследват с използване на обобщените изчислителни схеми на фиг.1 и фиг.2.



Фиг.1. Изчислителна схема за пускане на АД на ниско напрежение (НН)



Фиг.2. Изчислителна схема за пускане на АД на средно напрежение (СрН)

Всички елементи по схемите ще се отчитат с техните пълни съпротивления, което подобрява точността на резултатите в сравнение с използваните инженерни методики.

3. Метод на изследване

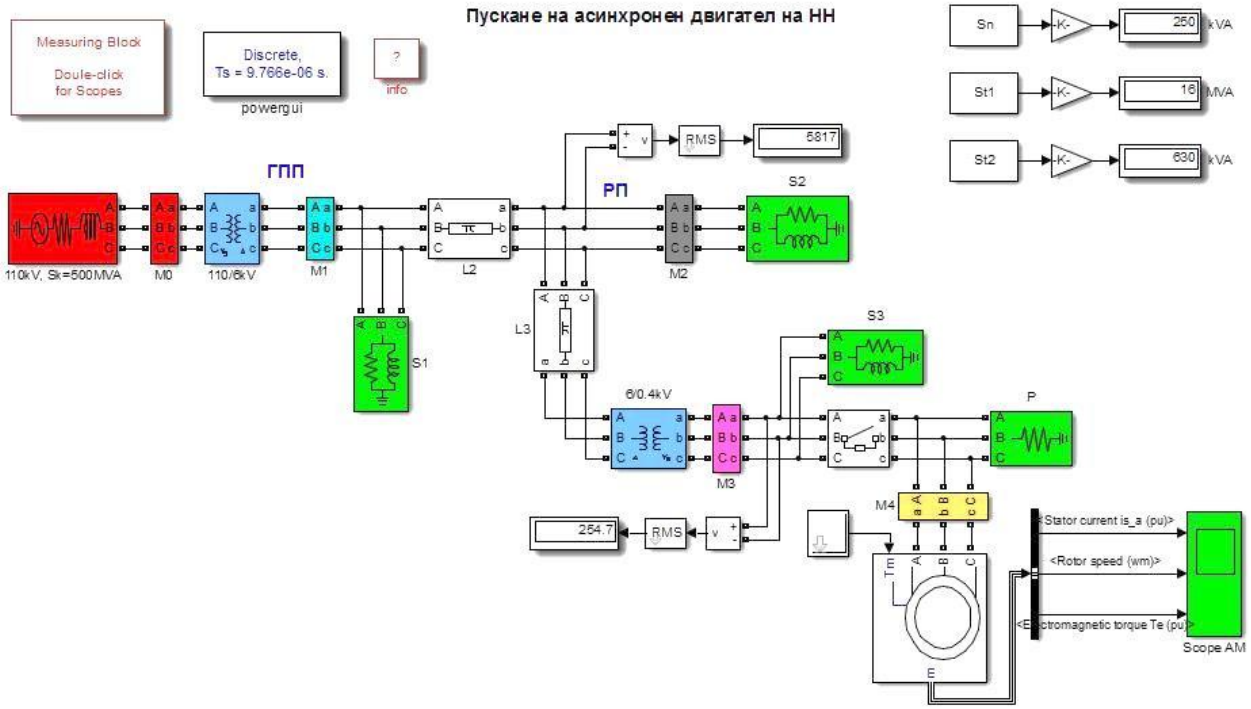
На съвременния етап, повечето изследователи за решаването на такива задачи използват софтуерни симулационни схеми разработени в специализирани програмни продукти (*MATLAB* и *EMPT)* [2, 3, 4, 5]. В тази работа са съставени модели, направени са софтуерни симулации в средата на *Matlab/Simulink*, използвайки неговите ресурси (предоставени от *SymPowerSystems*) и разработени от автора библиотеки и програмен код.

Напреженията в характерните възли (клеми на АД, шини на разпределителни подстанции - РП, шини на главни понижаващи подстанции - ГПП) ще се определят по:

$$U_{i*} = \frac{U_i}{U_{ni}}, \text{ о.е. } (i = \overline{1 \div 3}), \qquad (2)$$

където $\boldsymbol{U_i}$ е измерената ефективната стойност на действителното напрежение в момента на включване на двигателя (***i*** е индекс за всяка от характерните точки - фиг. 1 и 2); $\boldsymbol{U_{ni}}$ - ефективната стойност на номиналното напрежението в ***i***-тия възел.

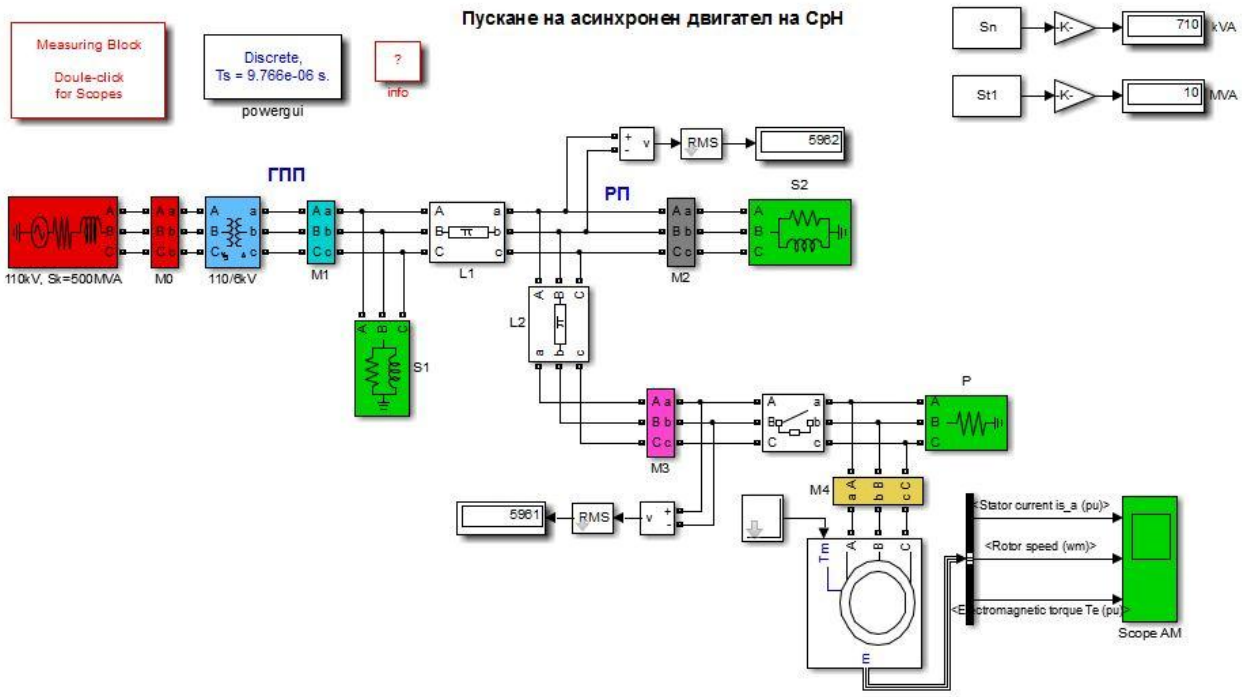
За изчислителните схеми от фиг.1 и фиг.2 са построени, съответните симулационни модели дадени на фиг.3 и фиг.4.



Фиг.3. Симулационна схема за изследване пускането на АД на НН

Параметрите на АД са определени на базата на номиналните параметри дадени от производителите и подхода от [6].

Към всяка от двете схеми има системи от измервателни елементи, променливи и програмен код, чрез които се контролират и настройват моделите и се записва нужната информация в работната среда на *MATLAB* за обработка и анализ.



Фиг.4. Симулационна схема за изследване пускането на АД на СрН

4. Симулации, резултати и анализ

Чрез симулационните схеми от фиг.3 и фиг.4 и допълнително написан код в *MATLAB* са направени следните варианти на изследване:

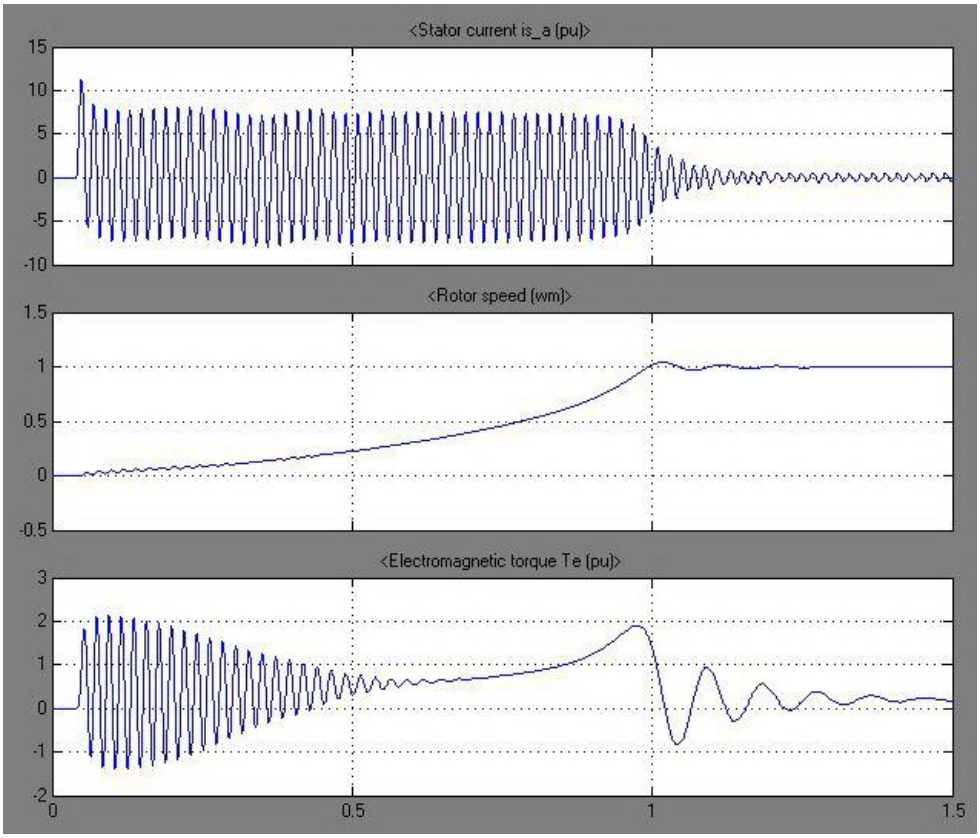
За схемата с АД на НН:

- определяне на $U_{д*}$ при Рд=55÷450kW за Sтр.цп=400÷1000kVA (Sтр.гпп=16MVA, постоянен коефициент на натоварване на трансформатора $к_н$=const)
- определяне на $\boldsymbol{U_{рп*}}$ при Рд=55÷450kW за Sтр.гпп=10÷63MVA (Sтр.цп=1000kVA, $к_н$=const)

За схемата с АД на СрН:

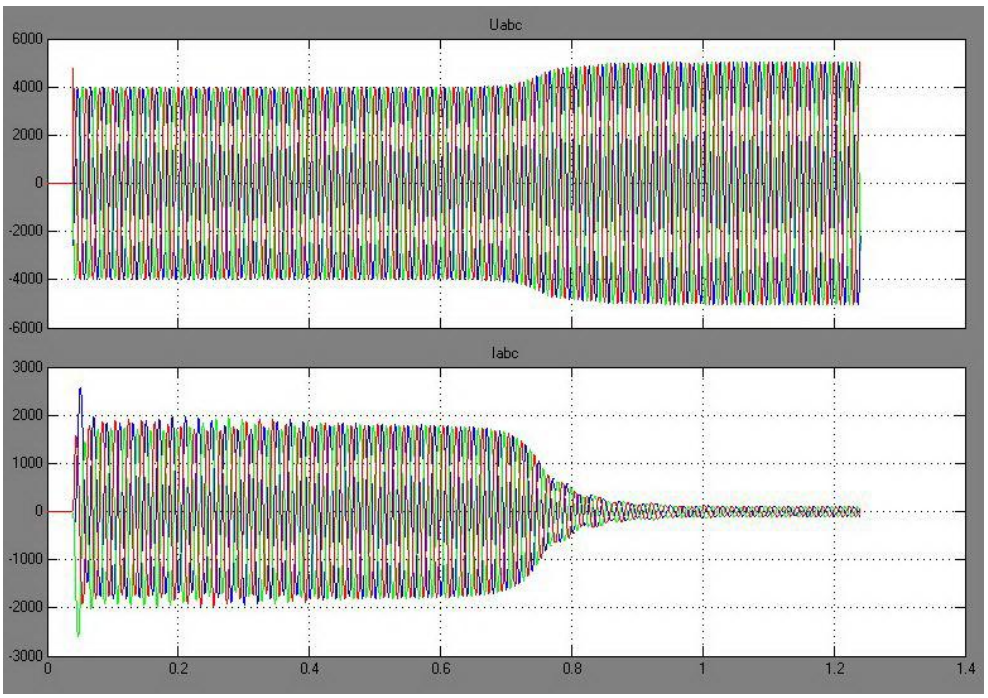
- определяне на $U_{д*}$ при Рд=710÷5000kW за Sтр.гпп=10÷63MVA ($к_н$=const)
- определяне на на $\boldsymbol{U_{рп*}}$ при Рд=710÷5000kW за Sтр.гпп=10÷63MVA ($к_н$=const)

На фиг.5 са показани механичните величини по време на пусковия процес за една конкретна ситуация. По характер резултатите съвпадат с тези от други изследователи като [4, 5, 7]. При различните симулации характерът се запазва като се изменят конкретните стойности на величините.

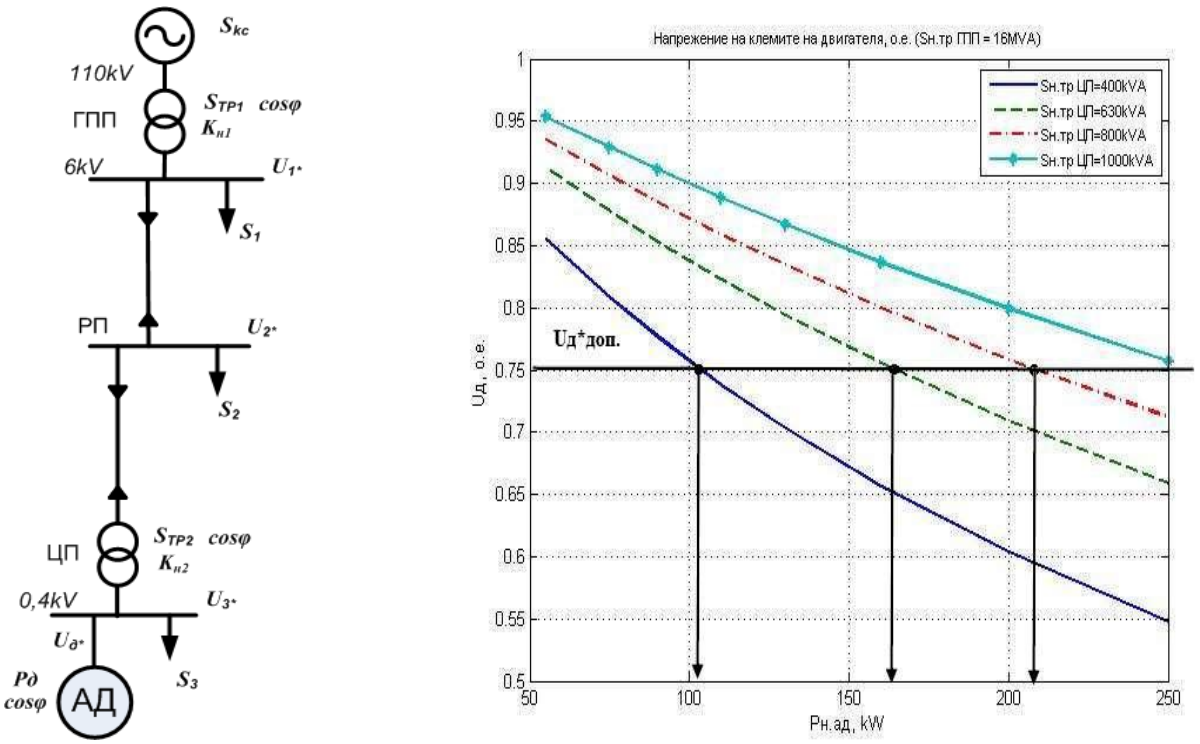


Фиг.5. Статорен ток, ъглова скорост и електромагнитен момент в *о.е.* при пускане на двигател 250kW/400V

На фиг.6 са дадени моментните стойности на напрежението и тока, за една конкретна симулация, по време на пусковия процес. На базата на тези данни могат да се изчислят ефективните стойности на съответните величини и продължителността на всеки пусков процес.



Фиг.6. Моментни стойности на напрежението и тока на двигателя в именувани единици - преди, по време и след края на пусковия процес



Фиг.7. Напрежение на клемите на двигателя НН в *о.е.*

Всички симулации са направени при следните условия:

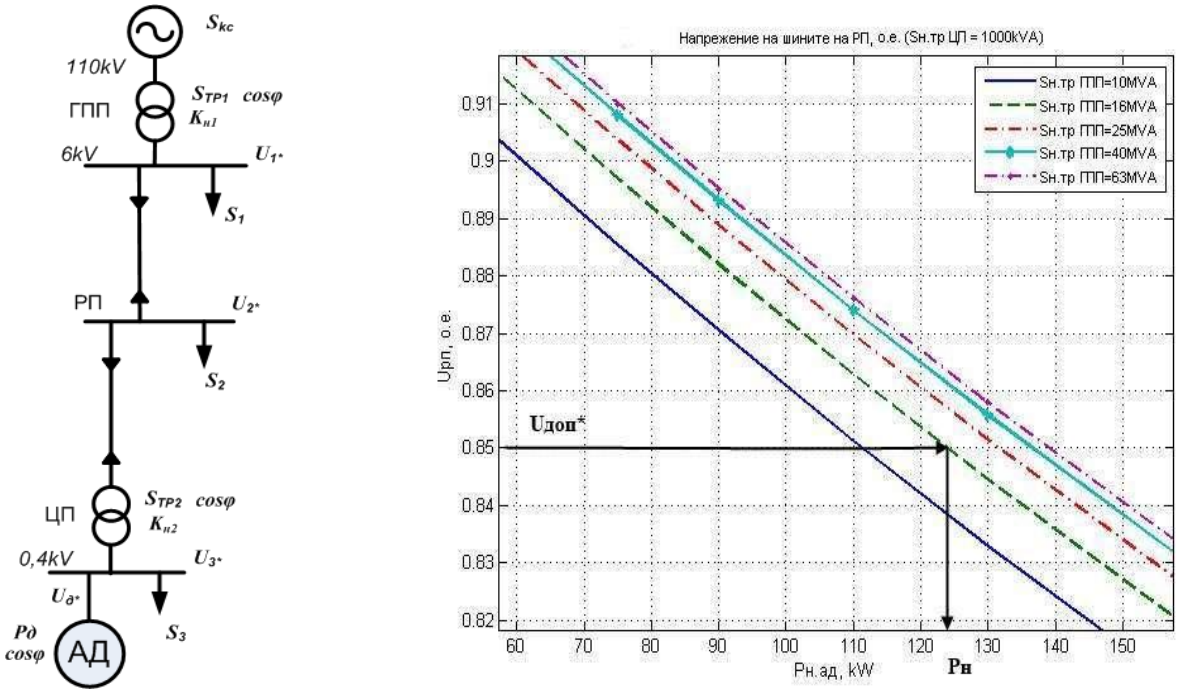
- Двигателите ще се пускат на празен ход;
- Извършва се директно пускане на АД;
- Товарите на останалата част на електроснабдителната система (*S1, S2, S3*) са дадени в изходната информация;
- Времето на дискретизация при определянето на ефективните стойности на величините е 1/50/128 = 156us.

На фиг. 7 са дадени фамилия криви за напрежението на клемите на двигателя, получени чрез симулации при различни мощности на трансформатора в цеховата подстанция (ЦП). Ако приемем, че допустимото напрежение нужно за развъртане на двигателя 0,75, от графиките може да се прецени с каква мощност на трансформатора в ЦП, какъв най-голям двигател може да се стартира директно.

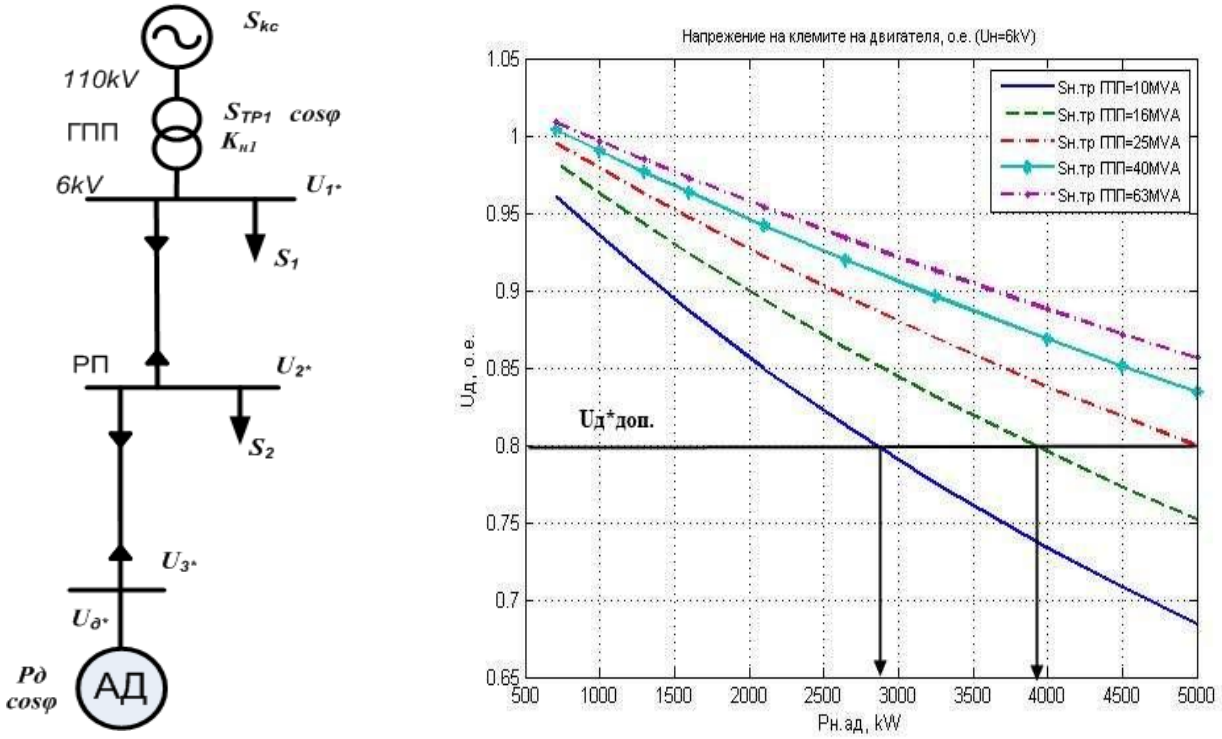
На фиг.8 е дадено другото напрежение, което се контролира при пусковия процес – напрежението на общите шини на РП. Фамилията криви е за различни мощности на трансформатора в ГПП.

От фиг.8 може да се прецени дали колебанието на напрежението е в допустимите граници при зададен двигател и ако се увеличи мощността на трансформатора в ГПП дали ще се спазят допустимите изисквания.

Примерно: при двигател с мощност 120kW и допустимо колебание от 15% се вижда, че трансформатора в ГПП трябва да е над 10MVA. Примерът показва, че получените зависимости могат да се използват, както при избора на мощността на трансформатор в ГПП, така и при избора на схема на пускане (пряко включване; реакторно пускане или блок трансформатор-двигател).

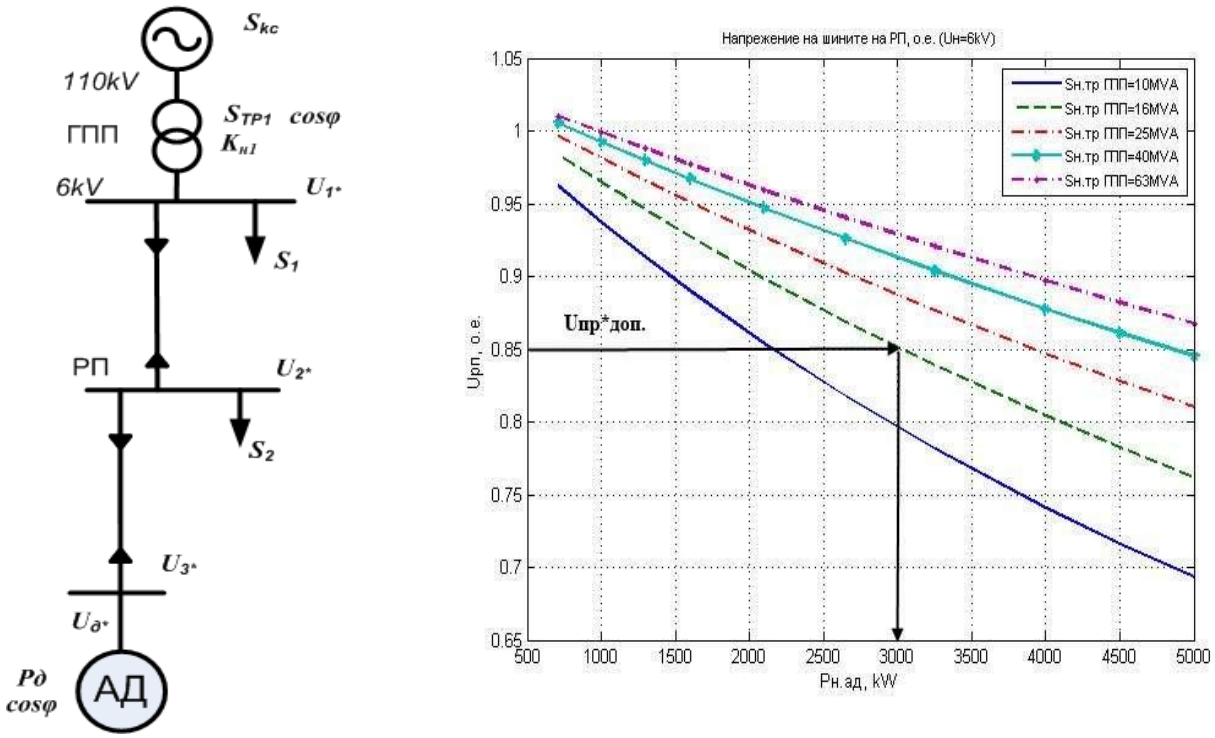


Фиг.8. Напрежение на шините на РП в *о.е.*



Фиг.9. Напрежение на клемите на двигателя СрН в *о.е.*

Аналогично на предните случаи на фиг.9 и фиг.10 са дадени напреженията на шините на двигателя и на РП, но при пускане на АД на СрН при мощности от 710 до 5000kW и при промяна на мощността на трансформатора в ГПП от 10 до 63MVA.



Фиг.10. Напрежение на шините на РП в *о.е.*

От фиг.10 може да се оцени, че при двигател с мощност 3000kW и допустимо колебание от 15%, трансформаторът в ГПП трябва да е над 16MVA.

Друг вариант е да се търсят други схемни решения и начини на пускане.

С измерените от симулационния модел или с отчетените от фиг.8 и фиг.10 относителни напрежения $U_{рп*}$ може да се определи размаха на колебанието на напрежение по (1).

5. Заключение

Основните резултати, получени в тази работа, могат да се обобщят по следния начин:

1. Разработеният подход за избор на схема на пускане на мощни АД, в зависимост от параметрите и схемната структура на електроснабдителната система, повишава качеството и икономическата ефективност на електроснабдяването;

2. Разработените симулационни модели позволяват да се изследват детайлно „действителните" напрежения в характерни възли на обобщените изчислителни схеми при пряко и реакторно пускане на двигателите. Тези резултати улесняват сравняване на ефективността на различни вариантни решения;

3. Представените графични зависимости могат да се използват за съставяне на рационални електроснабдителни схеми, с оглед ограничаване на размаха на колебанието на напрежение.

Литература

[1] Василев Н.И., Сидеров С.Т. (1991), ***Електроснабдяване на промишлени предприятия***, Техника, София, 1991

[2] Yalcinkaya G., M.H.J. Bollen, P.A. Crossley. (1997), ***Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems***, IEEE Industrial Application Society, Annual Meeting , New Orleans LA, October 5-9, 1997, pp. 2197-2204

[3] Leal R., J. Jacome, J. Blanco, J.F. Petit, G. Ordonez, V. Barrera. (2011), ***Propagation of Voltage Sags: Influence of Trnasformers, Induction motors and Fault Resistance***, Universidad Nacional de Colombia, Ing. Investig. vol.31, No.2, 2011, pp. 2-8

[4] Leiria A., P. Nunes, A.Morched, M. Teresa Correia de Barros. (2003), ***Induction Motor Response to Voltage dips***, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans USA, pp. 2-5

[5] Mahmoud A. El-Gammal, Amr Y. Abou-Ghazala, Trek I. El-Shennawy (2009), ***Voltage sag Effects on Refinery with Induction Motors Loads***, ELEKTRIKA vol.11, NO. 2, Faculty of Electrical Engineering University Teknologi Malaysia, 2009, pp. 34-39

[6] Михов М. П., Крумов А., Рац Е. Р., Димитрова П. (2005), ***Числен подход за определяне на параметрите на асинхронни двигатели по каталожни данни и данни от п.х. и к.с.***, ЕЛМА 2005, 15-16 Септември, София, стр. 50-56.

[7] Крумов А. Х. (2005), ***Моделиране на електромашини агрегати за собствени нужди в електрически централи по опитни данни***, Енергетика, №2-3/2005, стр. 39-45

Автор: Николай Матанов, гл. ас. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013г. **Рецензент** доц. д-р инж. Сидер Сидеров

ДРУГ ПОДХОД ЗА ОЦЕНКА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ЗАЗЕМИТЕЛНИ ИНСТАЛАЦИИ

Петър Калейчев

Резюме: *Известни са редица методи за изследване и анализ на заземителни инсталации. В работата се представя различен от традиционните подход за изследване на ефективността на заземителни инсталации чрез синтезиране на опростен математически модел в програмната среда на MATLAB. Същият позволява представително моделиране на разпределението на потенциалите и допирното напрежение около заземители и идентификация на най-важните точки по критерий безопасност. Подходът се явява база за прилагане на Метода на крайните елементи (МКЕ) за изследване и получаване на по-точни резултати на характеристиките на заземителните инсталации.*

Ключови думи: *заземител, метод на крайните елементи, MATLAB*

OTHER APPROACH FOR ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF GROUNDING SYSTEMS

Petar Kaleychev

Abstract: *There are known different methods for investigation of and analysis of the grounding systems. In this report is presented different from the traditional approach for investigation of the effectiveness of the grounding systems by synthesize of the simplified mathematical model in the programming field of MATLAB. The same allows representative modeling of the distribution of the potentials and of the touching voltage around grounding and the fixing of the most important points concerning safety measures. The approach is a base for applying of the Finite elements method (FEM) for investigation and obtaining of the more accurate results of the characteristics of the grounding systems.*

Keywords: *earth grounding, finite elements method, MATLAB*

1. Въведение

В настоящия момент съществуват редица традиционни методи за моделиране, изследване и анализ на заземителни инсталации – инженерни, числени и др. Развитието на компютърната техника и разработването на редица специализирани програмни продукти и среди като MATLAB, направиха възможно приложението на Метода на крайните елементи (МКЕ) за изследване и получаване на по-точни резултати за сложни конфигурации от заземители, при изследване на

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

многослойни почвени модели, както и за изчисляване на напрежението върху цялата площ около заземителите, тъй като това позволява да се анализират точки с особена значимост от гледна точка на правилната и безопасна работа на уредбата [1,2,3].

Геометрията на заземителите е от съществено значение при изследването и анализа на ефективността на заземителните инсталации, но не се отчита напълно в повечето стандартни методи за изследване. С цел развитие на изследванията в тази насока, МКЕ се прилага за двумерни и тримерни несиметрични модели при неоднородност на почвата и сложна конфигурация на заземителите [4,5,6]. При сравняване на резултатите със стандартните методи за изследване на заземителни инсталации се достига до извода че в някои случаи при отчитане на точната форма на заземителите се получават потенциали със стойности по-високи отколкото при модели с опростена форма. В редица случаи МКЕ е приложим при изследване на заземителни инсталации в двуслойна почва, при отчитането на зависимостта на съпротивлението за заземителя във функция от дебелината на почвата около него и влиянието на сезоните [7,9,10]. С цел отчитане на несиметричността и взаимното влияние на заземителите в някои случаи се прилага и електрокинетично моделиране на заземителни инсталации по МКЕ [8].

Недостатък на метода е сравнително сложния математическия апарат необходим при неговата реализация, което налага с цел отчитането на всички особености в конкретните модели да се използват специализирани компютърни програми и алгоритми. Така например изследването на сложни конфигурации от заземители в АЕЦ “Козлодуй” по МКЕ би било сравнително трудно без използването на специализирани програми от гледна точка на тази особеност на метода [11,12,13].

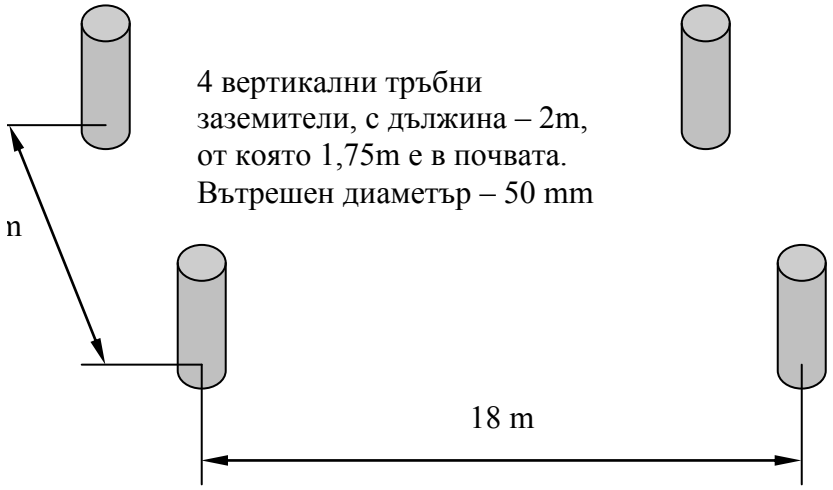
Краткият преглед на някои литературни източници показва, че традиционните методи позволяват опростено, но не достатъчно точно моделиране на параметрите на заземителни инсталации - в повечето случаи не се отчитат (или се отчитат приблизително, частично) основните фактори свързани с геометрията, формата на заземителите, слоестата структура на почвата и др. В противовес на тези недостатъци, МКЕ е подходящ за получаване на по-прецизни резултати при отчитане на специфичните особености на конкретните модели с прилагането на съответните компютърни програми и алгоритми.

В тази връзка в настоящия доклад е предложен друг подход за опростено моделиране на заземители, който на този етап има за цел да представи само първоначален модел на реална заземителна инсталация и в последствие ще бъде доразвит по МКЕ.

2. Приложение на MATLAB и резултати от моделирането на заземителна инсталация

В настоящия доклад е представен математически модел на заземителна инсталация, разработен в лаборатория “Безопасност и инженерна екология” при катедра „Електроенергетика”. В среда за програмиране MATLAB е моделирана част от реалната опитна заземителна инсталация изградена от лабораторията в

зелените площи между 2-ри и 12-ти блок на Технически Университет – София (фиг.1). Използвани са единични и групови заземители, съставени от вертикални тръбни заземители, с вътрешен диаметър 50 mm и дължина 2 m (набити 1,75 m в почвата). Моделът е първоначален и е използван тук за определяне на потенциалите около единичен и групови заземители чрез използването на традиционни зависимости за характеристиките на заземители [14], и ще се използва по-късно като база за прилагане на МКЕ.



Фиг.1 Разположение на вертикалните заземители в опитната заземителна инсталация на лаборатория "Безопасност и инженерна екология"

За полусферичен заземител при еднородна и изотропна почва, потенциалът на всяка точка от повърхността на разстояние x от заземителя се определя по (1)

$$\varphi(x) = \frac{I_з.\rho_п}{2\pi.x} \qquad (1)$$

където Iз е токът протичащ през заземителя и $\rho_п$ е специфичното съпротивление на почвата.

Зависимостта (1) се използува в настоящата работа с цел моделиране на заземителите в MATLAB, при следните условия:

1) Приема се че почвата около заземителите е еднородна. Специфичното съпротивление на почвата на реалната заземителна инсталация е 23 Ωm и е получено въз основа на измерване по метода на вертикалното сондиране, по методика описана в [15], с помощта на измерител на заземители МС-08.

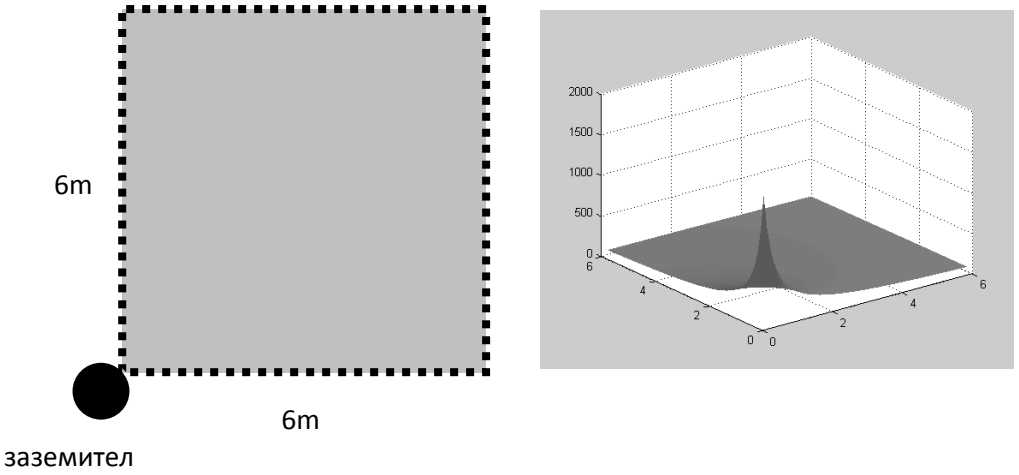
2) Резултатите са получени за зададен изчислителен ток от 100А, като се приема че:

- При моделирането на единичен вертикален заземител, през него протича пълния изчислителен ток.
- При групиране на два вертикални заземители, поради еднаквите размери, начин на полагане и специфично съпротивление на почвата около тях, големината на тока през всеки един от тях се приема за равен на половината от изчислителния ток.

- При групиране на четири вертикални заземители, големината на тока през всеки един от тях се приема за равен на 1/4 от изчислителния ток.

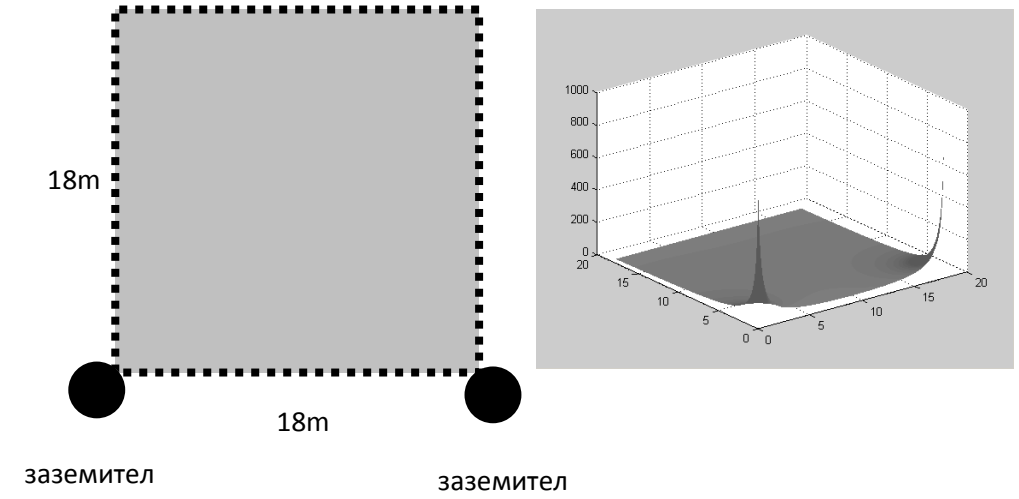
Заземителите са моделирани като полусфери с площ равна на площта на вертикалния заземител която контактува с почвата. За вертикален тръбен заземител с дължина 1750 mm и кръгло сечение с външна обиколка 195 mm, е получен еквивалентен радиус на полусферата от 233 mm, който е заложен в модела, така че площта която контактува с почвата на двата заземителя – реален и моделиран са равни.

За избраните площи около заземителите (фиг.2.a, фиг.3.a и фиг.4.a), на фиг.2.b, фиг.3.b и фиг.4.b са показани резултатите получени с MATLAB за разпределението на потенциалите при моделите в трите случая - при един заземител, при групов заземител съставен от два и три вертикални заземителя.



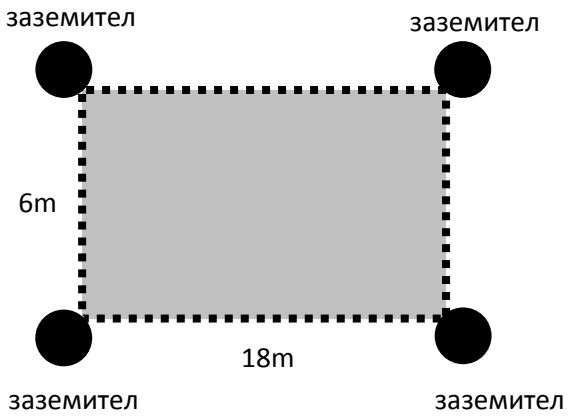
a) – Площ на изследване b) – Разпределение на потенциалите

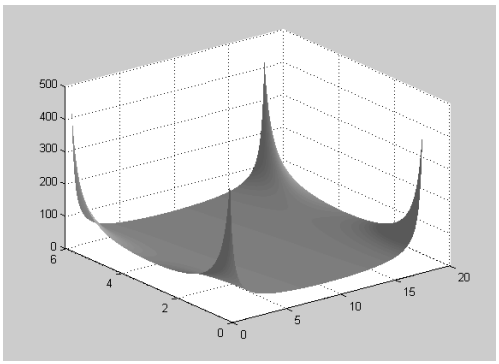
Фиг.2 Единичен заземител



a) – Площ на изследване b) – Разпределение на потенциалите

Фиг.3 Групов заземител от два вертикални заземители

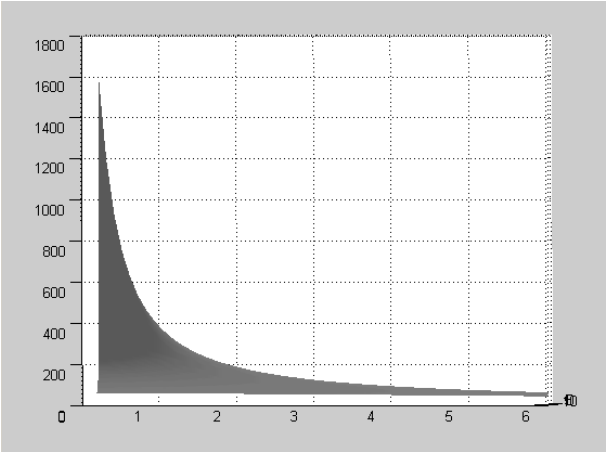




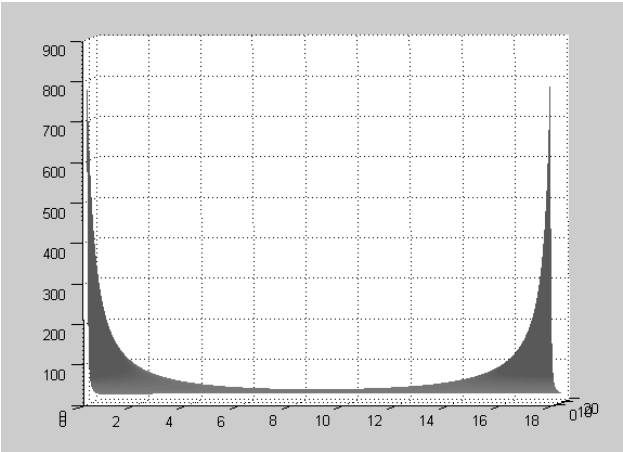
a) – Площ на изследване b) – Разпределение на потенциалите

Фиг.4 Групов заземител от четири вертикални заземители

Максимални са стойностите на потенциалите в непосредствена близост до заземителите. Най-големите са при модела с един заземител, през който преминава целия изчислителен ток към земя. Стойността на потенциала в непосредствена близост (напрежението на заземителя) при този случай, показан на фиг.2.a и фиг.2.b е около 1600V както се вижда и на фиг.5, на която е показано разпределението на потенциалите в една равнина. Потенциалът остава сравнително висок (60V) на разстояние 6 m от заземителя (фиг.5).



Фиг.5. Разпределението на потенциалите в една равнина при единичен заземител



Фиг.6. Разпределението на потенциалите в една равнина при групов заземител съставен два заземители

Поради това че в случая при който имаме групов заземител съставен от два заземители, токът се разпределя поравно през тях, напрежението на всеки от заземителите е наполовина в сравнение със случая с един заземител (фиг.6). Поради сравнително голямото разстояние между тях - 18 m, влиянието между заземителите изразено чрез потенциала които внасят един на друг - около 10 V, е сравнително малко. Това определя и по-нисък потенциал в площта около двата заземителя в сравнение със случая с един заземител.

При разпределението на потенциалите в случая с четири заземители са определящи токът преминаващ през всеки от тях, който е четири пъти по-малък в сравнение със случая с един заземител, както и разстоянието между тях, най-

вече между тези при които разстоянието е 6 м, тъй като при тях се получава най-голямо взаимно влияние (Фиг.4b). Максималната стойност на напрежението на заземителите е около 420V, което определя влияние на съседните заземители чрез внасяне на потенциал с максимална стойност от 20V. Най-ниските стойности на потенциалите в този случай са върху почвата между заземителите намиращи се на по-големите разстояния – 18m.

Използуваният подход и резултати от MATLAB показват че по този начин могат да бъдат визуализирани напреженията и потенциалите в площта около заземителите при отчитане на конфигурацията (разстоянията) и влиянието между вертикалните заземители, техните размери, токовете към земя и специфичното съпротивление на почвата. Визуализацията на резултатите потвърждава по-ниските напрежения и следователно по-високата ефективност при използване на групови заземители. Сравнително по-слабо е взаимното влияние на заземителите при реалните условия на опитната постановка на лабораторията и при използване на съответни изчислителни токове. Получените опростени модели показват добра приложимост и постигане на представителни резултати. Те ще бъдат основа за доразвиване на дефинирания подход по МКЕ за постигане при следващата ни работа на още по-висока детайлизация при отчитане на особеностите на конкретните модели, както и за прилагането му за многослойни почвени модели и сложни конфигурации от заземители.

3. Изводи

При направеното проучване се достига до извода че МКЕ е подходящ при изследването и анализа на модели на заземители, но поради неговата сложност се налага използването на подходящи специализирани компютърни програми и алгоритми, които са доста сложни и трудно приложими.

Показаният подход и резултати представят друга възможност за опростено моделиране на потенциалите и напреженията на заземителите, което е основа за моделирането на допирните и крачните напрежения. Преимуществата му се изразяват в по-леката му приложимост при моделиране на полусферични заземители в еднородна почва, което е предпоставка за развитие на подхода за приложението му при изследване и на многослойни почвени модели, заземители със сложни конфигурации, взаимно влияние на заземителите и др. Това определя насоката за по-нататъшните изследвания в това направление за доразвиване на подхода с приложение на МКЕ и използуване на специализирани програми и среди като MATLAB, което ще бъде полезно за практически анализ на заземителни инсталации от гледна точка на правилната и безопасна работа на уредбите.

Литература

[1] Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Patrick Dular. Analytical and finite element modeling of grounding systems. IX International Symposium on Lightning Protection 26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.

[2] L. M. Coa. Comparative Study between IEEE Std. 80-2000 and Finite Elements Method application for Grounding Systems Analysis. 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela.

[3] Yan Gan and Jiangjun Ruan. Simulation of the Grounding Grid by Coupling the Unidemensional Finite Element Method(FEM) and the Three-dimensional FEM. Progress In Electromagnetics Research Symposium 2005, Hangzhou, China, August 22-26.

[4] J. A. Güemes, F. Rodriguez, J. M. Ruiz, F. E. Hernando. Determination of the ground resistance and distribution of potentials in grounding grids using FEM

[5] P. Hajebi, A. A. Heidari, and A. Mirzaei. P. Hajebi, A. A. Heidari, and A. Mirzaei, PIERS Proceedings, Xi'an, China, March 22-26, 2010

[6] Lorentzou M. I., A G. Kladas, N. D. Hatziargyriou. Finite Element Modelling of grounding Systems considering Electrode Geometry Effects, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 3, MAY 1999.

[7] António Martins, Sílvio Mariano and Maria do Rosário Calado, The IEEE Model for a Ground Rod in a Two Layer Soil – A FEM Approach

[8] R. V. Sabariego, M. V. Ferreira da Luz, J. P. Nzuru Nsekere, P. Kuo-Peng, J. L. Lilien, C. Geuzaine, P. Dular, Perturbation finite element method for the analysis of earthing systems with vertical and horizontal rods

[9] Велев Г. Верификация на двуслойни модели на почвата при проектиране на заземителни уредби с помощта на метода на крайните елементи. Годишник на Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски", Том 55, Св.111, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2012.

[10] Велев Г. Физическо моделиране и статистически анализ на експлоатационните параметри на заземители с проводима бетонна замазка за приложение в минната индустрия - Годишник на Минно-геоложкия Университет “Св. Иван Рилски” – София, Свитък III: Механизация, електрификация и автоматизация на мините, 2009, ISSN 1312-1820.

[11] Иванов И., Калейчев П. Моделиране на надеждността на електрозахранването на системите за пожарна безопасност в 5 ЕБ и 6 ЕБ на “АЕЦ Козлодуй” ЕАД. Сборник Доклади, МВР, Пета научна конференция с международно участие “Пожарната и аварийната безопасност “2009”, 19 – 20 март, София. 2009, с. 65 – 66.

[12] Богданов Д. Формиране на критерии за комплексна оценка на функционалността на система за релейна защита. Сборник доклади на Енергиен форум 2007, стр. 279-284.

[13] Богданов Д. Повишаване надеждността на дизел-генераторните агрегати за аварийно захранване на блокове 5 и 6 на АЕЦ Козлодуй. Сп. Енергетика, N8 2004, стр. 55-59.

[14] Иванов И., Петров П., Велев Г., Витков Н. Техническа безопасност. София, 2011.

[15] Иванов И., Калейчев П. Ръководство за упражнения по техническа безопасност. София, 2013.

Автор: Петър Пламенов Калейчев, гл. ас. д-р инж., катедра „Електроенергетика“, лаборатория “Безопасност и инженерна екология”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *kaleychev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** проф. И. Иванов

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНО ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ НА ТУНЕЛНО ОСВЕТЛЕНИЕ

Петър Маноилов, Ганчо Ганчев, Христо Василев

Резюме: *В статията се разглежда състоянието и проблемите на фотоволтаични системи за осветление на тунели. Въз основа на прегледа на съществуващи решения, е разработена методика за проектиране на такива системи. Методиката е приложена за изчисление на необходимата производителност и компоненти на фотоволтаична система за осветление на конкретен 90-метров тунел по пътя Асеновград-Смолян.*

Ключови думи: *фотоволтаично електрозахранване, осветителна система, тунел*

APPLICATION OF PHOTOVOLTAIC POWER SUPPLY IN TUNNEL LIGHTING

Petar Manoilov, Gancho Ganchev, Hristo Vassilev

Abstract: *The article examines the state and problems of photovoltaic systems for tunnel lighting. Based on the review of existing solutions, a methodology for the design of such systems has developed. The methodology is applied to the calculation of the performance required and the components of the photovoltaic system for lighting of a particular 90-meter tunnel on the road Asenovgrad-Smolyan.*

Keywords: *photovoltaic power supply, lighting system, tunnel*

1. Въведение

Осветителната уредба на пътен тунел е сложно съоръжение. При проектирането й трябва да се съобразяват много и сложни изисквания.

Основното предназначение на осветлението в тунелите е осигуряване на безопасно преминаване през него, сигурност и комфорт на водачите. Най-важното изискване, на което трябва да отговаря тунелното осветление, е да осигурява необходимото ниво на осветеност за своевременно възприемане на пътната обстановка, с цел избягване на препятствия.

Когато се определя нивото на осветеност на тунела, трябва да се вземе предвид скоростта и интензивността на трафика, еднопосочно или двупосочно е движението в тунела, ориентацията на тунела спрямо слънчевото греене през деня, метеорологичните условия, конструктивните и архитектурни особености на тунела

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

по отношение на вид на настилка и стени и отразяващата им способност, вероятността за отблясъци и т.н.

За осигуряването на надеждно тунелно осветление, често при неблагоприятен терен и отдалеченост от ел. мрежа, са необходими големи енергийни мощности, поради което все по-често се търсят и алтернативни източници.

През последните години се засилва тенденцията за използване на алтернативни енергийни източници за целта, включително фотоволтаични (PV) системи. Това все още е новост с много неизвестни параметри.

В следващия раздел е направен обзор на състоянието и анализ на предимствата и недостатъците на PV тунелно осветление. Въз основа на изводите от обзора, в раздел 3 се предлага методика за проектиране на такова осветление, а в раздел 4 е представен пример за използването на PV система при реализиран проект за осветление на 90-метров тунел по пътя Асеновград – Смолян.

В заключението се обсъждат проблемите и перспективите за реализирането на такива проекти.

2. Преглед на PV системи за тунелно осветление

2.1. Обзор на използването на PV системи за тунелно осветление

PV системи за тунелно осветление се използват още от 1985 г. в Азия (Саудитска Арабия, Китай, Индия, Япония) и Европа (Чехия, Франция, Холандия, Белгия) и др. [3, 4].

2.2. Предимства и недостатъци на PV системи за тунелно осветление

Използването на PV системи за осветление на тунели има следните предимства:

- Намаляване на необходимата мощност на захранване от външната ел. мрежа;
- независимост от конвенционалната ел. мрежа;
- енергийна ефективност;
- висока надеждност и ниски разходи за поддръжка;
- екологични ползи

Недостатъци са:

- Висока цена на първоначална инвестиция;
- Сложно проектиране и изпълнение в зависимост от терена;
- непостоянният товар и непълното използване на капацитета на апаратура;

2.3. Варианти за тунелно осветление с PV система

Известни са следните варианти:

- напълно автономно осветление на тунели с PV система, което е ефективно за отдалечени от мрежата обекти;
- хибридна ВЕИ система с вятърни генератори и соларни панели;

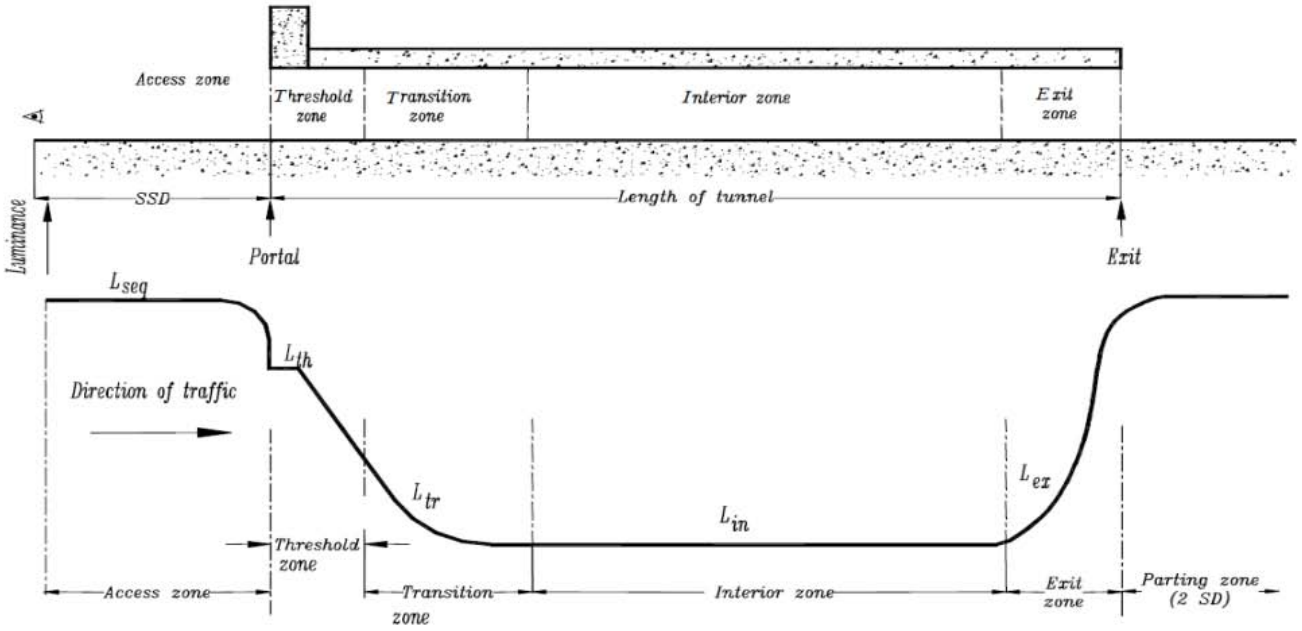
- хибридна система с PV и захранване от външната електрическа мрежа.

Приложимостта и ефективността на тези варианти е в зависимост от параметрите на околната среда, характеристиките на тунела и икономическите разчети.

3. Методика за проектиране и изграждане на тунелно осветление

При проектирането на всяко тунелно осветление трябва да се вземат предвид следните особености:

- необходимост от различна осветеност по продължението на тунела (фиг.1);
- видимостта в тунела, която зависи от дължината, наклона и завоите на трасето;
- близостта до ел. мрежа;
- климатичните условия – сезонни и денонощни стойности на слънцегреенето, температурата на въздуха, мъглата, влагата и т.н.;
- изискване за два независими източника на осветление – ежедневен и авариен (обикновено на UPS – акумулатор или дизелов генератор);



Фиг.1

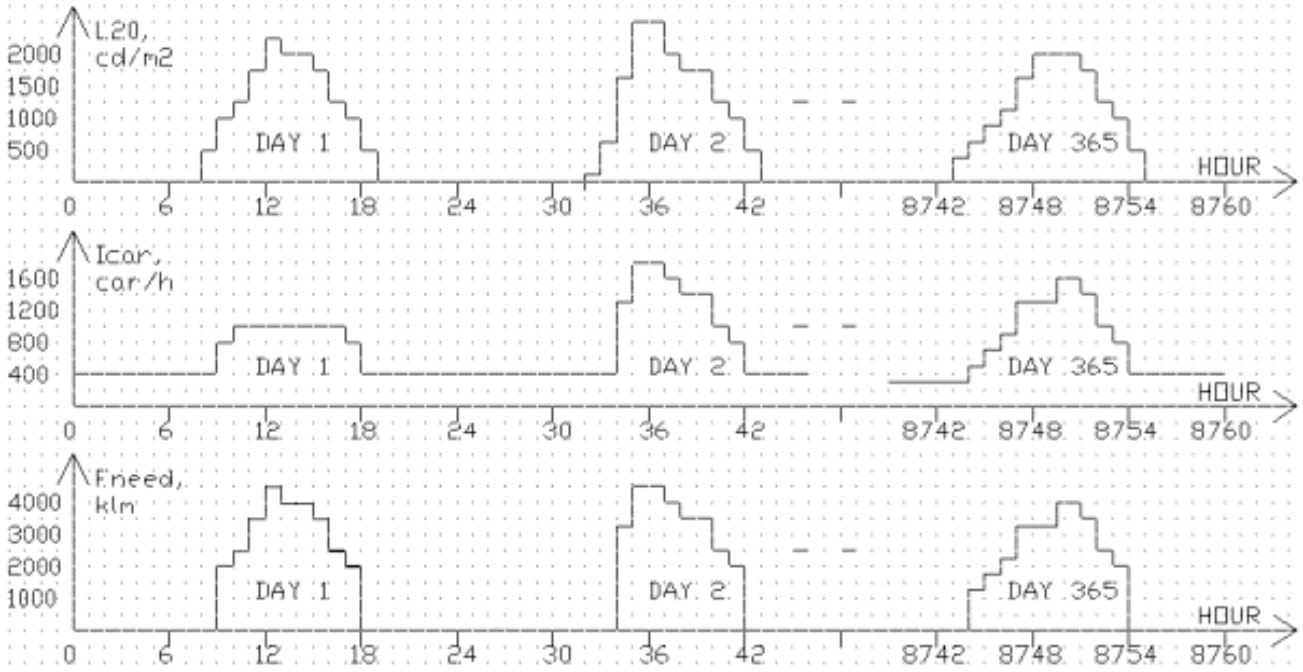
Етапите на проектиране на PV система за тунелно осветление са:

- Определяне на характеристиките на тунела – дължина, площ, брой тръби, максимално допустима скорост, обем на трафика и др.;
- Слънчево-енергиен одит – изготвяне на график на изменение на външна и вътрешна осветеност през различните часове на денонощието и за различните месеци;
- Изготвяне на график на консумация на ел. енергия в тунела при различни ценови тарифи в зависимост от трафика и необходимата по стандарт осветеност на тунела (фиг.1);

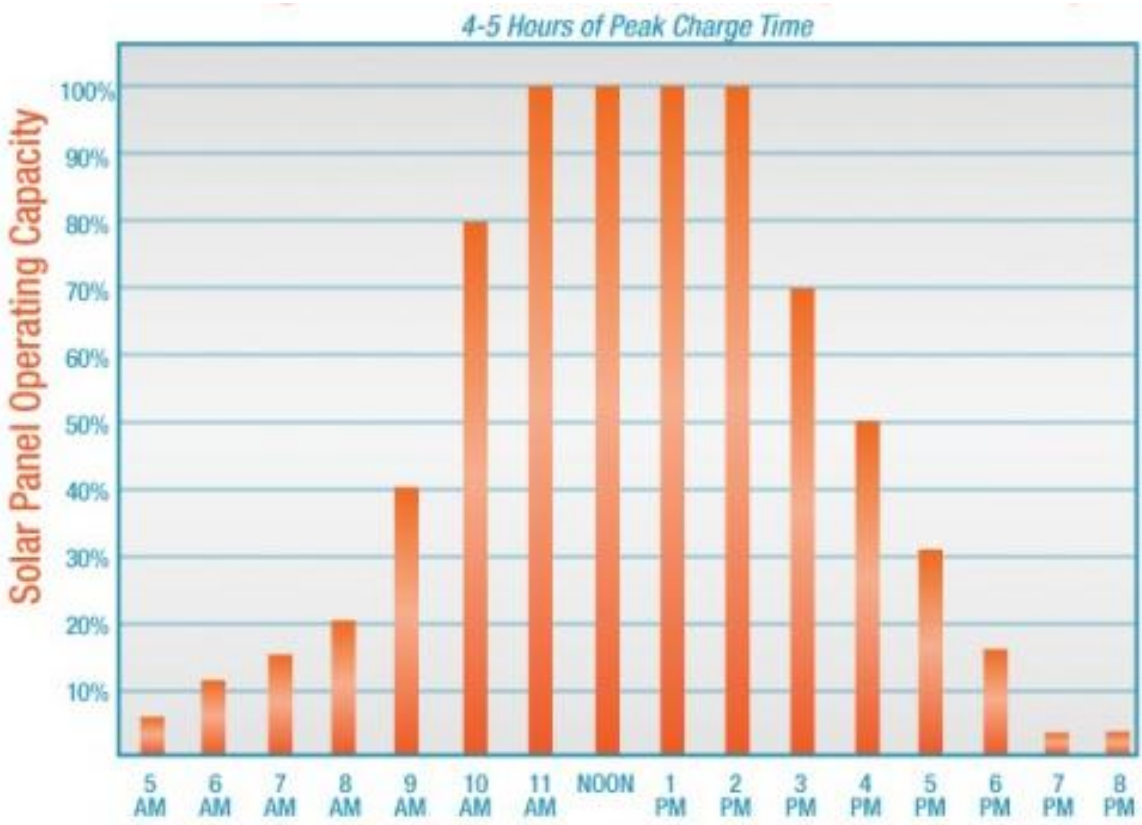
- Установяване на факторите на околната среда и на необходимата производителност на осветителната система;
- Анализ на ситуация при свръхенергия – съхранение на произведената излишна енергия в автономна система или да допълва мрежовото ел. захранване;
- Анализ на рискови ситуации – пожар, наводнение и др. застрашаващи осветлението събития, с оглед максималната му защита и минимум загуби;
- Избор на вариант на системата;
- Моделиране и изчисление на параметрите на системата – брой и тип на осветителните тела и поддържащите съоръжения;

По-долу са показани примери на: промяна на външна и вътрешна осветеност и трафик в тунел (фиг.2), диаграма за добивана енергия от слънцето за денонощие (фиг.3), произведена ел. енергия от PV при различни климатични условия (фиг.4), производителност на PV система през различните месеци (фиг.5).

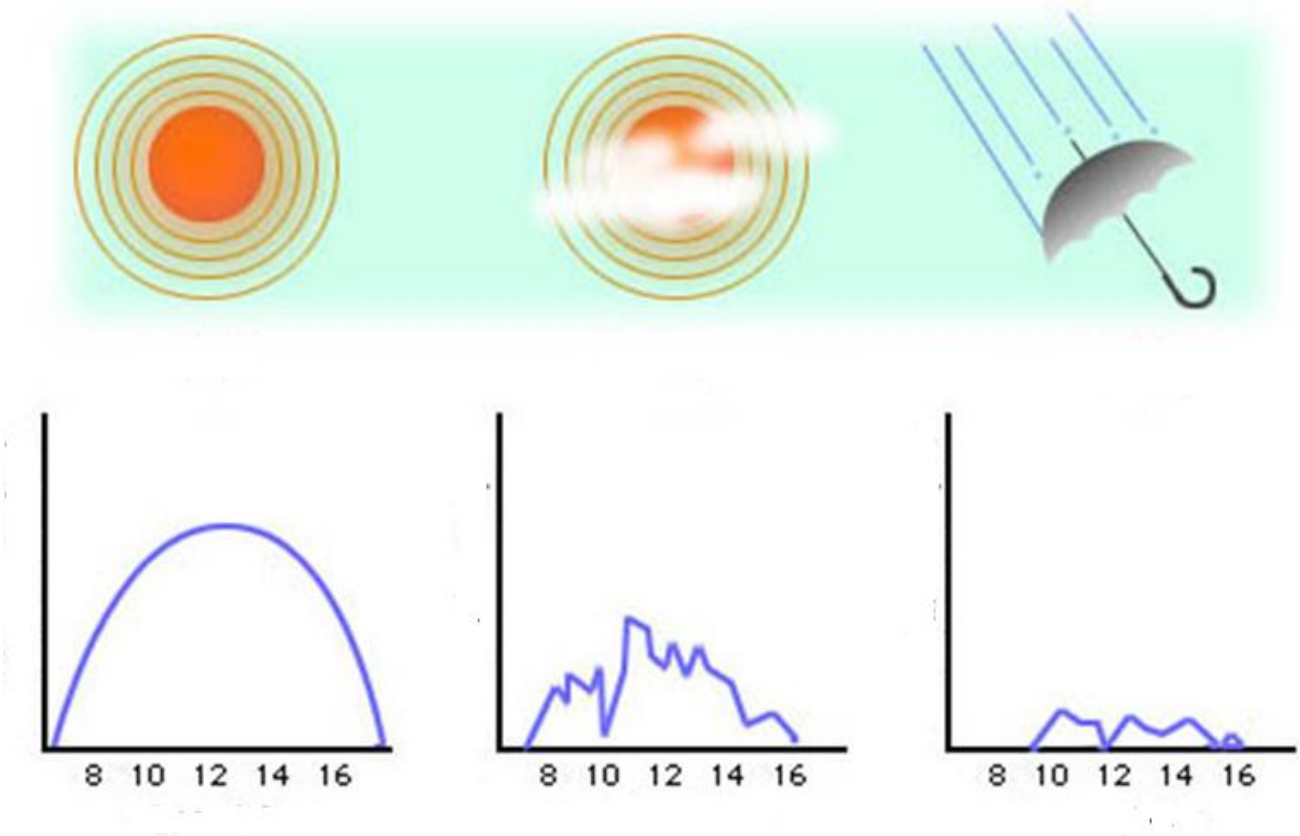
От диаграмите е видно, че необходимото нивото на осветеност в тунела, респективно и необходимата електрическа мощност при различни метеорологични условия и момент от денонощието са близки до диаграмите за произвежданата електрическа енергия от PV система.



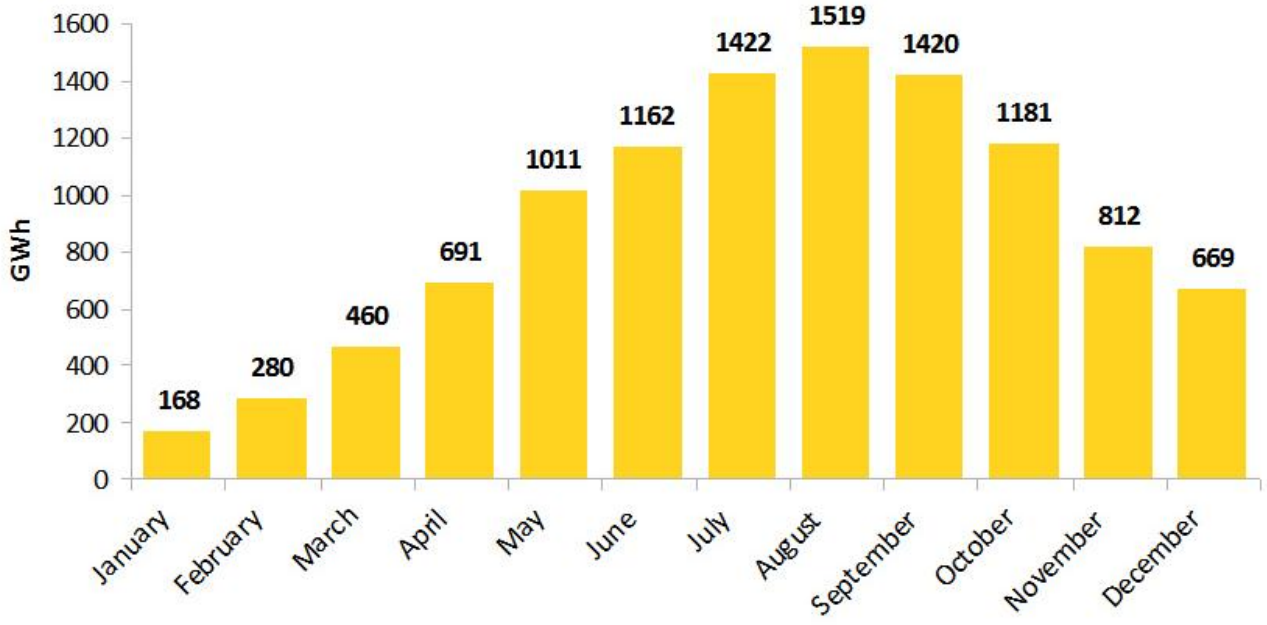
Фиг.2. Денонощна промяна на външната и вътрешна осветеност и трафика в тунел



Фиг.3. Режим на работа на PV система



Фиг.4. Производство на ел. енергия от PV система при различни климатични условия



Фиг.5. Месечна производителност на PV системи

4. Приложение на PV система за осветление на тунел

Горната методика е приложена за проектиране на PV система, подпомагаща електрическото захранване на осветление на тунел по пътя Асеновград – Смолян с дължина – 90 m. Проектът на осветителната уредба е на фирма „Денима 2001“ ООД и се основава на предварителни данни за необходимия брой и мощност на осветителите. Осветителната система е проектирана по съвременни стандарти и с оглед енергийна ефективност, с регулиране на осветеността през денонощието

Табл.1. Вид и брой осветители

Осветители тип и мощност	Тунел - 90м			
	100%	60%	30%	Целонощно
Осветител симетричен 250W	12	6	0	0
Осветител асиметричен 250/150W	40	26	26	0
LED 51W				8

- Мощност при максимална степен – 18 kVA
- Консумация на ел. енергия при най-ниска степен – 9 kVA

Наличните данни за необходимата електрическа мощност и наличния ресурс от слънчева енергия са използвани за проектиране и симулация на PV система, чрез софтуер PVSYST [3].

След проведените изчисления се установява, че за покриване на върховата консумация на ел. енергия е необходима PV система с инсталирана мощност 28 kWp DC. В зависимост от момента в денонощието и метеорологичните условия, произведената ел. енергия от PV системата е по-малко или повече от необходимата за захранване на осветителната система. За компенсиране на тези разлики служи външната ел. мрежа.

10. Заключение и бъдеща работа

Настоящото изследване ще продължи с детайлна оценка на икономическите аспекти при използването на PV система за осветление на конкретния тунел за:

- реализация и поддръжка;
- жизнения цикъл и;
- безопасност и надеждност на системата.

Литература

[1] Al Amoudi A., Salah Smiai M. (2003), ***Lighting tunnels: Saudi Arabia***. In Volume 8: Examples of Successful Uses of Renewable Energy Sources in the South. Sharing Innovative Experiences, Edition of UNDP, pp. 82-88

[2] Mišák S., Šnobl J., Dostál F. (2011), ***Power solutions for emergency lighting of tunnels, underpasses and ecoduct***. Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), Warszawa, ISSN 0033-2097, R. 87, No 4/2011, pp. 29-31

[3] PVsyst SA - Switzerland

[4] G. Notton, V. Lazarov, L. Stoyanov (2010), "***Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations***", Renewable Energy, vol. 35, issue 2, pp. 541-554, Elsevier 2010

[5] G. Notton, V. Lazarov, L. Stoyanov, N. Heraud (2009), "***Optimal Sizing of PV Array and Inverter for 4 PV Technologies and Module Inclination***", 24-th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25,September2009, Hamburg, Germany, pp. 3646 - 3651

[6] G. Notton, V. Lazarov, L. Stoyanov, S. Diaf, N. Heraud. (2009), "***Seasonal variation of PV efficiency for various technologies and module inclinations***", Ecological Engineering and Environment Protection - Special issue "Renewable Energy Sources", vol. 1/2009, J. NSEEEP, Bulgaria, pp. 12-19

[7] Велинов К., Христов Х. (2007), ***Тунелна осветителна уредба в град "София"***, XII Национална конференция по осветление с международно участие Осветление'2007, 10 - 12.06.2007, Варна

[8] Василев Хр., Г. Ганчев. (2008), ***Възможности за приложение на фотоволтаиците и светодиодите за осветление на подземни пространства на тунели и метростанции***, Сборник с доклади на Юбилейна международна научно-техническа конференция по тунелно и метростроителство, 27-28 януари 2008 г., София, стр. 265-271

Автори: Петър Маноилов, инж., катедра ЕСЕОЕТ, Електротехнически Факултет на Технически университет - София, E-mail address: *manoilov@tu-sofia.bg;* Ганчо Ганчев, доц. д-р инж., Минно-геоложки университет "св. Иван Рилски" - София; Христо Василев, проф. д-р инж., катедра ЕСЕОЕТ, Електротехнически Факултет на Технически Университет - София, фирма „Денима 2001”, E-mail address: *hristo.vasilev@denima2001.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. В. Георгиев

ВЛИЯНИЕ НА НАПРЕЖЕНИЕТО НА ОПЪН НА КОНТАКТНИЯ ПРОВОДНИК ВЪРХУ ВИСОКОСКОРОСТНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА КОНТАКТНИ МРЕЖИ

Петър Матов

Резюме: *Подобряването на поведението на контактните мрежи за високи скорости се постига чрез увеличаване на опъна на техните проводници близо до границите на издръжливостта им. Проектантските изчислителни процедури за контактни мрежи включват в явен вид силата на опън. Изследването, представено тук, показва с формули и графики, участието и влиянието на избираното напрежение на опън на контактния проводник върху високоскоростните показатели на контактни мрежи за железопътен транспорт.*

Ключови думи: *контактни мрежи за високи скорости*

IMPACT OF THE TENSILE STRESS OF THE CONTACT WIRE ON THE HIGH SPEED PERFORMANCE OF THE CATENARY

Petar Matov

Abstract: *The performance of the high-speed contact lines is improved by increasing the tension of the conductors close their limits of durability. The design computational procedures for contact lines include, usually implicitly, the tension strength. The presented study exhibits the influence of the chosen tension strength of the contact wire for the improved high speed performance of the railway contact lines by means of computational formulas and graphs.*

Keywords: *high speed catenary*

1. Въведение

При електрическите транспортни средства за високи скорости качеството на електроснабдяване и нивото на електромагнитните смущения в околната среда се влияят от динамичното взаимодействие между пантографа и контактната мрежа (КМ). Интересът към това взаимодействие се привлича от нарушаването на механичния и съответно на електрическия плъзгащ контакт в системата пантограф-КМ. Отскачането, появата на електрически дъги и износването на контактния проводник и на контактната вложка на пантографа са следствия от различни фактори: от механичните и геометричните характеристики на системата контактна мрежа-пантограф, от механичните и геометричните характеристики на двете конструкции поотделно, от аеродинамичните показатели на превозното

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

средство с пантограф, от неравностите на релсовия път и от скоростта на движение. Всеки от тези елементи се оптимизира поотделно на етапите на проектиране и изпълнение, а динамичното взаимодействие се проверява/оценява непосредствено преди и по време на реалната експлоатация на готовата железопътна инфраструктура. Част от една предварителна оптимизация представляват изчисленията на механични показатели на контактната мрежа – скорост на разпространение на механични вълни v, коефициент на Доплер α, коефициент на отражение r и др. Сравнението на получените от изчисленията резултати с вече установени от добри практики [1] стойности спомага за по-бързо оптимизиране на конструкцията на една нова контактна мрежа.

Практиката е показала, че увеличаването на допустимите скорости на движение се постига чрез увеличаване на опъна на контактния проводник, с което при високоскоростни линии се достига до границите на механичната му якост. Във формулите за проектните изчисления участва в явен или неявен вид и механичното напрежение σ на материала. Представлява интерес графичното онагледяване на влиянието на напрежението на опън върху изброените по-горе показатели.

2. Изчислителна част

2.1 Скорост на разпространение на механична вълна по контактен проводник

Всяко механично въздействие/отклонение $q(x,t)$ на контактната мрежа се разпространява под форма на механична вълна $y(x,t)$ напред и назад спрямо мястото, в което е приложено смущението. Скоростта v на разпространение на механичната вълна участва в частното диференциално уравнение за динамичното поведение на контактен проводник (еднакво е с уравнението на струна):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = q(x,t)\,, \tag{1}$$

където

$$v = \sqrt{\frac{T}{M}}. \tag{2}$$

Силата T [N] на опън на проводника е пропорционална на механичното му напрежение σ [N/m^2] и на сечението му S [m^2]

$$T = \sigma\ *S, \tag{3}$$

а линейната маса M [kg/m] на проводника – на плътността γ [kg/m^3] на материала и на неговото сечение S

$$M = \gamma * S. \tag{4}$$

От (2), (3) и (4) за скоростта на разпространение на механичната вълна по еди-

ничен контактен проводник може да се изведе

$$v = \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} \qquad \text{[m/s]}, \tag{5}$$

от което следва, че за постоянна плътност γ = Cte, скоростта v се определя само от напрежението на опън σ. Числено, за механично напрежение 50 MPa на контактен проводник от мед или от медна сплав, се получава

$$v = 3{,}6\sqrt{\frac{50.10^6}{8900}} = 270\ [km/h]\,, \tag{6}$$

За верижни контактни мрежи, формулата (2) е променена в [2] и [3] до

$$v_{CA} = 3.6\sqrt{\frac{\Sigma T}{\Sigma M}} \qquad \text{[km/h]}, \tag{7}$$

в която $\Sigma T = T_{mw}+T_{cw}$ е сума от опъните на носещото въже (MW) и на контактния проводник (CW), а $\Sigma M=M_{mw}+M_{cw}$ - сумата от техните линейни маси. При еднакви плътности γ на материалите на контактния проводник и на носещото въже и при еднакви механични напрежения σ на опън, контактната мрежа се държи като контактен проводник - (8) има вида на (5):

$$v_{CA} = 3.6\sqrt{\frac{\sigma_{MW}S_{MW}+\sigma_{CW}S_{CW}}{\gamma_{MW}S_{MW}+\gamma_{CW}S_{CW}}} = 3.6\sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}\frac{S_{MW}+S_{CW}}{S_{MW}+S_{CW}}} = v \qquad \text{[km/h]}. \tag{8}$$

За една често срещана комбинация от сечения (на контактния проводник - 100 mm^2, на носещото въже - 70 mm^2), еднакви плътности γ = 8900 kg/m^3 и еднакви сили на опън в двата проводника $\sigma_{MW}S_{MW} = \sigma_{CW}S_{CW}$, (8) се преобразува до

$$v_{CA} = 3.6\sqrt{\frac{\sigma_{MW}S_{MW}+\sigma_{CW}S_{CW}}{\gamma_{MW}S_{MW}+\gamma_{CW}S_{CW}}} = 3.6\sqrt{\frac{2\sigma_{CW}}{\gamma}\frac{S_{CW}}{S_{MW}+S_{CW}}} \qquad \text{[km/h]}, \tag{9}$$

откъдето

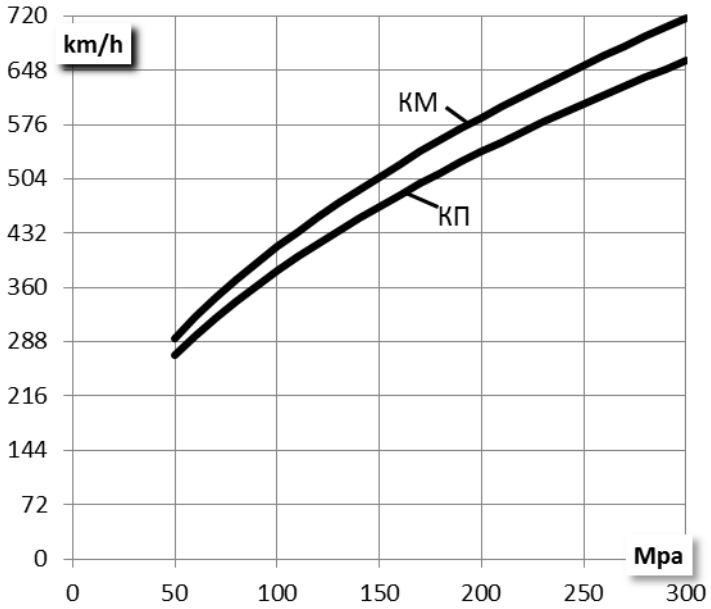
$$v_{CA} = 3.6\sqrt{\frac{2.50.10^6}{8900}\frac{100}{70+100}} = 293\ \text{[km/h]}, \tag{10}$$

Заради явления, свързани с механичния резонанс на контактната мрежа, скоростта v_{train} на превозното средство трябва да се ограничава [1] до

$$v_{train} \leq 0{,}7v \tag{11}$$

За примера (6), с единичен контактен проводник, това означава, че максималната скорост v_{train}, с която локомотивът с пантограф може да се движи, трябва да бъде по-малка от 189 [km/h]. Във втория случай (11), при контактна мрежа с носещо въже и контактен проводник, допустимата скорост v_{train} нараства до 205 km/h.

Якостта на опън за контактни проводници от студено изтеглена мед Cu и мед с добавки от сребро CuAg01 или магнезий CuMg05 е в граници 330-510 MPa [4]. По същия показател, носещото въже от бронз (Bz II) издържа до 553 MPa [5]. За мед и медни сплави с плътност 8900 kg/m^3, в един примерен и допустим диапазон на механични напрежения σ = 50÷300 MPa, скоростта на разпространение на механична вълна по единични контактни проводници и във верижни контактни мрежи по зависимости (5) и (10), изглеждат така, както е показано на графиката на фиг.1.



Фиг.1. *Скорост на разпространение v на механична вълна в единичен контактен проводник (долу) и във верижна контактна мрежа (горе) във функция от напрежението им на опън σ*

2.2 Коефициент на отражение r

Във верижните контактни мрежи движението на механичната вълна по контактния проводник се пренася и към носещото въже през струните. Всяка среща на вълната със струна влияе на цялата конструкция на контактната мрежа и частично се отразява чрез движение в обратна посока и наслагване. Ефектът на отражението зависи от линейните маси на двата проводника и от скоростта на вълната и количествено се намира ([6] и [2]) чрез коефициента на отражение *r*:

$$r = \frac{M_{MW} v_{MW}}{M_{CW} v_{CW} + M_{MW} v_{MW}} = \frac{\sqrt{M_{MW} T_{MW}}}{\sqrt{M_{CW} T_{CW}} + \sqrt{M_{MW} T_{MW}}}. \qquad (12)$$

С напреженията σ на опън на двата материала и при обстоятелството, че бронзът и медта имат еднаква плътност γ, се получава коефициент на отражение

$$r = \frac{\sqrt{\sigma_{MW} S_{MW} \gamma_{MW} S_{MW}}}{\sqrt{\sigma_{CW} S_{CW} \gamma_{CW} S_{CW}} + \sqrt{\sigma_{MW} S_{MW} \gamma_{MW} S_{MW}}} = \frac{S_{MW} \sqrt{\sigma_{MW}}}{S_{CW} \sqrt{\sigma_{CW}} + S_{MW} \sqrt{\sigma_{MW}}} \qquad (13)$$

При еднакви напрежения на опън $\sigma_{CW} = \sigma_{MW}$ коефициентът на отражение r_1 не зависи от тях и за двете примерни сечения $S_{CW} = 100mm^2$ и $S_{MW} = 70mm^2$ е

$$r_1 = \frac{S_{MW}}{S_{CW}+S_{MW}} = \frac{70}{100+70} = 0{,}412\,.$$

При еднакви сили на опън $T_{CW} = T_{MW}$, при еднаква плътност и при горните сечения, изразът (9) за коефициента на отражение се променя до

$$r_2 = \frac{\sqrt{S_{MW}}}{\sqrt{S_{CW}}+\sqrt{S_{MW}}} = \frac{\sqrt{70}}{\sqrt{100}+\sqrt{70}} = 0{,}455,$$

и отново не зависи нито от напреженията на опън, нито от скоростта.
В [2] се препоръчва коефициентът на отражение r да бъде по-малък от 0,5.

2.3 Коефициент на Доплер

С коефициента на Доплер α се преценява количествено възможността отразената от пасивните маси по контактната мрежа механична вълна да увеличи резултантната амплитуда при връщането си към пантографа. Коефициентът на Доплер α е дефиниран [2], [6] като относителна разлика между скоростта v на разпространение на механичната вълна по контактната мрежа и скоростта v_{train} на транспортното средство с пантограф. Изразява се чрез

$$\propto = \frac{v-v_{train}}{v+v_{train}} = \frac{\sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}}-v_{train}}{\sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}}+v_{train}} \qquad (14)$$

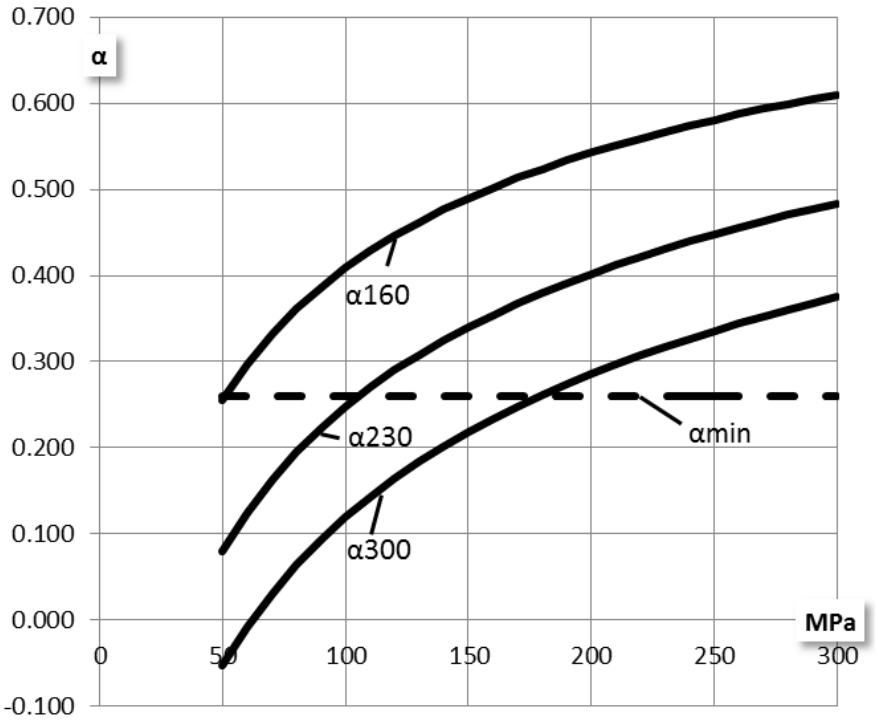
и за скорости 160÷200 km/h трябва да бъде над 0,26 [2]. Тази зависимост е илюстрирана графично на фиг.2.

2.4 Коефициент на усилване

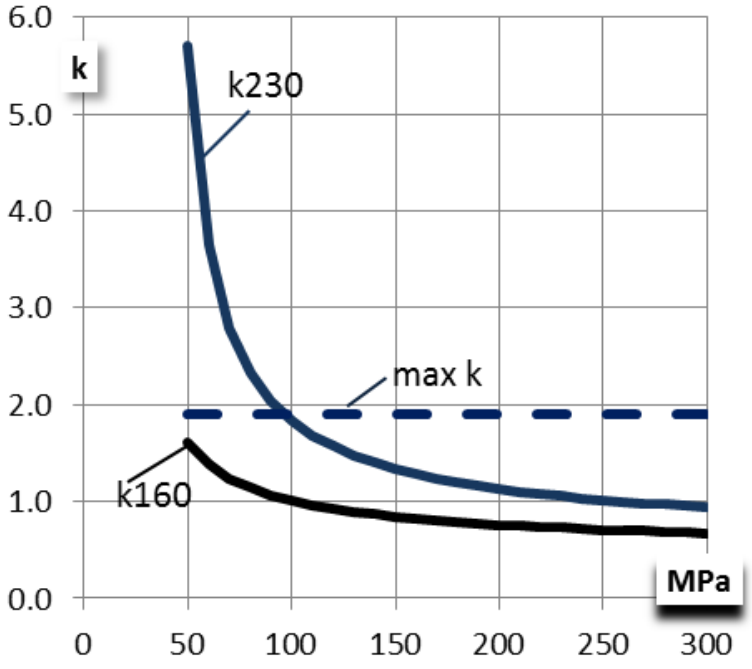
Коефициентът на усилване κ [2], [6] е параметър за оценка на наслагването на многократно отразявана механична вълна между неравномерност по контактната мрежа и идващ към неравномерността пантограф така, че да доведе до анулиране на силата на натиск и като следствие - до нарушаване на контакта. Големината на коефициентът на усилване се намира чрез отношение на коефициентите на отражение и на Доплер:

$$\kappa = \frac{r}{\alpha} \qquad (15)$$

Максимално допустимата стойност на коефициента на усилване според [6] е под 1,63, а според [2] под 1,9 - фиг.3.



Фиг.2. *Коефициент на Доплер α за верижна контактна мрежа при скорости на движение v на превозното средство 160, 230 и 300 km/h във функция от напрежението на опън σ на проводниците на мрежата и неговата минимална долна граница* $\alpha_{min} = 0,26$.



Фиг.3. *Коефициенти на усилване k на контактна мрежа за vtrain = 160 и 230 km/h във функция от напрежението на опън σ на проводниците ѝ.*

3. Заключение

Преработени са известни в литературата зависимости на коефициента на усилване и на коефициента на Доплер от напрежението на опън на проводниците на високоскоростни контактни мрежи. Получените формули са използвани за числени пресмятания и графично представяне на зависимостта на тези коефициенти от напрежението на опън.

Материалът може да се използва за онагледяване на влиянието на напрежението на опън на проводниците върху високоскоростни показатели на верижни контактни мрежи пред студенти, както и пред специалисти в областта на контактни мрежи за електрически транспорт.

Литература

[1] Техническа спецификация за оперативна съвместимост на подсистема „Енергия“ на трансевропейската железопътна система за високоскоростни влакове – 2008/284/ЕО. Официален вестник на Европейския съюз - 14.4.2008. Стр. L 104/22

[2] Железопътна инфраструктура - Техническа спецификация, Подсистема електрозахранване на тягов подвижен състав 25 kV, 50 Hz. Контактна система. Токоснемателите. Механично взаимодействие между токоснемателите и контактната мрежа. ТС-ЖИ 007-2006, ДП НКЖИ - София. Стр. 12.

[3] БДС EN 50119:2009, Железопътна техника, Стационарни инсталации. Електрическа въздушна контактна мрежа. Стр. 22.

[3]4 БДС EN 50149:2001, Железопътна техника, Стационарни инсталации. Електрическа тяга. Профилни контактни проводници от мед и медни сплави. Стр. 11 и Стр. 12.

[4] 5 DIN 48201 Part 2/ Немски стандарти 1981, Многожични бронзови проводници. Таблица 1.

[5] 6 Kiessling, Puschmann, Schmieder, Schneider, Contact Lines for Electric Railways – Planning. Design, Implementation, Maintenance. Publicis Publishing, Second Edition 2009, pp. 563÷577

Автор: Петър Иванов Матов, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *matov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** проф. д-р Иван Миленов

МИКРОПРОЦЕСОРНО УПРАВЛЕНИЕ НА КОРАБЕН ПАЛУБЕН КРАН

Пламен Парушев

Резюме: *В настоящата разработка доклад се разглежда едно предложение за микропроцесорно управление на корабен палубен кран на базата на PLC на фирмата Moeller. Направен е анализ на особеностите на експлоатацията на обекта , предложена е блокова и принципна схема за управление и защита.*
Ключови думи: *PLC, корабен палубен кран , управление*

MICROPROCESSOR CONTROL OF SHIP DECK CRANE

Plamen Parushev

Abstract: *This paper considers a proposal to microprocessor control of the ship deck crane based on PLC, product of Moeller company. It is made an analysis of the characteristics of the operations and it is proposed a block scheme and schematic diagram for control and protection.*

Keywords: *PLC, ship deck crane control*

1. Въведение

Корабните кранове са едната модификация от двата вида товарни средства с периодично действие, влизащи в съставния комплекс на товарното устройство на кораба, като в случая товарната стрела е комплектувана заедно с механизмите за вдигане на товара, за въртене и за изменение обсега на стрелата във вид на самостоятелен агрегат, монтиран на кораба в готов вид.

В сравнение с товарните стрели корабните кранове са конструктивно и технически по-съвършени, по-компактни, заемат по-малка палубна площ, имат постоянна готовност за работа, притежават по-голяма точност на изпълнение на товарните операции, могат да работят с грайфер,създават по-малък шум. Основните недостатъци на корабните кранове се състоят в затрудненатa експлоатация при вълнение в следствие допълнителните съпротивления и клатенето на товара, по-малка товароподемност, по-голямо тегловно натоварване.

На фиг1. е дадена общ вид на корабен въртящ кран. Кранът има три механизма: за вдигане на товара, за въртене и за изменение обсега на стрелата.

През последните години наред с крановете с електрическо задвижване намират приложение и корабните кранове с електрическо хидрозадвижване. На фиг.2. е показано изображение на механизмите на електрохидравличен кран .

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Фиг.1.

Фиг.2.

Крановете от този тип са с товароподемност 3-25.10^4N с високо налягане в силовите хидросистеми (до 17,5 MPa). Те са намерили широко приложение в корабите на много страни.

Изисквания към електрозадвижването:

- достатъчно висока производителност (до 50 цикъла в час при номинален товар);
- широк диапазон от скорости;
- висока надеждност ;
- простота на обслужването и управлението;
- икономичност;
- малко тегло и габарити.

Основното изискване в случая е високата производителност. Повишаването на производителността може да стане чрез:

А) Увеличаване на скоростите за повдигане и спускане на товра. Повишаването на скоростта обаче може да става до известна степен, тъй като това е свързано с увеличаване на мощността на устройството, неговите габарити и стойност.Освен това опита показва, че след определена стойност на скоростта времето престава да намалява и производителността не се увеличава. Това се обяснява с ограничения път на товара, вследствие на което двигателят не може да се ускори и да достигне максималната си скорост, т.е. той остава неизползван по скорост. Съкращаването на времето за един цикъл може да стане за сметка на увеличаване на скоростта на спускане на товара, като тази скорост може да бъде значително по-висока от скоростта за вдигане. Освен това трябва да се има предвид, че трябва да се осигури и определена скорост за полагане на товара в трюма или върху кея. Това е необходимо за запазване на товарите.

Б) Увеличаване на производителността може да стане и чрез съкращаване на времето за преходните процеси. Това се достига чрез намаляване на инерционните моменти на движещите се части и намаляване на скоростта на въртене на двигателя (обикновено до 1000 об/мин.)

За обезпечаването на висока производителност на товарния механизъм, електродвигателят трябва да има от три до шест устойчиви скорости, което се осигурява с превключване схемите на захранване на двигателя.

Необходимостта от такова количество устойчиви скорости се обяснява с това, че при спускането на пълен товар,скоростта се увеличава двукратно спрямо но-

миналното и значение,съответстващо при повдигане, а при повдигане на празния гак тя може да достигне трикратна величина.

2.Общи сведения за програмната средата EASY SOFT

Easy soft е програмен продукт за създаване, запазване, симулиране, документиране и прехвърляне на програма (схема) към свързано устройство. Освен това предлага възможност за наблюдение състоянието на параметрите, както и общ план на функционалните релета.

Схемата, създадена в средата на easy soft, предствлява програма в която се дефинират функциите на контролните релета.

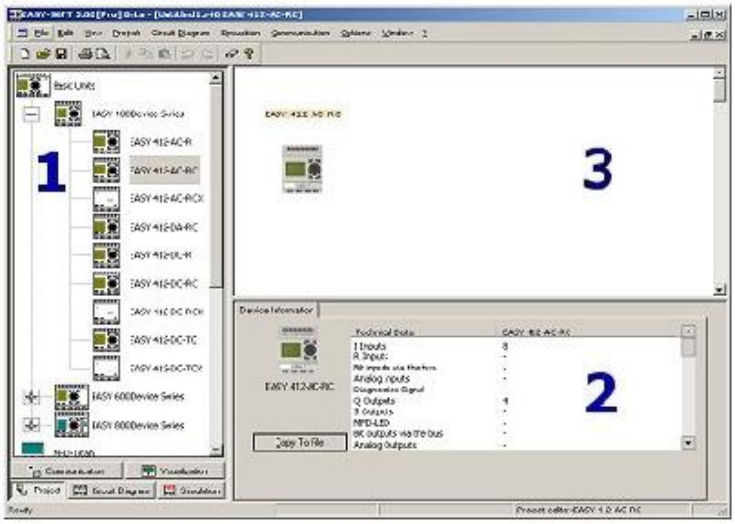
Easy Soft се характеризира със следните формати на изобразяване, редактиране и принтиране на програмата:

- специфично устройство, опростено показване, кореспонденция с дисплея на устройството;
- изобразяваните символи на контактите и бобините е съгласно интернационалния стандарт.

2.1. Прозорец на използвания интерфейс

Прозорецът на използвания интерфейс (фиг.3.) е разделен на три части:

1. Лента с инструменти (Toolbox);
2. Поле с аксесоари (свойства) (Properties field);
3. Работна част (Workbench).



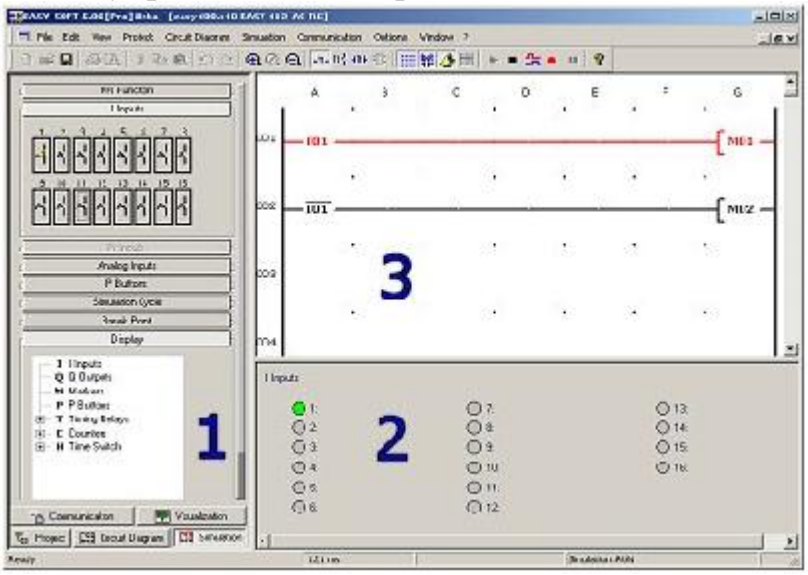
Фиг.3. Начален екран

2.2. Изглед за симулация

В този изглед (фиг.4) може да се избира подходящ бутон от Toolbox за да се симулират състояния. Бутоните биват:

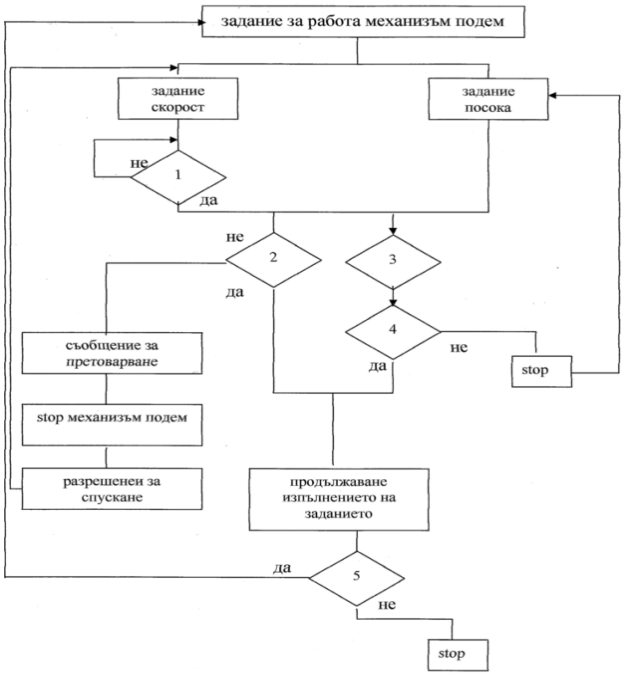
- I/R Function- определят превключващите състояния на I** (от I1 до I16) и R** (от R1 доR16);
- I Inputs- променят сигналното състояние на входовете от I1 до I16;
- R Inputs- променят сигналното състояние на входовете от от R1 доR16;

- Analog Inputs- въвежда аналогова стойност през аналогов потенциометър свързан към I7 и I8 и I11 и I12;
- P Buttons- това са симулирани четири бутона от P_1 до P_4 , които се намират на устройството;
- Simulation Cycle- променя цикличността на времето;
- Display- от тук се избира, кой операнд да се покаже в полето на аксесоарите Properties field. Може да се избере както вход със стойност симулирана в Toolbox, така и изход управляван от Properties field.



Фиг.4 Екран симулация

4. Блоково програмиране



Фиг.5. Блокова схема

1- достигане зададена скорост
2- липса претоварване

3- проверка показания енкодер
4- диапазаон нормален
5- има ли още задания

4. Схема за управление и защита на корабен палубен кран

4.1. Описание на елементите

$I_1 – I_{13}$; $Q_1 – Q_6$ – (Input basic unit -Output basic unit). – Входно - изходни портове на устройството.Чрез тях се осигурява връзката на приетите на входа сигнали и тези изведени на изхода.
редове 001÷006:
I_{01}-н.о контакт-посока на стрелата(нок) нагоре
I_{02}- н.о контакт-посока на стрелата(нок) надоло
I_{03}- н.о контакт- посока на въртяща колона на ляво
I_{04}- н.о контакт- посока на въртяща колона на дясно
I_{05}- н.о контакт- посока на куката(гак) нагоре
I_{06}- н.о контакт- посока на куката(гак) надоло
I_{09}-н.з контакт –краен изключвател стрела нагоре
I_{10}-н.з контакт- краен изключвател гак нагоре
I_{13}- н.о контакт-master stop бутон
M_1 , M_2 -(marker).- Маркери. Могат да се приемат като аналог на комутационни апарати – контактори, релета и т.н.
A_1,A_2,A_3 – Analog Comparator/Threshold Value Switch.Аналогови компаратори
D_1,D_2,D_3,D_4,D_5 – Text Displey –Текстов дисплей

4.2. Режими на работа

А) Установен режим на работа

На фиг.6 е показана симулационна схема в режим на очакване на избор на посока(в червено),осъществяваща се чрез н.о. ключове I_{01}÷I_{06} .При натискането на който и да е от тези ключове се запускат и съответните им изходи- Q_{01}÷Q_{06},след което съоръжението извършва желаната от оператора операция.

Б) Авариен режим

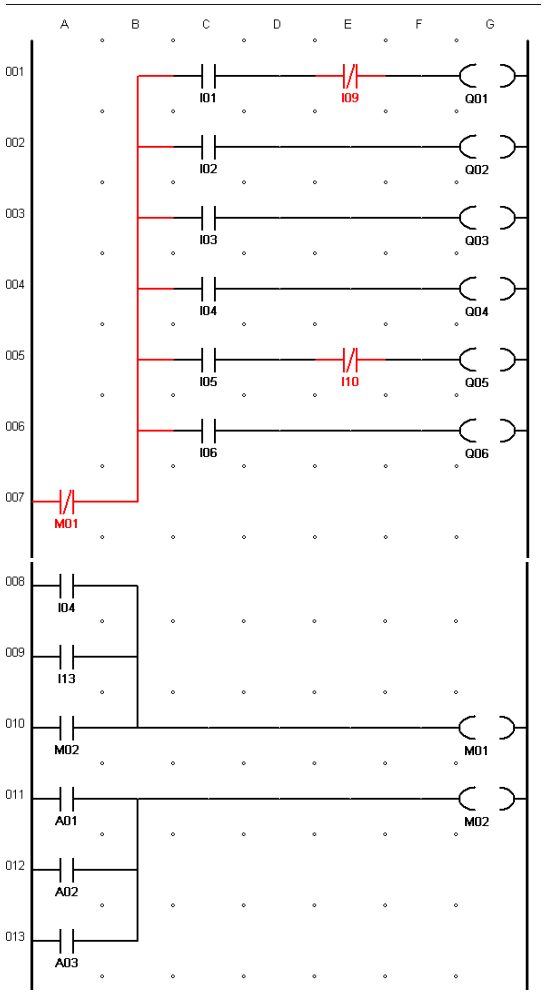
Може да се породи от редица фактори като:претоварване , к.с., или под въздействието на външни климатични условия (вятър,вълни и др).

На схемата (фиг.7) е показан авариен режим, при който се е з действала токовата защита.Тя се осъществява посредством аналогови входове A_{01}÷ A_{03} (ред 011÷013) и маркер M_{02}.В следствие на което система спира и се задейства текстовия дисплей D_{02} (ред 015) .Схемата съдържа още и защити от:

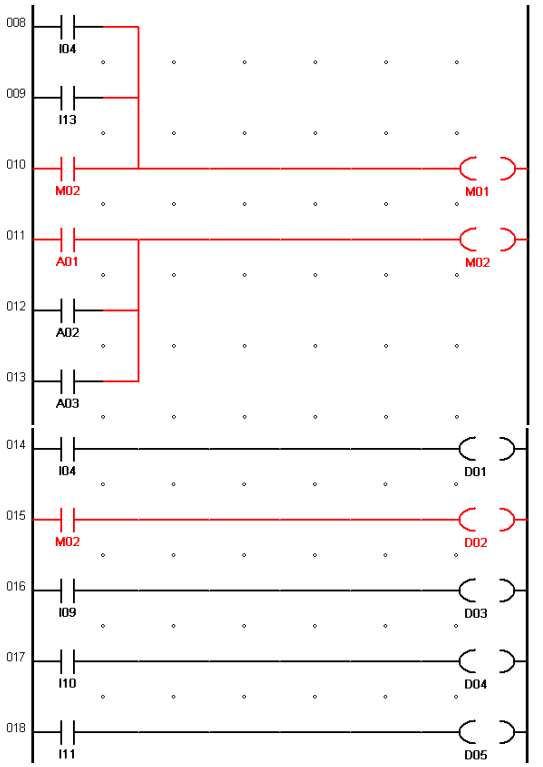
- вълни/вятър(ред 008; I_{04}÷M_{01}) ,включваща текстов дисплей D_{01} (ред 014);

- максимална височина на стрелата-задейства се текстов дисплей D_{03}(ред016);

- максимална височина на куката- задейства се текстов дисплей D_{04}(ред017).



Фиг.6. Симулационна схема



Фиг.7. Авариен режим

Фиг.8.Общ вид на макета

5. Заключение

Разработеното програмно управление е приложено за изработка на действащ лабораторен макет /фиг.8/ в лаборатория по корабна автоматика на ТУ-Варна .
Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са извършени по проект в рамките на присъщата на ТУ-Варна научно-изследователска дейност, финансирана целево от държавния бюджет.

Литература

[1] А.П. Богословский,Е.М.Певзнер Судовые Электропроводы Ленинград „Судостроение” 1975г .I и II т.
[2] Български корабен регистър IV и V том Варна 1986г.
[3] Г.Н. Вълчев Палубни механизми София „Техника” 1980г.
[4] С.Йорданов, А.Попов Електрозадвижване и автоматизация на кранове, София „Техника” 1974г.

Автори: Пламен Парушев, гл. ас, катедра ЕСЕО, Технически Университет - Варна, E-mail address: *pvparushev@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р В. Господинов

ИЗСЛЕДВАНЕ ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ В УСЛОВИЯТА НА НЕСИМЕТРИЧНО И НЕЛИНЕЙНО НАТОВАРВАНЕ

Пламен Парушев, Валентин Гюров, Владимир Чиков, Росен Василев, Никола Македонски

Резюме: *В работата е извършен анализ на влиянието върху показателите на качеството на електрическата енергия в условия на несиметрично и нелинейно натоварване. Разработената методика се базира на резултати от експериментални и теоретични изследвания и е възможност за провеждане на разчети.*
Ключови думи: *показатели за качеството на електрическата енергия, не-синусоидалност на напрежението, нелинейност на напрежението, производствени агрегати*

STUDY ON POWER QUALITY INDEXES IN CASE OF ASYMMETRIC AND NON-LINEAR LOAD

Plamen Parushev Valentin Gurov, Vladimir Chikov, Rosen Vasilev Nikola Macedonski

Abstract: *The study presents an analysis on the impact of power quality indexes in terms of asymmetric and non-linear load. The developed methodology is based on the results of experimental and theoretical studies and it is an opportunity for estimates.*

Keywords: *power quality indexes, power loss, voltage deviation*

1. Въведение

В съответствие с новия закон за стандартизация, всички държавни стандарти имат препоръчителен характер. Основен нормативен документ за показателите за качеството на електрическата енергия (ПКЕЕ) в Република България са Показатели за качество на електроснабдяването, приети от ДКЕВР с Решение N П-3 от 30.06.2004 на база на стандарта EN 50160, който от 2006 г. е БДС EN 50160. Този стандарт изцяло замени стария БДС 10 694-80. Основните показатели, които се нормират са следните: отклонение на честотата, отклонение на напрежението, бързи изменения на напрежението, несиметрия на напрежението, несинусуидалност на напрежението, краткотрайни спирания на напрежението, краткотрайни и продължителни прекъсвания.Те се отнасят за мрежи НН и СН (до 35 kV), тъй като основно в тези мрежи са потребителите, влошаващи в най-

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

голяма степен качеството на електроенергията. Стандарт за ПКЕЕ за мрежи ВН и свръхвисоко напрежение до този момент няма разработен. В Таблица 1 са представени нормените изисквани за ПКЕЕ в съответствие с БДС EN50160. В сравнение със стария стандарт, по отношение на несиметрията тук не се нормират съставящите с нулева последователност, което е съществен пропуск при нашите условия на експлоатация на електро-снабдителната система (ЕСС). Прибавени са следните показатели за случайни прекъсвания, свързани с надеждността на електроснабдяването:

- Средна продължителност на прекъсването SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^{m} T_i . n_i}{N} \tag{1}$$

където: n_i - броя на потребителите, засегнати при i -тото прекъсване; T_i - времето на i- тото прекъсване; i - брой прекъсвания;

- Средна честота на прекъсванията на системата *SAIFI* - определя се като отношение на общия брой прекъсвания на засегнатите потребители към общия брой потребители в ЕСС за период

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^{m} n_i}{N} \text{ , [бр/год.]} \tag{2}$$

- Средна продължителност на прекъсванията на електроснабдяването за потребител CAIFI (Customer Average Interruption Frequency Index). Определя се като отношение на общия брой прекъсвания към общия брой на прекъснатите потребители в ЕСС.

$$CAIFI = \frac{\sum_{i=1}^{m} n_i}{N'} \text{ , [бр/год.]} \tag{3}$$

Този показател се отличава от предходния по знаменателя N', който може да се отчита няколко пъти в годината.

- Средна продължителност на едно прекъсване CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) - определя се като отношение на сумарната продължителност на прекъсването към общия брой прекъсвания за периода (година):

$$CAIDI = \frac{\sum_{i=1}^{m} T_i . n_i}{\sum_{i=1}^{m} n_i} \quad \text{[min]} \tag{4}$$

Табл.1

Хактерис-тика	Мрежи НН	Мрежи СН	Означения	Причина за вло-шаване
Отклонение на честотата f от номинал-ната честота	49.5-50.5 Hz (за 99.5 % от го-дишен период) или 47-52 Hz (целогодишно)	49.5-50.5 Hz (за 99.5 % от годишен период) или 47-52 Hz (целогодишно)	$\delta f = \frac{f - f_H}{f_H}.100[\%]$	ЕСС
Отклонение на напреже-нието U от номиналното напрежение U_H - δU	$U_н$ + - 10% (за всеки период от една сед-мица, 95% от средната ефек-тивна стойност на напреженито за 10 мин.) $U_н$ +10/ - 15% (за всеки пе-риод от една седмица, всич-ки средни ефективни стойности на напрежението за 10 мин.)	$U_н$ + - 10% (за все-ки период от една седмица, 95% от средната ефективна стойност на напре-жението за 10 мин.) $U_н$ +10/ - 15% (за всеки период от една седмица, всички средни ефективни стой-ности на напреже-нието за 10 мин.)	$\delta U = \frac{U - U_H}{U_H}.100[\%]$	ЕСС
Бързи изме-нения на напрежението за период 1÷2 с. - δU	Не по-големи от 5% $U_н$; из-менения до 10% $U_н$ с малка продължител-ност могат да настъпват ня-колко пъти на ден при някои условия. Фли-кер: P_{lt} + -1(за 95% от период от една сед-мица)	Не по-големи от 4% $U_н$;изменения до 6% $U_н$ с малка продължителност могат да настъпват няколко пъти на ден при някои ус-ловия. Фликер : P_{lt} + -1(за 95% от пе-риод от една сед-мица)	$\delta U = \frac{U - U_H}{U_H}.100[\%]$	Потреби-тели с про-мен-ливо на-товарване

Табл.1 (продължение)

Хактерис-тика	Мрежи НН	Мрежи СН	Означения	Причина за вло-шаване
Несиметрия на напрежението – оценява се чрез съставящите с обратна и нулева последователност	95% от средната ефективна стойност на напрежението с обратна последователност за 10 мин. трябва да бъде в граници от 0 до 2 % $U_н$ от права последовател-ност за всеки период от една седмица. В някои райони на мрежата могат да имат място стойности до 3% $U_н$.	95% от средната ефективна стойност на напрежението с обратна последователност за 10 мин. трябва да бъде в граници от 0 до 2 % $U_н$ от пра-вата последова-телност за всеки период от една седмица. В някои райони на мрежата могат да имат място стойности до 3% $U_н$.	$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_1}.100[\%]$ $\alpha_U = \frac{U_0}{U_1}.100[\%]$ $\varepsilon_I = \frac{I_2}{I_1}.100[\%]$ $\alpha_I = \frac{I_0}{I_1}.100[\%]$	Потребители с несиметрично натоварване
Несинусоидалност на напрежението	95% от средната ефективна стойност за всяка една от хармоничните съставящи на напрежението за 10 мин. за всеки период от една седмица трябва да бъде : U_3+ -5% ,U_5+ -6%, U_7+ -5% , U_{11}+ -3,5% , U_{13}+ -3% ; общо изкривяване + - 8%.	95% от средната ефективна стойност за всяка една от хармоничните съставящи на напрежението за 10 мин. за всеки период от една седмица трябва да бъде : U_3+ -5% ,U_5+ -6%, U_7+ -5% , U_{11}+ -3,5% , U_{13}+ -3% ; общо изкривяване + - 8%.	$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=1}^{40} U_\nu^2}}{U_1}.100[\%]$ $K_{U\nu} = \frac{U_\nu}{U_1}.100[\%]$ $THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=1}^{40} I_\nu^2}}{I_1}.100[\%]$ $K_{I\nu} = \frac{I_\nu}{I_1}.100[\%]$	Потребители с нелинейно натоварване
Краткотрайно спадане на напрежението	Очакваният брой може да бъде от няколко десетки до хиляда за период от една година	Очакваният брой може да бъде от няколко десетки до хиляда за период от една година	$\delta U^{"} = \frac{U - U_{\min}}{U_H}.100[\%]$	ЕСС

Табл.1 (продължение)

Хактеристика	Мрежи НН	Мрежи СН	Означения	Причина за влошаване
Краткотрайни прекъсвания на напрежението	Показания: от няколко десетки до няколко стотици	Показания: от няколко десетки до няколко стотици	SAIFI , CAIFI	ECC
Продължителни прекъсвания на напрежението	Показания: (прекъсване над 3 мин.) годишна честота от 10 до 50, в зависимост от района	Показания: (прекъсване над 3 мин.) годишна честота от 10 до 50, в зависимост от района	SAIDI , CAIDI	ECC

В табл.2 са представени нормени изисквания за THD_U и K_{U_ν} за някои страни.

Табл.2

Страна	Вид на ел. мрежа	Номинално напрежение , kV	THD (THD max) [%]	$K_{U\nu}=\frac{U_\nu}{U_1}.100,\%$ Нечетни	/ Четни
Русия		До 1	5 (10)	6	3
		6÷20	4 (8)	5	2,5
		35	3 (6)	4	2
		110 и повече	2(4)	2	1
Франция	Индивидуални нелинейни товари.		1,6	0,6	1
	Обща точка на включване на група нелинейни товари		5		
Германия			10		
Швеция		0,430	4		
		3,3÷24	3		
		До 84	1		
САЩ	Електроснабдителна система с общо предназначение	2,4 ÷ 69 115 и повече	(5) (1,5)		
	Специални електроснабдителни системи		(5) (1,5)		
Финландия	Обща точка на включване	До 1	5	4	
		3÷20	4	3	
		30÷45	3	2	
		110	1,5	1	
Австралия	Разпределителна мрежа	До 33	5	4	2
	Захранваща мрежа	22,33 и 66	3	2	1
	Системна мрежа	110 и повече	1,5	1	0,5
Нова Зеландия	Разпределителна мрежа	До 66	5		

Табл.2 (продължение)

Страна	Вид на ел. мрежа	Номинално напрежение , kV	THD (THD max) [%]	$K_{Uv} = \frac{U_v}{U_1}.100,\%$ Нечетни / Четни	
Обединено кралство	Обща точка на включване	0,415	5	4	2
		6,6 и 11	4	3	1,75
		33 ,66	3	2	1
		132	1,5	1	0,5
Китай		0,38	5	4	2
		6, 10	4	3	1,75
		35÷63	3	2	1
		110	1,5	1	0,5

В табл.3 са представени показателите SAIDI [мин./год.] и SAIFI [бр./год.], съответно в числител и знаменател за редица европейски страни, като (1) означава, че 93 % от потребителите НН са подложени на проверка през 1999г, с (2) са обозначени само прекъсванията за над 1 kV, с (3) са обозначени прекъсвания под 1 kV, в които са включени и планирани прекъсвания. Най – големи показатели има Италия, при която SAIDI е в границите 191÷272 [мин./год.] , а SAIFI – 3,6÷4,8 [бр./год.]. В различни страни са възприети различни диапазони на изменение на нормените стойности за честотата на захранващото напрежение, представени в табл.4.

Табл.3

Страна	SAIDI (мин /г.) / SAIFI (бр./г.)			
	1996	1997	1998	1999
Италия (1)	272 / 4,8	209 / 4,6	196 / 4,1	191 / 3,8
Белгия (2)/(4)	37 / 0,9	43 / 0,91	43 / 083	47 /094
Холандия(2)	26 / 0,14	18 / 0,10	21 / 0,11	25 /0,14
Норвегия (2)	170 / -	205 / -	130 / -	180 / -
Обединено кралство (4)	72 / 0,82	75 / 0,82	70 / 0,73	63 / 0,77
Швеция	-	79/ 4,3	66 / 0,7	152 / 1,2
Франция	74 / 1,6	56 / 1,31	46 / 1,22	57 / 1,26
Испания	2,6 / -	2,79 / -	2,11 / -	2,61 / -
Португалия(3)	3,30 / -	9,4 / -	8,33 / -	6, 08 / -

Нивата на допустимите стойности на хармоничен състав на напреженията се дефинират от различните стандарти, имащи различна тежест на изискванията спрямо потребителите и енергосистемата. Основните са IEEE 519-1992, разработен от IEEE, група стандарти IEC 61000 (част 1 до част 6), разработен от Международната електротехническа комисия със седалище в Женева, Швейцария, БДС EN 50160 и БДС EN 60555-2. Стандартът IEC 61000-3-6 е с приемник БДС EN 50160, а БДС EN 60555-2 е от стандарт IEC 61000-3-2 и IEC 61000-3-4. От своя страна БДС EN 60555-2 произхожда от IEC 555-2 и вече отменения BS555 (British standard).

Табл.4

Страна	Нормален режим , Hz	Авариен режим , Hz
България	49,5÷50,5	47,0÷52,0
Русия	49,9÷50,1	49,8÷50,2
Белгия	49,8÷50,2	49
Италия	49,9÷50,1	49,5÷50,5
Канада	59,95÷60,06	59
Холандия	49,8÷50,1	47,5
САЩ	60	59,4
Франция	49,95÷50,05	49,98÷50,1
Финландия	49,9÷50,1	49,98÷50,1
Швеция	49,9÷50,1	49,98÷50,1

По-голямата тежест на посочените IEC стандарти идва от факта, че те поставят сериозни ограничения не само върху хармоничния състав на напрежението, а и върху този на тока. Най-големите изисквания има стандарт IEEE519, където различните допустими нива се определят се определят не само от номера на хармоника, а и от отношението на консумирания ток към тока на късо съединение в точката на присъединяване на потребителя.

2. Комплексна методика за определяне загубите от влошени ПКЕЕ

При разработване на постановката се приемат следните изходни условия [1,2,3]:

- Икономическите загуби, обусловени от влошени ПКЕЕ са резултат от съвместното действие на несиметрията, несинусоидалността и отклонението на напрежението при работа на ЕСС;
- Определянето на икономическите загуби се основава на коли-чествена оценка на три вида отрицателни последствия :
  - увеличаване загубите на активна мощност;
  - съкращаване живота на елементите на ЕСС;
  - увеличаване на капиталните вложения в ЕСС;
- Оценката за икономическите загуби е предназначена за предварителни разчети на икономическата целесъобразност от внедряване на мероприятия за повишаване на ПКЕЕ.

3. Основни положения на методиката

Годишните икономически загуби, обусловени от влошаване на ПКЕЕ, се определят като сума от загубите от несиметрия и несинусоидалност на напрежението и загубите от отклонението му :

$$У = У_{Н} + У_{ОТК}[лв./год.] \quad (5)$$

където: $У_{н}$ - икономически загуби от несиметрия и несинусоидалност на напрежението [лв./год.]; $У_{отк}$ - икономически загуби от отклонение на напрежението [лв./год.]; Загубите от несиметрия и несинусоидалност имат три съставящи :

1. Съставяща обусловена от допълнителни загуби на активна мощност :

$$У_1 = 0{,}01.Ц_e \cdot \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i \cdot T_i [лв./год.] \quad (6)$$

където: $Ц_e$ - цена на 1 [kWh] активни загуби на електроенергия [лв./kWh], определена като специфичен разход независещ от товара; ΔP_i - допълнителни загуби на активна мощност в i - тата група еднородни елементи [kW]; T_i - годишен фонд работни часове в i - тата група еднородни елементи [часа/год.], определен от реални данни; n – брой на разглежданите групи еднородни елементи.

2. Съставяща, обусловена от съкращаване живота на електротехническото оборудване :

$$У_2 = \sum_{i=1}^{n} З_i \cdot \left(\frac{\chi_i - 1}{1 + \alpha_н \cdot T_{нi}} \right) [лв./год.] \quad (7)$$

където: $З_i$ - приведени годишни разходи (ПГР) за i - тата група еднородни потребители [лв./год.]; χ_i - кратност на намаляване на живота на i - тата група еднородни елементи [о.е.]; $\alpha_н$- нормативен коефициент на ефективност на капиталовложенията[1/год.]; $T_{нi}$ - номинален живот за i - тата група еднородни елементи [год.];

3. Съставяща, обусловена от намаляване ефективността на използване на транзитиращите елементи от електрическата мрежа :

$$У_3 = \sum_{j=1}^{m} \Delta З_j [лв./год.] \quad (8)$$

където: $\Delta З_j$ – допълнителни ПГР за усилване на j - тия транзитиращ елемент [лв./год.]; m– броя на транзитиращи елементи от електрическата мрежа; ПГР на $З_i$ се определят от формулата:

$$З_i = \alpha_н \cdot К_i + И_i [лв./год.]$$

където: $К_i$ – капиталовложения за i – тата група еднородни елементи [лв.]; $И_i$ – годишни експлоатационни разходи [лв./год.], в които влизат и отчисления за амортизация и разходи за обслужване.
Нормативният коефициент на ефективност е в границите $\alpha_н = 0{,}01 \div 0{,}15$.

4. Заключение

Разработената методика се базира на резултати от експериментални и теоретични изследвания и дава възможност за провеждане на инженерни разчети. При това се отчита съвместното въздействие на различните ПКЕЕ върху работата на елементите на ЕСС. Това изискване е продиктувано от факта, че резултатите от въздействието на няколко фактора върху даден изходен параметър, в много от случаите не е тъждествено с проста сума от въздействията на отделните фактори. В това се състои и принципа на така наречения „комплексен многофакторен подход”, успешно прилаган за изследване режимите на работа на ЕСС.

Литература

[1] Шидловский А., Кузнецов В., Николаенко В., Оптимизация несиметрич-ных режимов систем электроснабжения , Киев, Наукова Думка , 1987 г.

[2] Фьодоров А., Абашев А., Оценка экономическом целесъобразност введения комплексного управления електропотреблением и режимом напрежения, Сб. Оптимизация электроснабжения больших городов и ПП, 1983 г.

[3] Гюров В., Рационализиране компенсацията на реактивни товари в условията на несиметрични и несинусоидални режими в електроснабдителни системи, Дисертация, ТУ-Варна, ВАК, 2010 г.

[4] Цанев Ц., Цветкова С., Качество на електрическата енергия, Авангард прима, София, 2011

Автори: Пламен Парушев, гл. ас., катедра ЕСЕО, - ТУ-Варна, E-mail address: *pvparushev@abv.bg* ; Валентин Гюров, гл. ас. д-р, катедра ЕСЕО, ТУ-Варна, E-mail address: *vgiurov@yahoo.com*; Росен Василев, доц., д-р, катедра ТИЕ, ТУ-Варна, E-mail address: *rsnvasilev@abv.bg*; Владимир Чиков, гл. ас. д-р, катедра ЕСЕО, ТУ-Варна, E-mail address: *vladimir_128@abv.bg*; Никола Македонски, ас., катедра ЕСЕО, ТУ-Варна, E-mail address: *n.makedonski@gmail.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. С. Цветкова

ОТНОСНО ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ПОСТИГАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ ПРИ ПОТРЕБИТЕЛИ, РАБОТЕЩИ В РЕЖИМ НА ПОНИЖЕНО НАТОВАРВАНЕ

Пламен Парушев, Владимир Чиков , Валентин Гюров , Росен Василев, Никола Македонски

Резюме: *В работата е извършен анализ на резултатите от обследване на влиянието на натоварването на производствени агрегати в млекопреработвателно предприятие върху несинусоидалността на напрежението. Анализирани са получените зависимости в различни точки на заснемане .*
Ключови думи: *електромагнитна съвместимост, несинусоидалност на напрежението, производствени агрегати*

ON OPPORTUNITIES FOR ACHIEVING THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TO USERS WORKING UNDER REDUCED PRESSURE

Plamen Parushev, Vladimir Chikov, Valentin Gurov, Rossen Vassilev, Nikola Macedonian

Summary: *This work is an analysis of the results of the investigation of the influence of load generation units in the dairy on asinusoidality voltage. Analyze the relation obtained in different parts of the shot.*

Keywords: *electromagnetic compatibility, asinusoidality voltage, production units*

1. Въведение

Електромагнитната съвместимост (EMC) много често се определя като способността на сигнал и шум да съжителстват без загуба на информация, съдържаща се в предавания сигнал [4,5]. В съвременен и по-широк смисъл, с масовото навлизане в индустрията на нелинейни полупроводникови преобразователни устройства за електрозадвижвания, а и не само за тях, под електромагнитна съвместимост на полупроводниковите устройства за промишлено електрозахранване или електроенергийна система на автономен обект се разбира способността им за едновременно функциониране без да се нарушават зададените режими на работа при запазване на техническите и експлоатационни режими за срока на експлоатация на електрооборудването [3].

Въздействието на статичните преобразуватели се изразява в два аспекта:

- генериране в мрежата на хармоници на напрежение и ток с различна физическа природа;
- консумиране от мрежата на реактивна мощност.

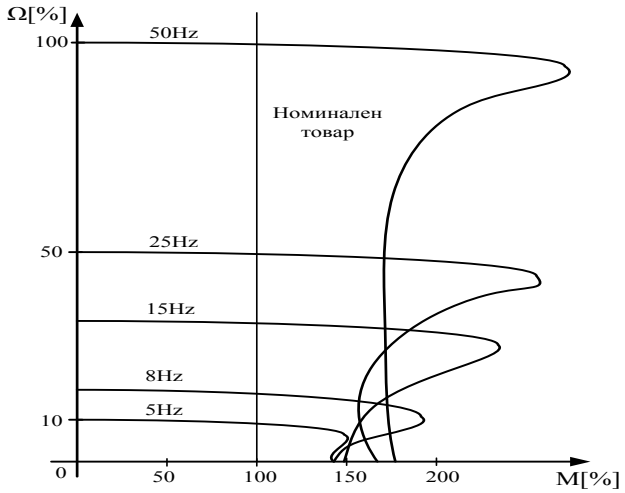
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Определящ е първият аспект на ЕМС. Един начин за намаляване на въздействието на хармоничните е генериране на напрежение с определени характеристики на хармоничния състав. Преобразувателите на честота с междинно звено за постоянен ток притежават много богати възможности за формиране на изходното напрежение, отместващи честотата на хармоничните на изходното напрежение в областта на високите честоти благодарение на бързите превключващи елементи [1,2].

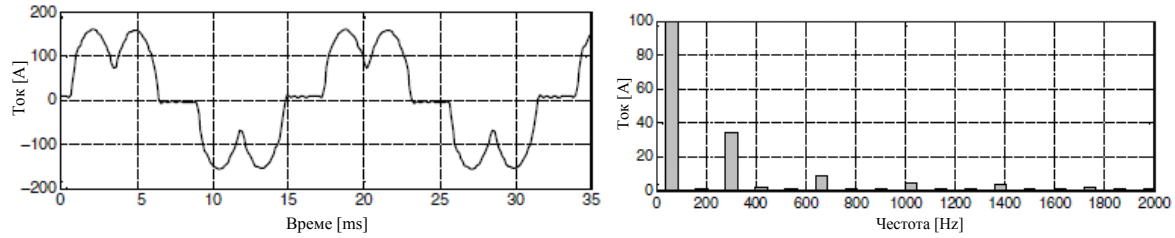
2. Специфика на честотопреобразувателите по отношение на ЕМС

Трифазните мостови силови преобразуватели се различават от монофазните по отношение на ЕМС,те не генерират трети и кратните му хармоници. Това се обяснява с факта, че в захранващата мрежа те са потребители, свързани в схема триъгълник и трети хармоник се затваря в тях и не се разпространява по нулевия(четвърти) проводник. Трябва да се има в предвид, че третия хармоник е с най-голям тегловен коефициент от енергозначимите хармоници в мрежата и е приблизително 1/3 от основния. Те внасят при използването им в инверторите за управление на АД линейност на характеристиките в целия диапазон на работните обороти и въртящ момент (фиг.1) и са масово използвани.



Фиг.1. Механични характеристики на 75kW АД реализирани чрез управление от честотопреобразувател

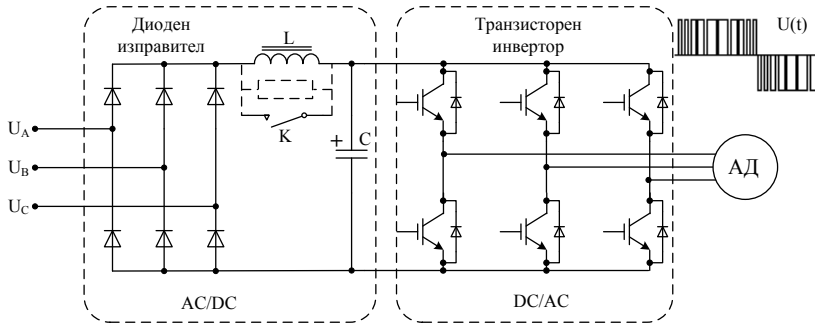
В същото време те се явяват и източник на най-много и значими висши хармоници. На фиг.2.а е показана формата на тока на една от фазите на честотопреобразувател, а хармоничния му спектър - на фиг.2.б. Тази форма на тока е типична за преобразуватели, захранващи постояннотокови двигатели и е за най-разпространените честотопреобразуватели.



а) б)

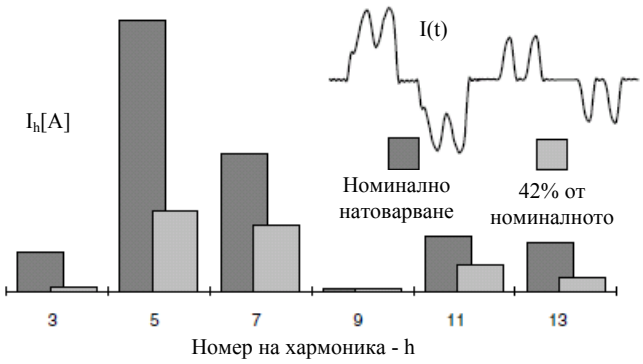
Фиг.2. Форма на тока и хистограма в една от фазите на честотопреобразувател

В практиката за управление на асинхронни двигатели са се наложили преобразуватели на честота DC/AC захранвани от източник на напрежение. Те имат входен преобразувател AC/DC работещ като източник на напрежение, използващ кондензатор на изхода с голяма стойност. Силовата схема на такъв преобразувател е показана на фиг. 3. На показаната схема входния диоден изправител захранва кондензатора С през дросела L, чиято функция е да намали пика на зарядния ток в кондензатора при първоначално включване в мрежата. При инвертори с мощност по- малка от 5kW този дросел е заменен от резистор, който се изключва след заряд на кондензатора/ на схемата ,паралелно на L с пунктир/. Поради това единствено влияние върху генерираните в мрежата хармоници оказва големината на кондензатора С, натоварването на инвертора и импеданса на захранващата линия.



Фиг.3. Силова схема на честотопреобразувател

На фиг.4 е представена формата на кривата на тока при номинално натоварване и при понижено натоварване на честотопреобразувател. От фигурата се вижда, че при понижено натоварване (обороти на двигателя) хармоничния състав на тока се променя значително.



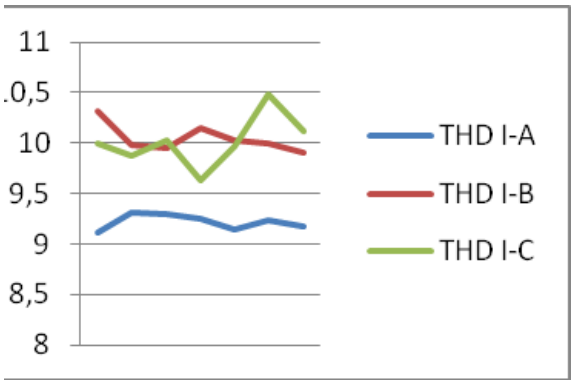
Фиг.4. Изменение на генерирания от честотопреобразуватели хармоничния състав при различни натоварвания на управлявания АД

3. Описание на обекта и резултати

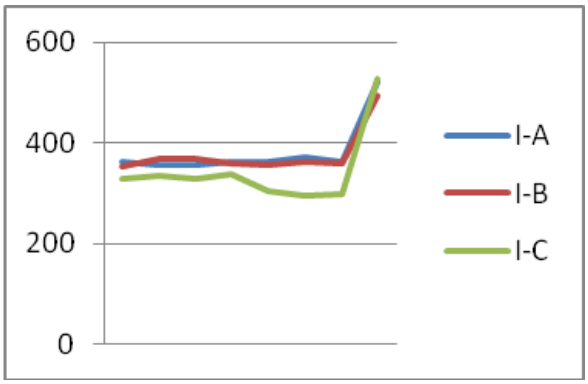
Производствените мощности са на територията на област Шумен. Предназначението им е обработка и производство на мляко, млечни произведения и междинни продукти. Реализирани са изследвания върху шест трафопоста, намиращи се на територията на завода, които захранват различни производствени линии. Преди обновлението задвижванията са били без честотни управления,

като в последните 3 години пусковата апаратура и управлението са заменени с честотни управления и автоматизация на базата на PLC. Компенсацията на страна ниско напрежение е съсредоточена в трафопостовете и тя действа и в момента, като е със занижено натоварване, но нейното използване не може да се избегне. След въвеждане на честотните управления и автоматизираното управление са регистрирани нежелани явления във вид на рязко намаляване живота на кондензаторните батерии, а в два от цеховете кондензаторните уредби излизат от експлоатация. Заснети са на характеристиките с уред PNA 760 във всички трафопостове на страна ниско напрежение. Заснетите данни са от различни контролни точки на ЕСС на фирмата. Те дават зависимостта на коефициента на несинусоидалност за всяка фаза в [%] и изменението на тока във всяка от фазите в [А]. Широкото използване на честотопреобразуватели има положителен ефект върху управляемостта на двигателите в целия диапазон на регулиране на оборотите, контрол върху пусковите токове и защита на двигателя във всички режимни състояния. Този тип съоръжения реализират и неблагоприятни ефекти върху електроснабдителната мрежа и отделните изграждащи я компоненти

3.1. Администрация и входящ контрол и предварителна обработка

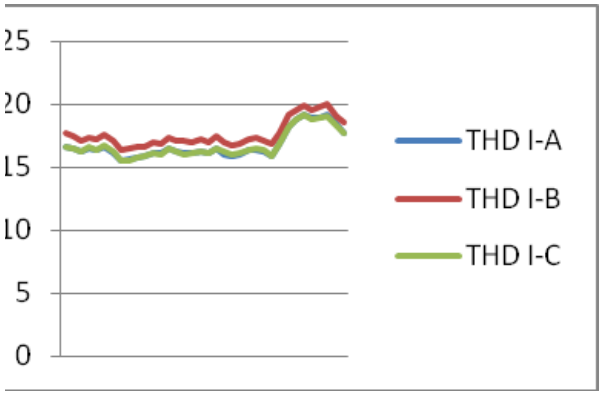


Коефициент на несинусоидалност

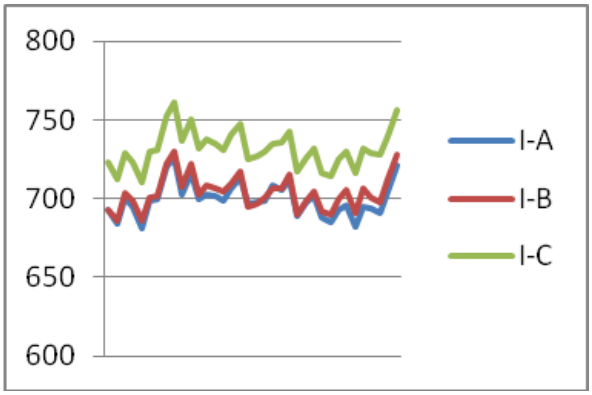


Ток във всяка от фазите в [А]

3.2. Пречиствателна станция

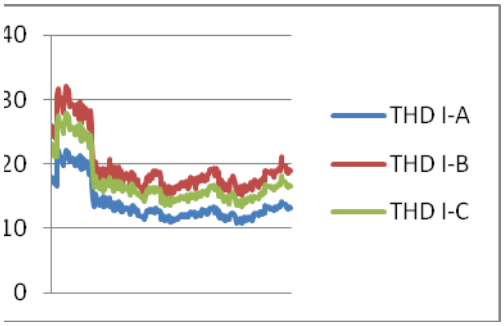


Коефициент на несинусоидалност

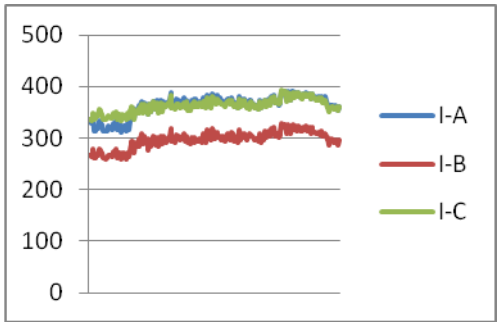


Ток във всяка от фазите в [А]

3.3. Цех предварителна обработка

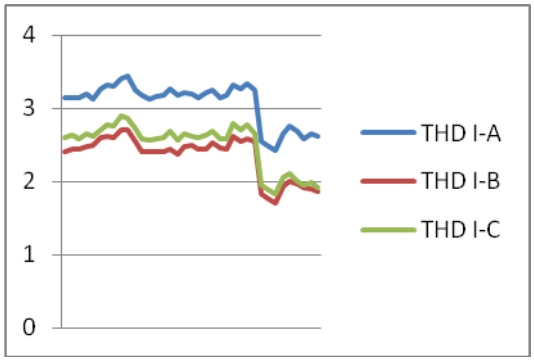


Коефициент на несинусоидалност

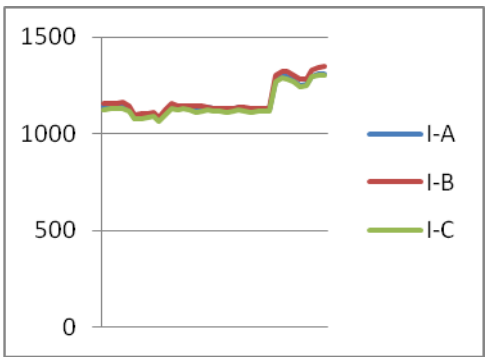


Ток във всяка от фазите в [A]

3.4. Цех кисело мляко и субпродукти - 1

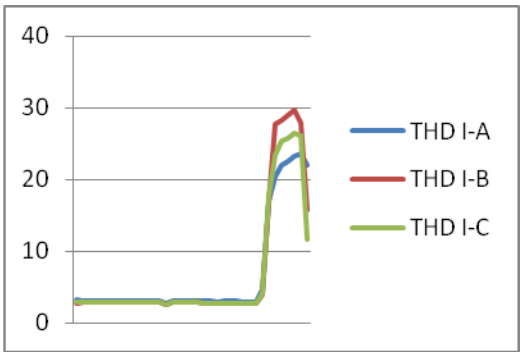


Коефициент на несинусоидалност

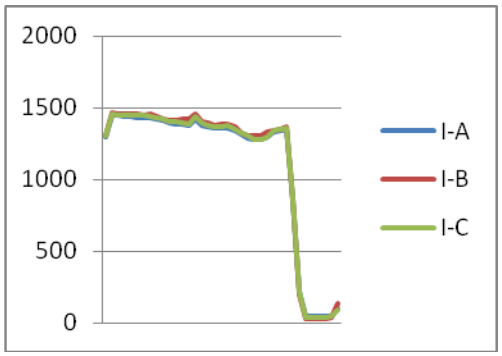


Ток във всяка от фазите в [A]

3.5. Цех кисело мляко и субпродукти - 2

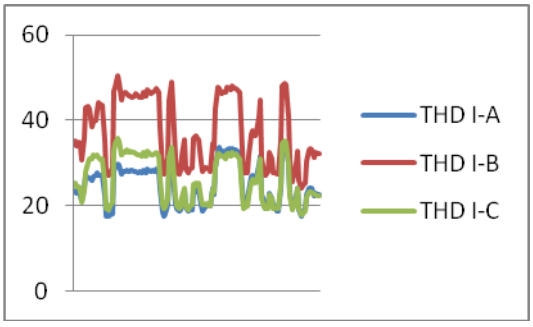


Коефициент на несинусоидалност

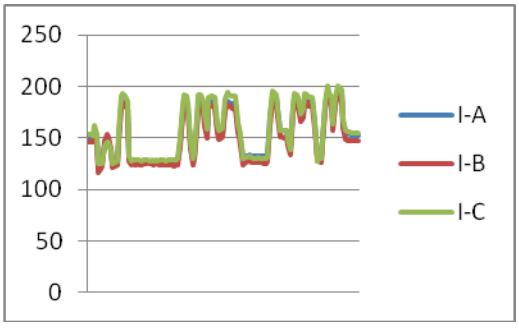


Ток във всяка от фазите в [A]

3.6. Цех готова продукция и хладилни инсталации - 1

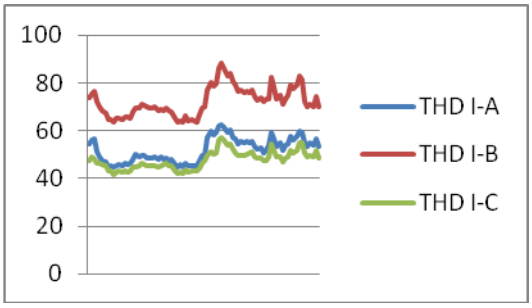


Коефициент на несинусоидалност

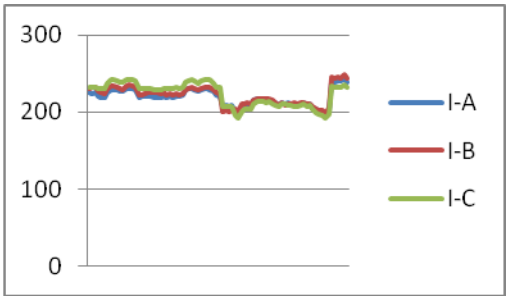


Ток във всяка от фазите в [A]

3.7. Цех готова продукция и хладилни инсталации - 2



Коефициент на несинусоидалност



Ток във всяка от фазите в [A]

Негативните ефекти се изразяват главно в генерирането от входния трифазен мостов изправител на висши хармоници в тока които при подходящи съотношение между мощността на изправителя и захранващия източник (цеховия трансформатор) реализират и изкривявания в напрежението, които от своя страна заедно с несинусоидалния ток генерират деформационна мощност която по своя характер е неактивна. Това води до понижаване фактора на мощността-k_m и до увеличаване загубите по преноса -$\Delta P_{заг.}$, като зависимостта е следната:

$$\Delta P_{заг.} \approx \frac{1}{k_m^2} \qquad (1)$$

Освен чисто активните загуби на енергия се засилва стареенето на изолационните материали поради факта, че работят при честоти, многократно превишаващи номиналната. Това води до чисто химически процеси на стареене на изолационните материали и допълнителното им нагряване. То е по-високо поради „скин" ефекта в масивни връзки и едножилни кабели с голямо сечение. В резултат са по-големи загубите в магнитните сърцевини на трансформаторите, изчислени за работа при номинална честота.

4. Заключение

- В някои измервани точки се наблюдават несинусоидалност на тока >30% което е характерно за недонатоварени честотопреобразуватели, особено отчитайки факта че по линията има и други потребители. Поради тази причина е добре да се използват преобразуватели с близка мощност до тази на двигателя, а където е възможно вместо тях да се използват устройства за плавен пуск.

- В кондензаторните уредби се препоръчва използването на разстройващи дросели с p=5.67-6% , което извежда резонансната честота на системата на честота 210Hz, която не присъства в мрежата (най-ниската засечена честота на висш хармоник е 250Hz). Необходимо е номиналното напрежение на кондензаторите да е 440V. В линиите, които са с несинусуидалност от около ≤ 10% и не се предвижда включването на нови честотопреобразуватели да се използват кондензаторни батерии за номинално напрежение 440V или такива, предназначени за слабо замърсени мрежи.

- В линиите, които са без разстройващи дросели се препоръчва използването на „cos φ” регулатори с възможност за измерване THD, I,U, които да са с опция за изключване на кондензаторните батерии при повишаване на THD над зададена стойност или при поява на резонансни токове.

Литература

[1] Bose B.K., *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, 2002, pp.711

[2] R. Krishnan, *Electric Motor Drives. Modeling, Analysis, and Control*, Singapore, 2003, ISBN 81-297-0319-1, pp.650

[3] Bose B., *Power Electronics and Motor Drives - Advances and Trends*, Academic press, 2006, pp.915

[4] Marian P. Kazmierkowski, R. Krishnan, Frede Blaabjerg, *Control in Power Electronics*, 2002, Elsevier Science, USA, pp.518

[5] Arrillaga J., B. C. Smith, N.R.Watson, A.R.Wood, *Power System Harmonic Analysis*, John Wiley & Sons, 2000, ISBN 0 471 97548 6

Автори: Пламен Парушев, гл. ас., катедра ЕСЕО, - ТУ-Варна, E-mail address: *pvparushev@abv.bg*; Владимир Чиков, гл. ас. д-р, катедра ЕСЕО, ТУ-Варна, E-mail address: *vladimir_128@abv.bg*; Валентин Гюров, гл. ас. д-р, катедра ЕСЕО, ТУ-Варна, E-mail address: *vgiurov@yahoo.com*; Росен Василев, доц., д-р, катедра ТИЕ, ТУ-Варна, E-mail address: *rsnvasilev@abv.bg*; Никола Македонски, ас., катедра ЕСЕО, ТУ-Варна, E-mail address: *n.makedonski@gmail.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. С. Цветкова

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ В СИНХРОНЕН ТУРБОГЕНЕРАТОР ПРИ НАКЪСО СЪЕДИНЕНИ НАВИВКИ ВЪВ ВЪЗБУДИТЕЛНАТА НАМОТКА

Пламен Ризов, Адриан Иванов

Резюме: *В доклада е описано изследването на не симетрията в синхронен турбогенератор, дължаща се на накъсо съединени навивки в секциите на възбудителната намотка, проведено чрез числено моделиране на магнитното поле посредством метода на крайните елементи. Получени са пространствените функции на изменение на магнитната индукция във въздушната междина и е определено изменението на хармоничния й състав. Получените резултати са приложими при определяне на настройките на защитата от накъсо съединени навивки във възбудителната намотка на турбогенератора.*

Ключови думи: *метод на крайни елементи, синхронни турбогенератор, хармоници на магнитната индукция*

STUDY OF THE MAGNETIC FIELD IN SYNCHRONOUS TURBO GENERATOR AT SHORT-CIRCUITED TURNS IN EXCITATION WINDING

Plamen Rizov, Adrian Ivanov

Abstract: *The report described the study of asymmetry in synchronous turbogenerator, due to the squirrel-cage windings in the sections of the excitation winding, carried out by numerical simulation of the magnetic field using the finite element method (FEM). We received the spatial functions of the change of the magnetic flux in the air gap and defined it`s change of harmonic composition. The obtained results are applicable in determining the settings of the protection of squirrel-cage windings in excitation winding of the turbo generator.*

Key words: *Finite Element Method (FEM), synchronous turbo generator, harmonics of the magnetic induction.*

1. Въведение

Експлоатацията на големите на синхронни турбогенератори изисква постигането на безаварийна работа за дълги периоди от време с цел осигуряване на висока надеждност на електроенергийната система на страната. За тази цел се предприемат най различни мерки за ранно откриване на настъпващи промени в конструкцията на турбогенераторите, които е възможно по време на експлоатация да предизвикат аварийно спиране, което е нежелано както по отношение на

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

самите машини, така и по отношение на енергийната система като цяло. Съществуват повреди в турбогенераторите, при които те могат да продължат да работя известно време без да е необходимо да бъдат спирани. Тези повреди да бъдат локализирани своевременно, с цел при следващото планово спиране да бъдат взети мерки за тяхното отстраняване. Такива са повредите дължащи се на нарушаване на между навивковата изолация на възбудителната намотка на генераторите, в резултат на което се получават една или няколко накъсо съединени навивки. По принцип те могат да бъдат разположени в една или няколко секции на възбудителната намотка. Известно е, какво е влиянието на наличието на накъсо съединени навивки във възбудителната намотка върху работата на синхронния турбогенератор, но е необходимо да се даде количествена оценка на някои от тях. Пред настоящия доклад е поставена задачата да се определи деформацията на магнитното поле във въздушната междина на генератора при наличие на различни съчетания на накъсо съединени навивки във възбудителната намотка и определяне на изменението в хармоничния състав на магнитната индукция. Това изменение ще се отрази и в хармоничния състав и на е.д.н. на турбогенератора. Следователно от изменението на хармоничния състав на магнитната индукция, е възможно косвено да се съди за промяната хармоничния състав на е.д.н.

Познаването на промяната на хармоничния състав на е.д.н. позволява да се разработи защита, която да защищава генераторите от наличие на накъсо съединени навивки във възбудителната намотка. Обикновено тази защита има само сигнализираща функция и не се използва за аварийно изключване на турбогенераторите.

Наличието на накъсо съединени навивки във възбудителната намотка осен до промяна на хармоничния състав води и до появяването на небалансиран електромагнитна сила, която се върти със синхронна честота, в резултат на което както магнитопроводите на ротора и статора, така и лагерите са подложени на силни вибрации. В резултат на тяхното въздействие е възможно да се достигне до разрушаване на конструкцията на турбогенератора. Тези силови въздействия не са обект на изследване на настоящия доклад.

2. Използвани методи за анализ

За определяне на пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина на синхронния турбогенератор е използва метод на числено моделиране на магнитното поле посредством на крайните елементи. За тази цел е използван 2D модел на стационарно магнитно поле.

Хармоничния състав на магнитната индукция е определен посредством FFT анализ на функцията на пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина на синхронния турбогенератор.

3. Обект на изследване

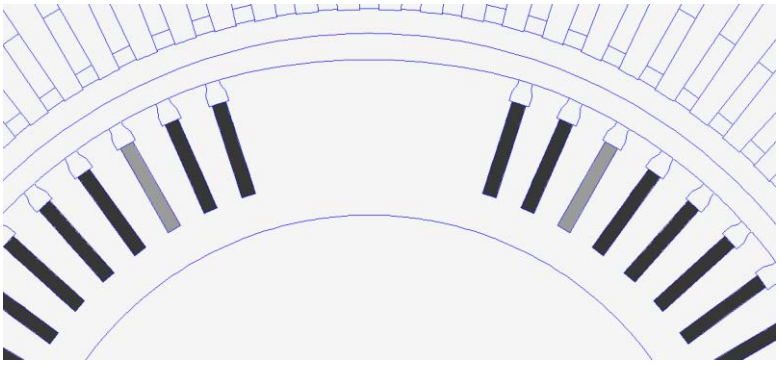
Като обект за изследване е използвани синхронен турбогенератор произведен и експлоатиран в чужбина. Входните данни за изследването са дадени в табл.1.

Табл.1.

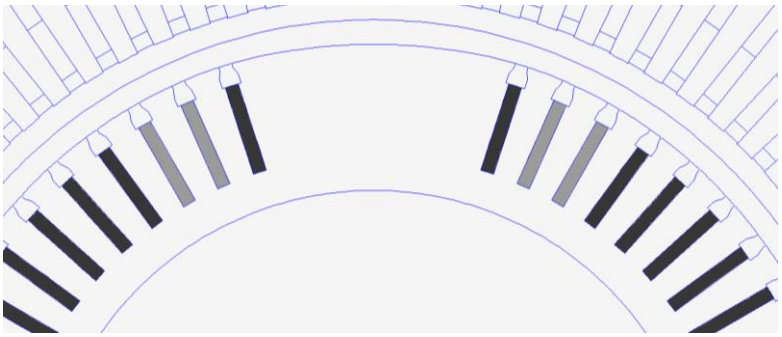
-номинална пълна мощност	MVA	376.5
-номинално напрежение	кV	20
-номинална честота на въртене	min^{-1}	1500
-въздушна междина	mm	70
-аксиална дължина	mm	5363
-външен диаметър на статора	mm	2730
-вътрешен диаметър на статора	mm	1660
-брой на каналите на ротора	-	40
-външен диаметър на ротора	-	1520
-брой навивки в секция на ВН	-	8
-възбудителен ток в номинален режим	A	3700

4. Разработени числени модели

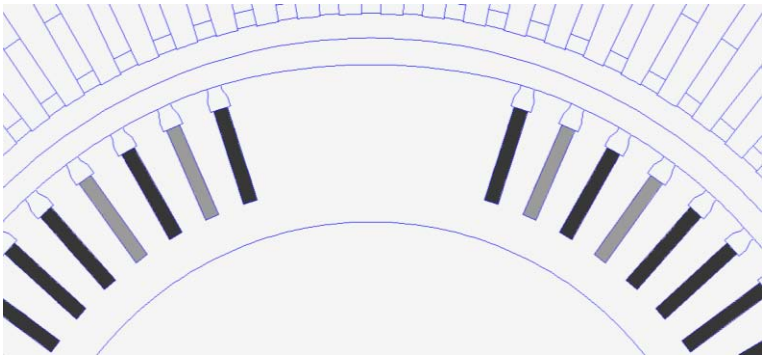
При численото изследване на магнитното поле са разработени модели на синхронния турбогенератор, при които са моделирани накъсо съединени навивки в една секция от възбудителната намотка – фиг.1.



Фиг.1. Модел за числено моделиране седна накъсо съединени навивки във възбудителната намотка в една секция



Фиг.2. Модел за числено моделиране с накъсо съединени навивки във възбудителната намотка в две съседни секции

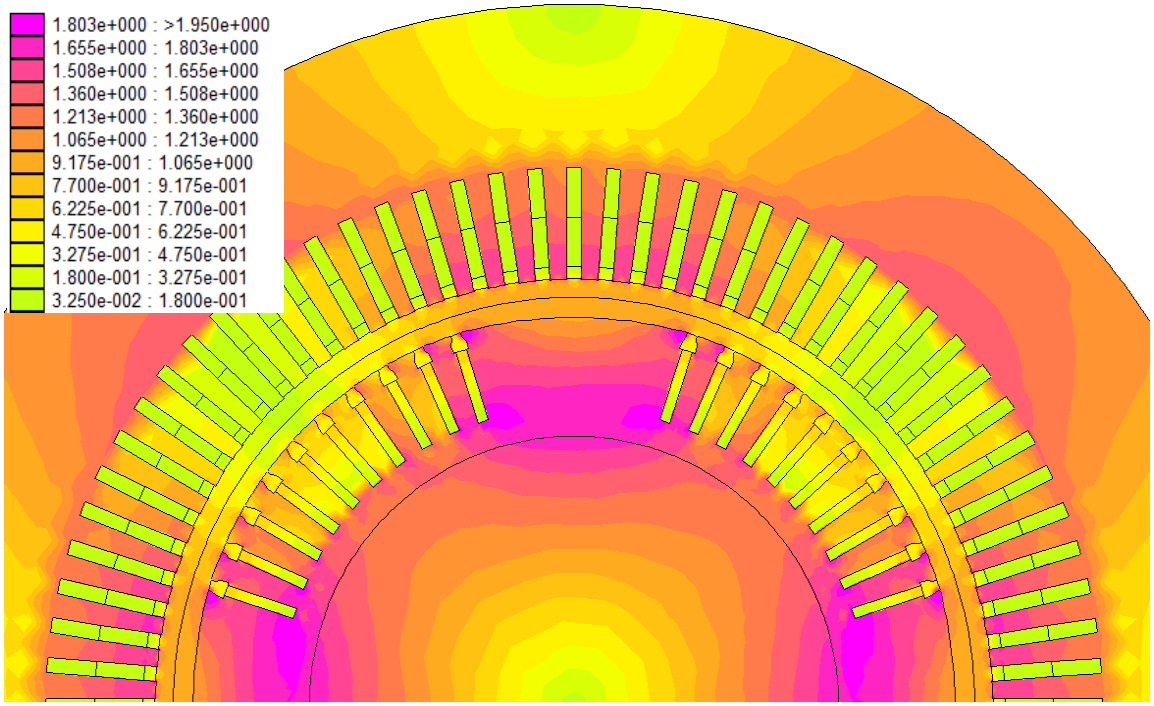


Фиг.3. Модел за числено моделиране с накъсо съединени навивки във възбудителната намотка в две не съседни секции

Направени са изследвания при различен брои накъсо съединените навивки, като по принцип секцията се състои от 8 навивки. Изследвани са случаите, за които накъсосъединените навивки се изменят от 0 до 8. т.е. случаите от напълно изправна секция до накъсо съединяване на всички навивки в секцията. На фиг.2 е показан модела за изследване на магнитното поле при наличие на 1 до 8 навивки накъсосъединени навивки в две съседни секции, а на фиг.3 – наличие на същия брой окъсени навивки в две не съседни секции. Моделирането на окъсените навивки се извършва, посредством намаляване на пълния ток на секцията, което е пропорционално да техния брой в нея.
При разработването на моделите е разгледан синхронен режим на празен ход на турбогенератора. При него в накъсо съединените навивки не се индуктира ток.

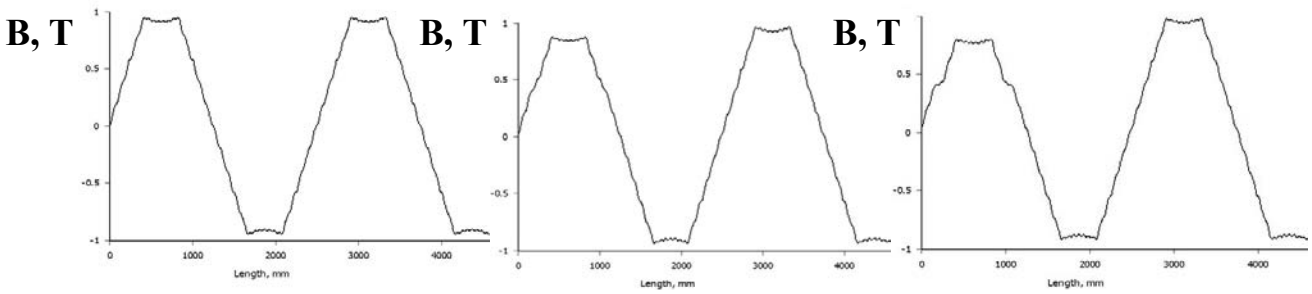
5. Резултати от изследванията

На фиг.4 е показано разпределението на магнитната индукция в напречното сечение на турбогенератора при накъсосъединени навивки в една секция. На фиг. 5 е показано влиянието на накъсосъединените навивки върху пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина. На фиг.5.а е разпределението при отсъствието на накъсосъединени навивки, на фиг. 5б – при наличието на 4, а на фиг.5.в – при 8 накъсосъединени навивки. Ясно се вижда изменението на формата на разпределение на индукцията и намаляването на максималната и стойност както под полюсите.
На фиг.6 са показани аналогични резултати получени от моделиране на магнитното поле в случаите на накъсосъединени навивки в две не съседни секции на възбудителната намотка. На фиг.7 са демонстрирани резултатите при 4 и 8 накъсо съединени навивки в две не съседни секции.
На фиг.7, фиг.8 и фиг.9 е направено сравнение на промяната на формата и стойността на пространственото изменение на магнитната индукция при изменение на броя на накъсосъединените навивки от 0 до 8.



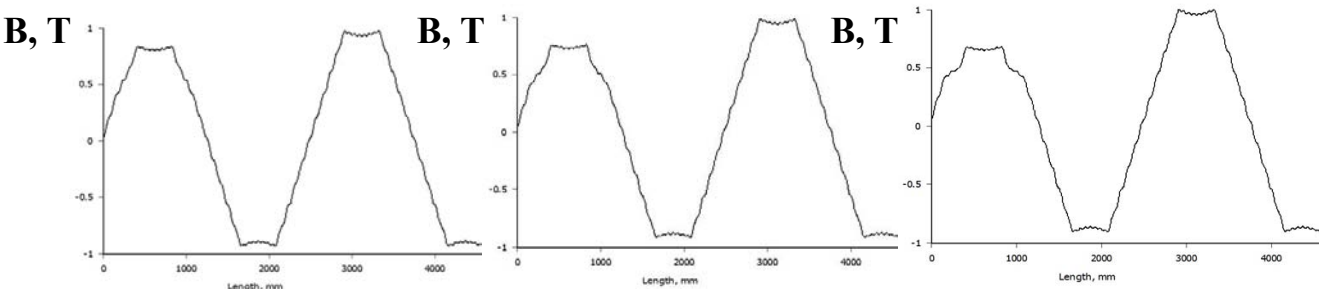
Фиг.4. Разпределение на магнитната индукция във напречно сечения на синхронния турбогенератор

На фиг.11 е представено изменението на хармониците ма магнитната индукция в зависимост от броя на накъсосъединените навивки. Вижда се, че с увеличаване на броя им се засилват хармониците на магнитната индукция с четни номера. Най-силно се увеличава втория хармоник. На фиг.12 е дадена промяната на хармониците при наличие на 8 накъсосъединени навивки спрямо случая при отсъствие на накъсосъединени навивки. Подобни резултати са показана на фиг. 13, 14, 15 и 16 за случаите на накъсосъединени навивки в две съседни и несъседни секции.



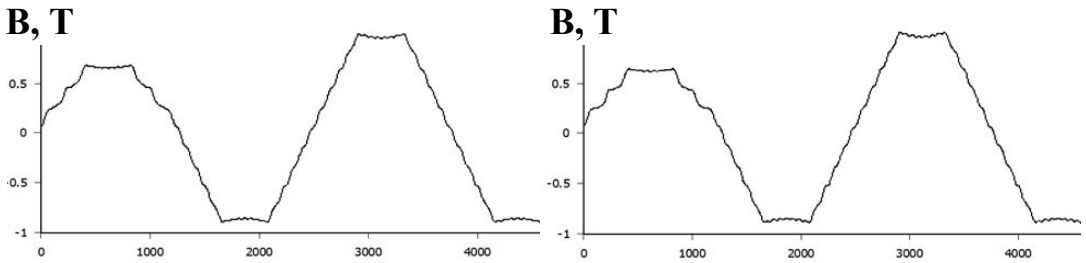
а. б. в.

Фиг.5. Пространствено разпределение на магнитната индукция в въздушната междина на синхронния турбогенератор при отсъствие (а.), при 4 (б.) и 8 (в.) накъсо съединени навивки в една секция на възбудителната намотка



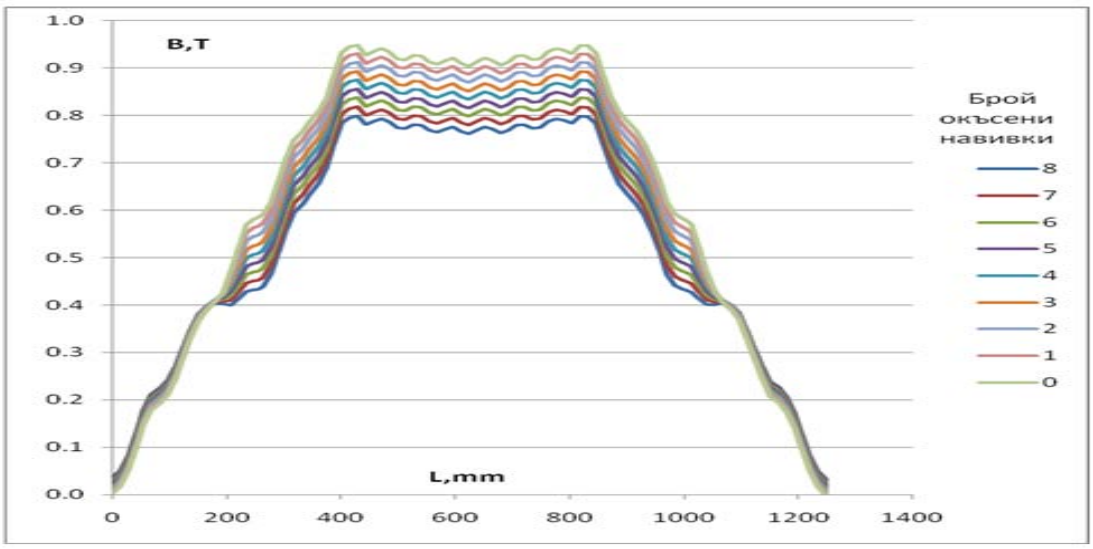
а. б. в.

Фиг.6. Пространствено разпределение на магнитната индукция в въздушната междина на синхронния турбогенератор при отсъствие (а.), при 4 (б.) и 8 (в.) накъсо съединени навивки в две съседни секции на възбудителната намотка

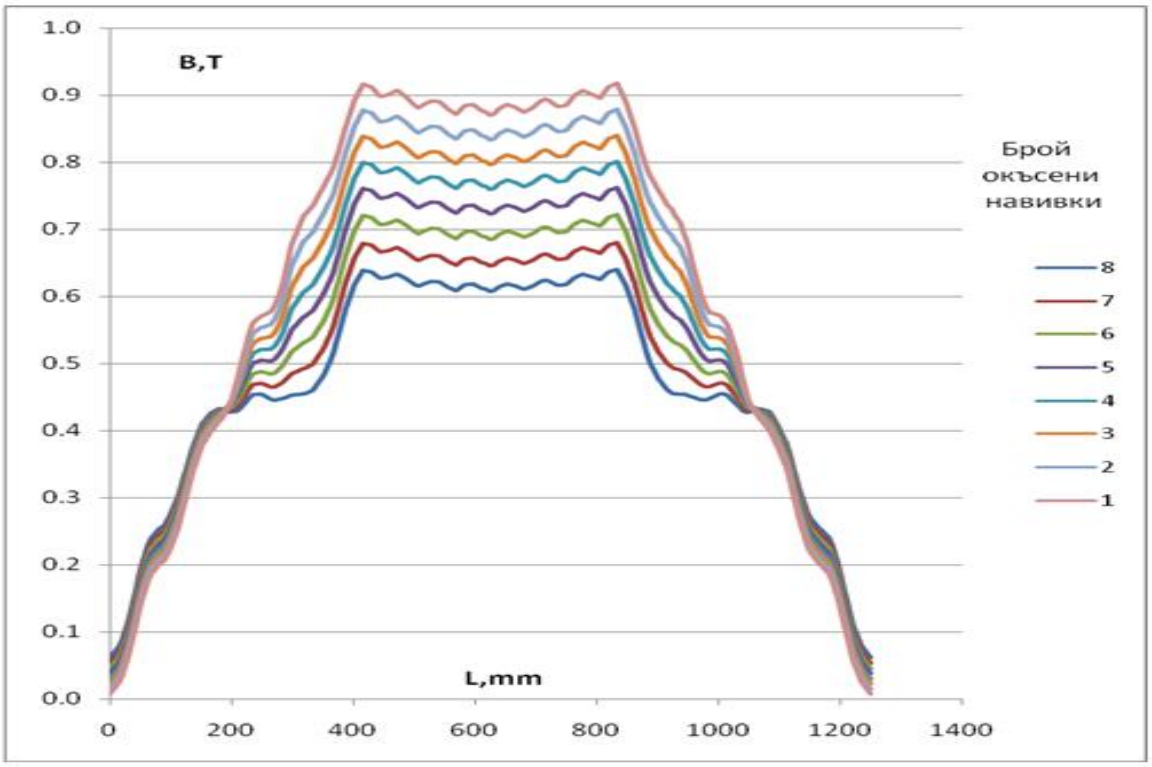


а. б.

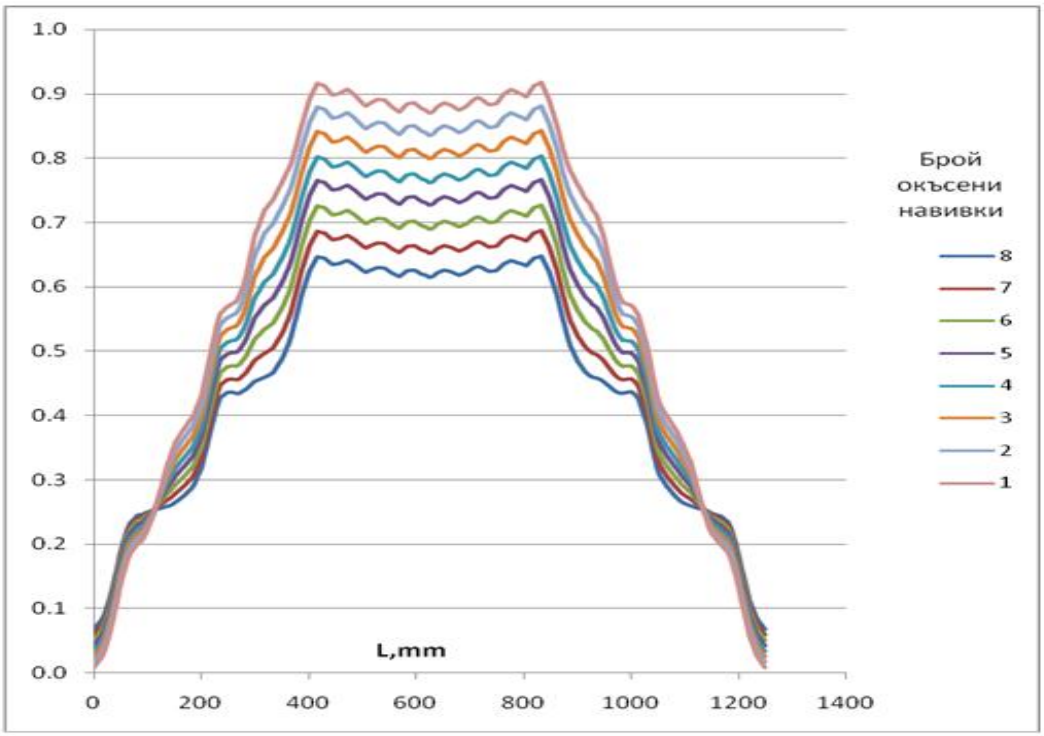
Фиг.7. Пространствено разпределение на магнитната индукция в въздушната междина на синхронния турбогенератор при 4 (б.) и 8 (в.) накъсо съединени навивки в две не съседни секции на възбудителната намотка



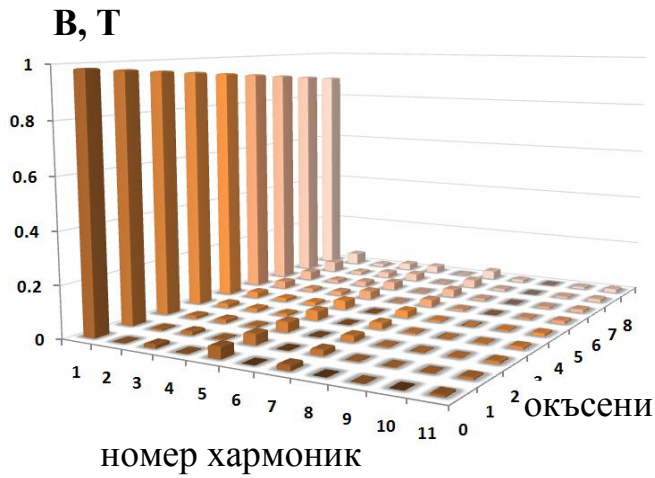
Фиг.8. Сравнение на разпределението на магнитната индукция в въздушната междина при изменение на накъсосъединени навивки от 0 до 8 в една секция



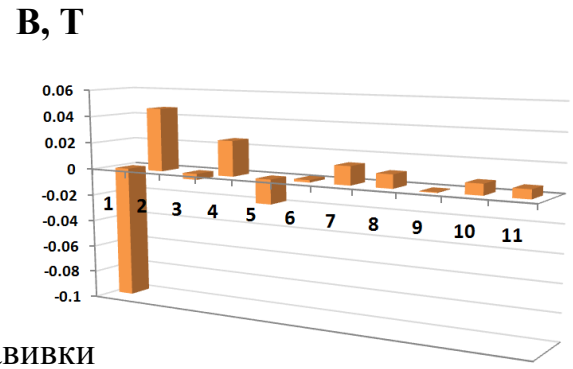
Фиг.9. Сравнение на пространствено разпределение на магнитната индукция в въздушната междина при изменение на накъсосъединени навивки от 0 до 8 в две съседни секции



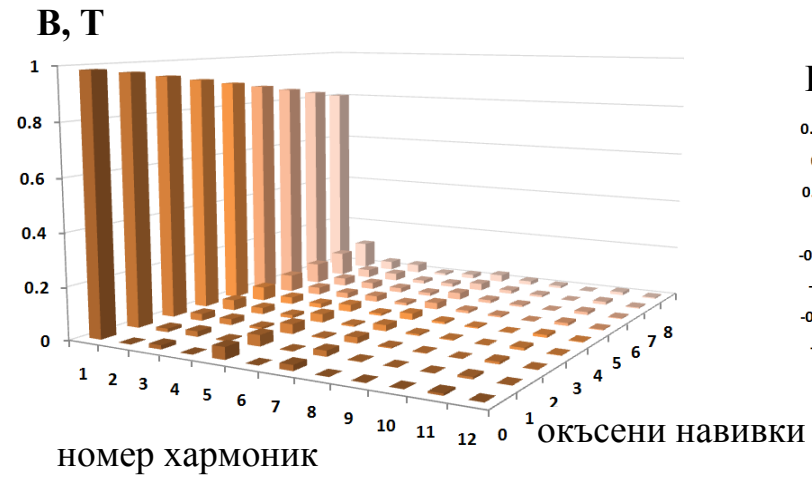
Фиг.10. Сравнение на пространствено разпределение на магнитната индукция в въздушната междина при изменение на накъсосъединени навивки от 0 до 8 в две не съседни секции



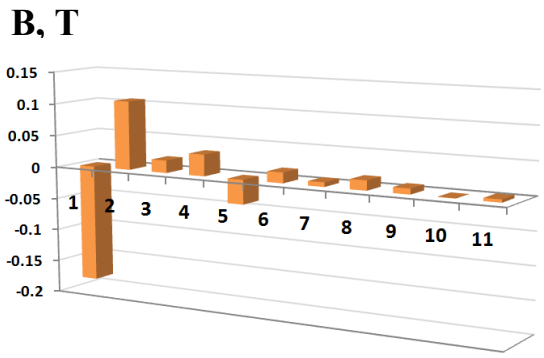
Фиг.11. Хармоничен състав при накъсо съединени навивки в една секция на възбудителната намотка



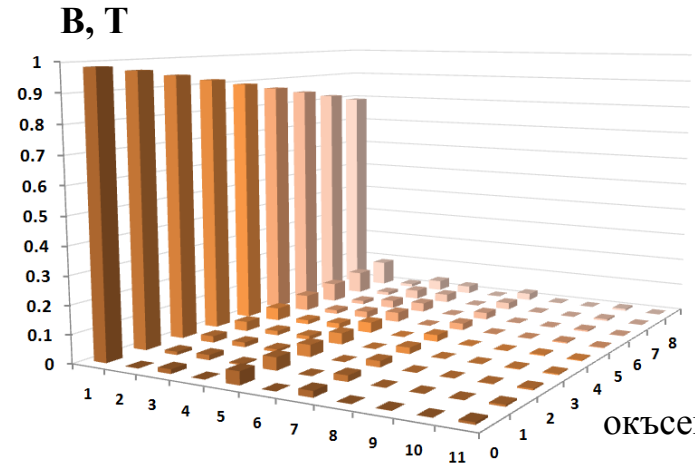
Фиг.12. Изменение на хармониците на магнитната индукция при 8 окъсени навивки в една секция



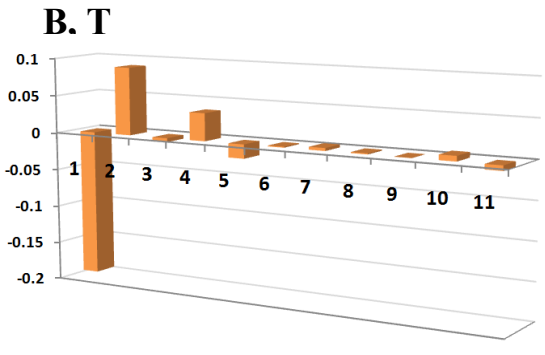
Фиг.13. Хармоничен състав при накъсо съединени навивки в две съседни секции на възб. намотка



Фиг.14. Изменение на хармониците на магнитната индукция при 8 окъсени навивки в две съседни секции



Фиг.15. Хармоничен състав при накъсо съединени навивки в две не съседни секции на възбудителната намотка



Фиг.16. Изменение на хармониците на магнитната индукция при 8 окъсени навивки в две не съседни секции

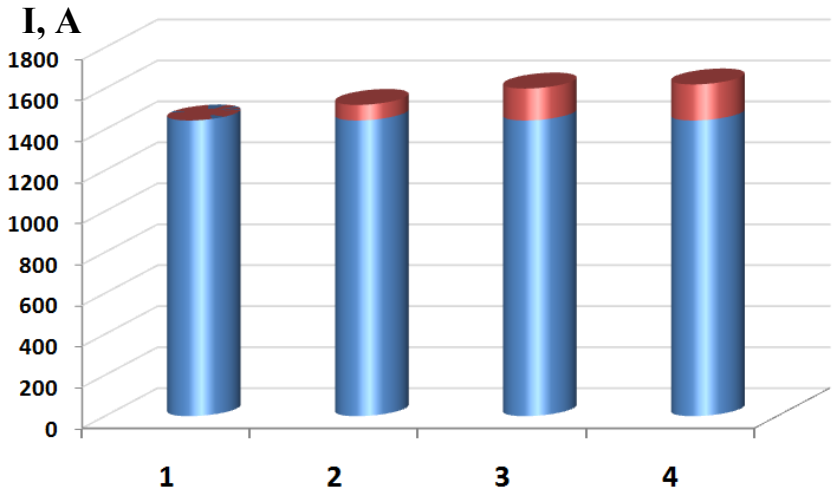
6. Компенсиране на магнитния поток

Наличието накъсо съединени навивки във възбудителната намотка води до намаляване на м.д.н. на полюсите, в които са те разположени, в резултат на което намалява общия магнитен поток във въздушната междина. Компенсирането на потока се осъществява посредством увеличаване на възбудителния ток. Критерии за необходимото увеличаване на възбудителния ток е получаване на поток равен на потока при отсъствието на накъсосъединени навивки.

Моделите за числено моделиране при 8 накъсо съединени навивки са използвани за определяне на необходимото увеличаване на възбудителния ток с цел компенсиране на намаляването на магнитния поток. За тази цел, итеративно на няколко стъпки в моделите се изменя токовата плътност във възбудителна намотка, докато се получи поток равен на потока при отсъствие на накъсосъединени навивки. Резултатите от моделирането на компенсирането на намаляването на магнитния поток са показани в табл.2. Графичното представяне на стойностите на възбудителния ток и неговата част за компенсация на магнитния поток са показани на фиг.17.

Табл.2.

Възбудителен ток и токова плътност в моделите	I	J	%
	A	A/mm^2	-
Без окъсени навивки във възбудителната намотка	1444	3.75	
С окъсени навивки в една секция	1520	3.95	5.26
С окъсени навивки в две съседни секции	1600	4.15	10.8
С окъсени навивки в две не съседни секции	1620	4.21	12.2



Фиг.17. Стойности на възбудителния ток и неговата част за компенсация на магнитния поток

1- без накъсо съединени навивки

2- с 8 накъсосъединени навивки в една секция

3- с 8 накъсосъединени навивки в две съседни секции

4- с 8 накъсосъединени навивки в две не съседни секции

7. Анализ и изводи

1. Наличието на накъсо съединени навивки води до намаляване на магнитния поток за съответния полюс, което внася не симетрия в магнитното поле във въздушната междина.
2. В следствие на накъсо съединените навивки се изменя хармоничния състав на магнитната индукция във въздушната междина, като се засилва присъствието на хармоници с четни номера.
3. Наличието на накъсо съединени навивки води до намаляване на магнитния поток на турбогенератора, което изисква от своя страна увеличаване на възбудителния ток с цел компенсиране на това намаление. Като компенсирането е в граници от 5% до 12% в зависимост от случая.
4. В случаите на компенсация на магнитния поток не се постига отстраняване на хармониците с четни номера на магнитната индукция.

Литература

[1] Ангел М. Ангелов Димитър. А. Димитров, Електрически машини II част, ДИ «Техника», София, 1988

[2] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual

[3] Dimitar K. Sotirov, Plamen M. Rizov, Ivailo Panaytov, Dimitar Bozov, Boyan Krachev, Study of harmonics spectrum in wave form of magnetic induction in air gap and EMF of the synchronous hydrogenerators, SIELA 2009 Burgas, 4-6 June, Volume I, pp.262-271

[4] Пламен Ризов, Димитър Сотиров, Ангел Бахчевански, „Приложение на МКЕ за изследване на механичното натоварване върху роторните клинове при неявнополюсни синхронни генератори", IV Научна конференция ЕФ2012 – Созопол 28.09-01.10 2012, Том 2, pp. 229-238

[5] Ангел Бахчевански, Пламен Ризов, Димитър Сотиров, "Положение на МКЕ при проектирането на неявнополюсни синхронни хидрогенератори", IV Научна конференция ЕФ2012 – Созопол 28.09-01.10 2012, Том 2, pp. 329-339

Автори: Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg;* Адриан Иванов, гл. ас. д-р инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *apiv@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Димитър К. Сотиров

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА СКОСЯВАНЕТО НА СТАТОРНИТЕ КАНАЛА ВЪРХУ ХАРМОНИЧНИЯ СЪСТАВ НА ИНДУКЦИЯТА ВЪВ ВЪЗДУШНАТА МЕЖДИНА В СИНХРОНЕН ХИДРОГЕНЕРАТОР

Пламен Ризов, Адриан Иванов

Резюме: *Настоящият доклад е посветен на изследване на хармоничния състав на магнитната индукция във въздушната междина при необходимост от скосяване на статорните канали на синхронни хидрогенератори различно от това което се препоръчва в класическите методи за проектиране. За целта се използват 2D моделиране не магнитното поле на генератора, чрез метода на крайните модели.*

Ключови думи: *метод на крайни елементи, синхронни хидрогенератори, хармоници на магнитната индукция*

STUDY OF THE INFLUENCE OF CHAMFERING OF STATOR CHANNELS ONTO HARMONIC COMPOSITION OF INDUCTION IN THE AIR-GAP OF A SYNCHRONOUS HYDROGENERATOR

Plamen Rizov, Adrian Ivanov

Abstract: *This report is dedicated to the study of the harmonic composition of the magnetic induction in the air gap when there is a need of chamfering of the stator channels of synchronous hydro generators different than these recommended in the classical design methods. For this purpose we are using 2D modeling of magnetic field of the generator by using FEMM model.*

Key words: *FEEM model, synchronous hydro generators, harmonics of the magnetic flux.*

1. Въведение

Производството на въртящи се променливотокови електрически машини със скосени канали изисква изработване на допълнително оборудване и инструменти за формоване на секциите на статорната намотка. Машините с голяма мощност, каквито са повечето синхронни хидрогенератори, обикновено се произвеждат в единични бройки, което налага проектирането и изработването на индивидуално оборудване за тази цел. От една страна това води до удължава времето за производство на хидрогенераторите, а от друга изисква допълнителни разходи за материали и труд.

Възможно е да се използва едно и също оборудване за формоване на статорните секции при скосени канали за различни синхрони хидрогенератори ако се докаже, че наличието на висши хармоници в е.д.н. не надхвърля допустимите

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

стойности съгласно действащите в България стандарти.
Целта на настоящото изследване е определяне на граничните стойности на възможното отклонение на ъгъла на скосяван на статорните канали от препоръчителните стойности, използвани при класическото проектиране, което да позволи използването на едно и също формовъчно оборудване на оформяне на активните страни на статорните секции на различни хидрогенератори. За тази цел те ще се проектират с един същи ъгъл на скосяване, което ще доведе до не пълно потискане на зъбните хармоници при някои от тях. Като критерии за приложимост ще бъде съответствието на хармоничния състав съгласно стандарт

2. Обект на изследване

Като обект за изследване е използвания синхронен хидрогенератор произведен в България и въведен в експлоатация в чужбина. Входните данни за изследването са дадени в табл.1.

Табл.1

-номинална пълна мощност	кVA	630
-номинално напрежение	кV	0.4
-номинална честота на въртене	min^{-1}	750
-въздушна междина	мм	3.5
-аксиална дължина	мм	710
-външен диаметър на статора	мм	850
-вътрешен диаметър на статора	мм	665
-брой на статорните канали	-	96
-брой на навивките на ВН	-	117
-височина на статорен канал	мм	40
-широчина на статорен канал	мм	11

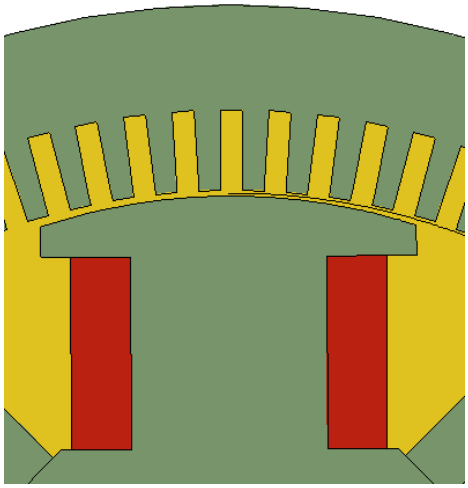
3. Използвани методи за анализ

За определяне на пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина на синхронния хидрогенератор е използва метода на числено моделиране на магнитното поле посредством на крайните елементи. За тази цел е използван 2D модел на стационарно магнитно поле. Хармоничния състав на магнитната индукция е определен посредством FFT анализ на функцията на пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина на синхронния хидрогенератор.

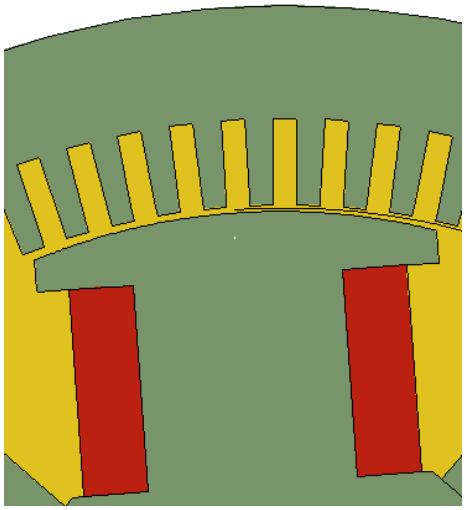
3. 2D стационарни модели

За провеждане на изследването е разработен един основен стационарен модел на синхронен хидрогенератор в режим на празен ход. Базовият модел се отнася за челното сечение на активната част на машината. Най-задното сечение на хидрогенератора е завъртяно спрямо челното на ъгъл едно канално деление. От базовия модел се получават моделите за моделиране на магнитното поле в междинни сечения. разположение по протежение на аксиалната дължина. Те са равно отдалечени едно от друго. В тях роторът е завъртян спрямо статора на ъгъл, големината на които зависи от местоположението на разглежданото сечение спрямо челното такова, т.е. съществува зависимост между положението разглежданото сечение и ъгъла на завъртане. Фиг.1 и фиг.2 показват моделите за

изследване на магнитното поле в челното и най- задното сечение.
Разработени са модели за три варианта на скосяване на статорните канали. При първия вариант, скосяването е направено съгласно възприетия начин на скосяване на статорните канали $\alpha_c = \alpha_к$. При вторият $\alpha_c = 0.75\alpha_к$ и третия – $\alpha_c = 1.25\alpha_к$. За всеки вариант са разгледани голям брой сечения. За всяко от тях е получено пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина под два съседни полюса, което представлява периода на изменение на пространственото изменение на магнитната индукция в разглежданото сечение.



Фиг.1. Взаимно разположение на роторния полюс спрямо статора в челно сечение



Фиг.2. Взаимно разположение на роторния полюс спрямо статора в най-задното сечение

Фиг.1. Взаимно разположение на роторния полюс спрямо статора в челно сечение

Фиг.1. Взаимно разположение на роторния полюс спрямо статора в челно сечение

Фиг.2. Взаимно разположение на роторния полюс спрямо статора в най-задното сечение

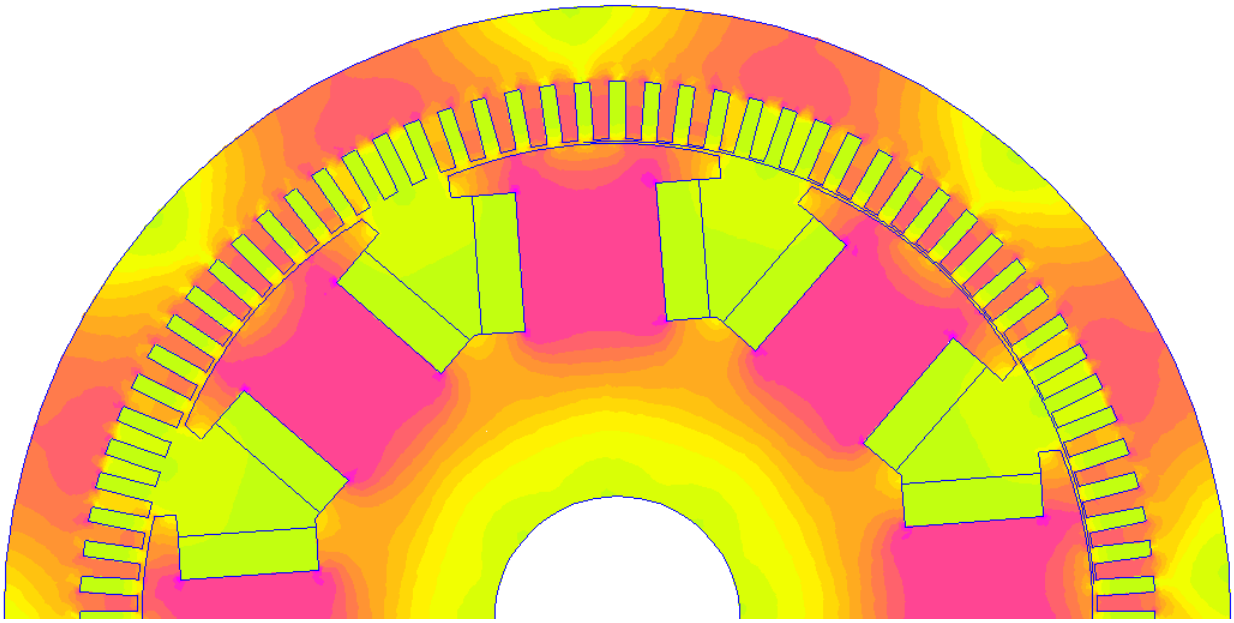
Фиг.2. Взаимно разположение на роторния полюс спрямо статора в най-задното сечение

На база на получените разпределения за магнитната индукция, за всеки вариант, е определена еквивалентната кривата на разпределение на магнитната във въздушната междина, като средна стойност на пространствените дискретни стойности на магнитната индукция, определени от съответните пространствени криви в разглежданите сечения. След това е определен хармоничния състав на магнитната индукция, както на магнитната индукция в различени сечения във въздушната междина, така и на еквивалентната крива посредством на FFT алгоритъм за анализ, разработени в средата на Matlab/SIMULINK.

На фиг. 3. е показано разпределението на магнитното поле в едно от сеченията на разглеждания хидрогенератор за варианта при $\alpha_c = \alpha_к$. Подобни резултати са получени за всички останали сечения от този вариант. От тях е получено квази 3D пространственото разпределение на магнитната индукция, което е показано на фиг.4.

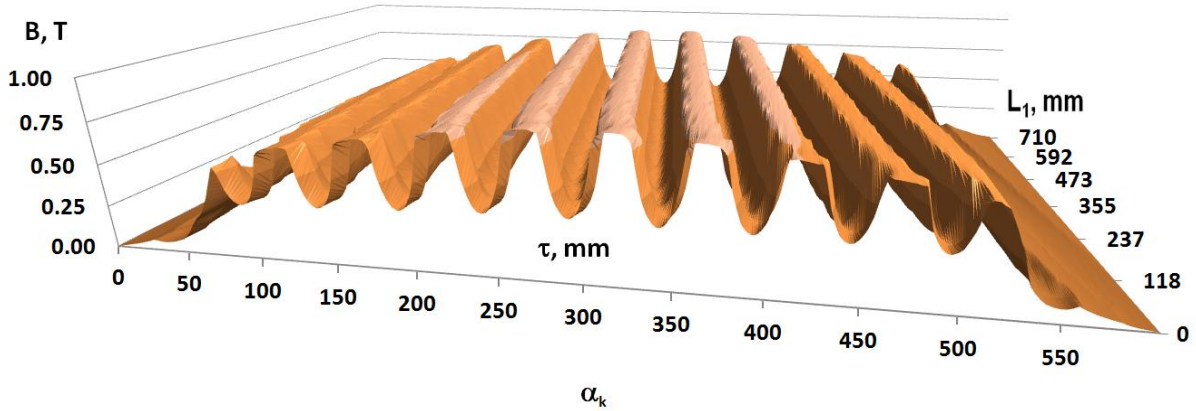
Аналогични резултати са получени за вариантите при които $\alpha_c = 0.75\alpha_к$ и $\alpha_c = 1.25\alpha_к$. На фиг.13 и фиг.14 са показни съответните квази 3D пространствените разпределения на магнитната индукция за горе посочените варианти.

4. Резултати от изследванията



Фиг.3. Разпределение на магнитната индукция във напречно сечения на синхронния хидрогенератор

Фиг.3. Разпределение на магнитната индукция във напречно



Фиг.4. Квази 3D пространствено разпределение на магнитната индукция във въздушната междина при $\alpha_c = \alpha_к$

Фиг.4. Квази 3D пространствено разпределение на магнитната индукция във въздушната междина при $\alpha_c = \alpha_к$

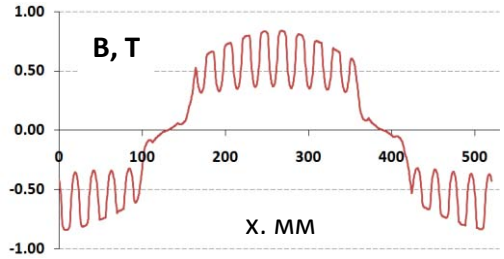
За всички изследвани сечения са определени пространствените 2D разпределения на магнитната индукция по контур преминаващ по средата на минималната въздушна междина. За варианта, при който $\alpha_c = \alpha_к$ са показани три пространствени разпределения от този вид, показни на фиг. 5, фиг.6 и фиг. 7 съответно за челното, едно от сеченията в средата и задното сечение на синхронния хидрогенератор. Общият брой на изследваните сечения в този вариант е 26, като ъгловото отместване на едно сечение спрямо друго е 0.15 градуса.

При втория вариант са разгледани 21 сечения, при които ъгловото отместване е 0.14 градуса. На фиг.9, фиг.10 и фиг.11 са показни аналогичните на първи вариант пространствени разпределения на магнитната индукция.

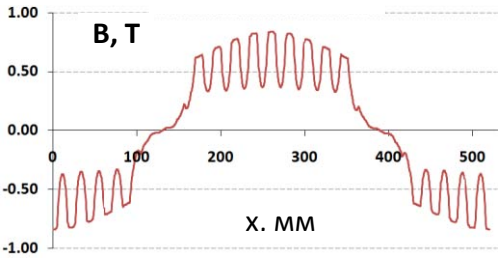
При третия вариант са разгледани 30 сечения, като ъгъла е 0.16 градуса.

Пространствените разпределения в средната линия на въздушната междина за всички варианти са получени и в цифров вид. Това позволява за всеки от тях да бъде определено еквивалентното пространствено разпределение на магнитната

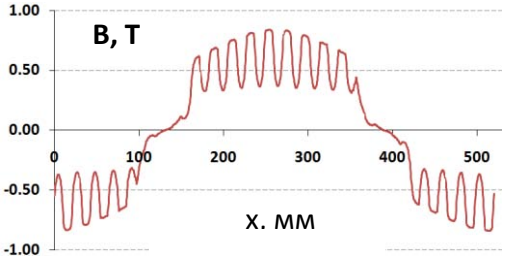
индукция във въздушната междина с отчитане на скосяването на статорните канали.



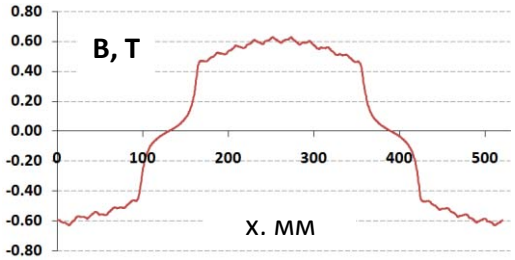
Фиг.5



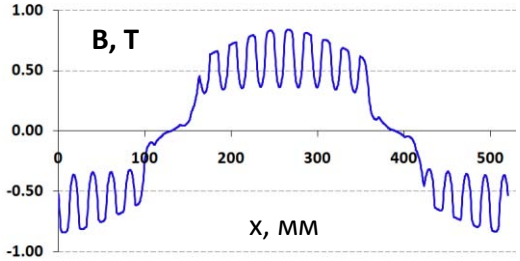
Фиг.6



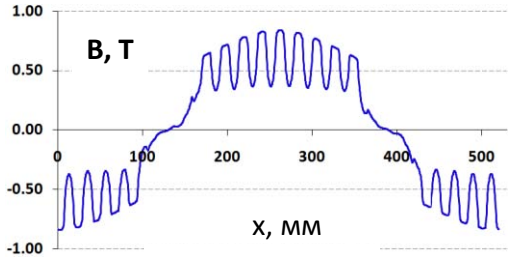
Фиг.7



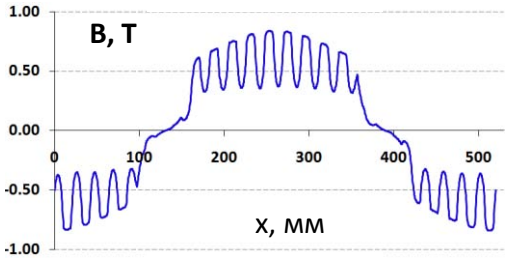
Фиг.8



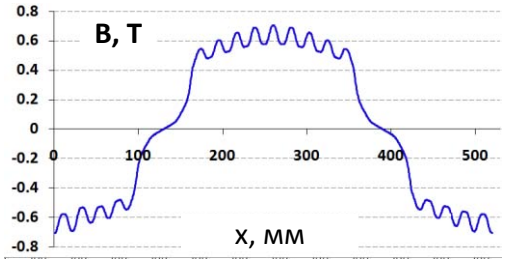
Фиг.9



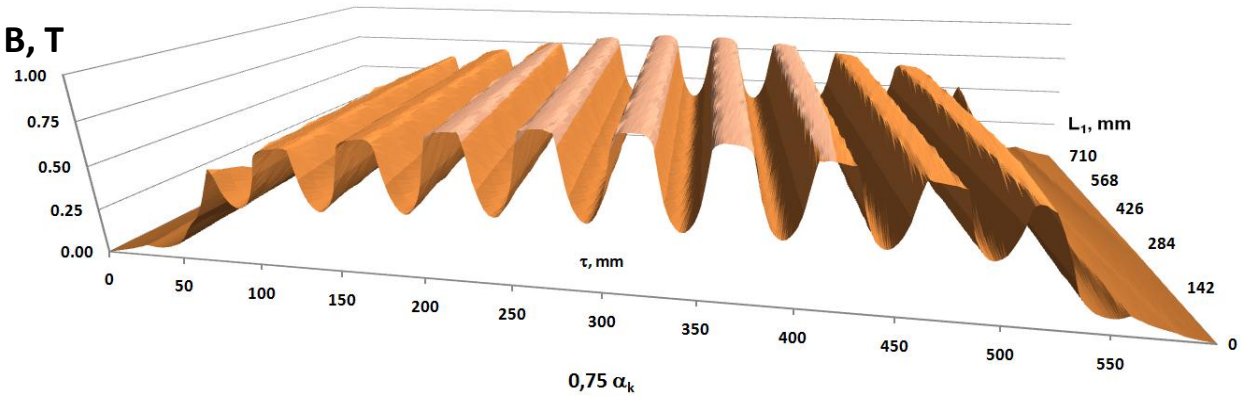
Фиг.10



Фиг.11



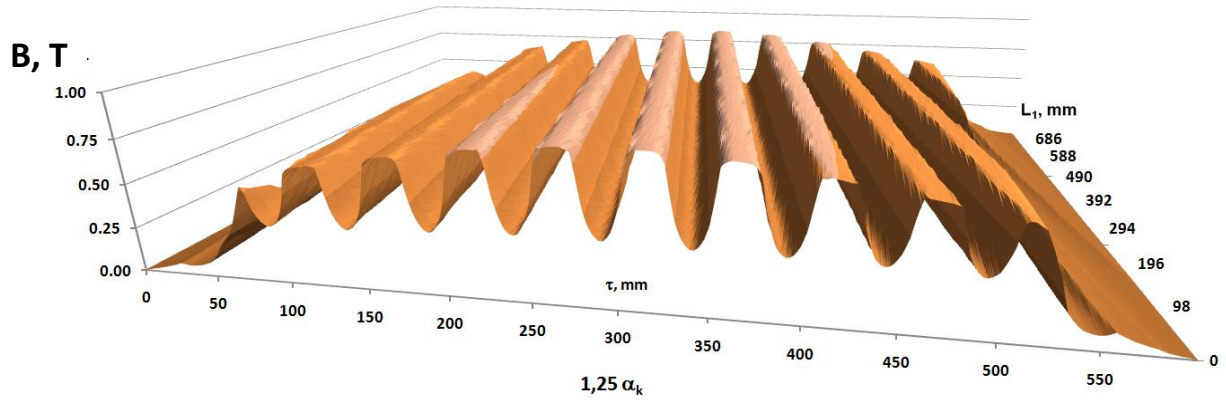
Фиг.12



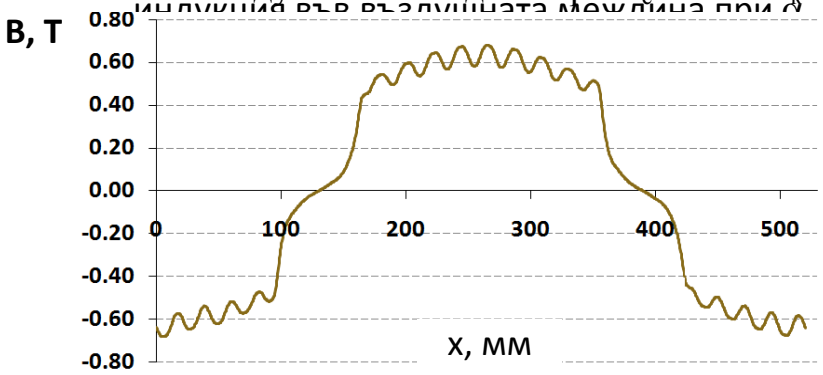
Фиг.13 Квази 3D пространствено разпределение на магнитната индукция във въздушната междина при $\alpha_c = 0.75.\alpha_к$

Фиг.13 Квази 3D пространствено разпределение на магнитната индукция във въздушната междина при $\alpha_c = 0.75.\alpha_к$

Всяко от получените пространствени разпределение може да се разгледа като пространствена функция, която е представена с 6600 числени стойности, разположени по средната линия във въздушната междина. От множеството функции за всеки вариант се определя средната стойност на магнитната индукция за всяка поредна цифрова стойност в тях. В резултат се получават еквивалентните пространствени функции на разпределение на магнитната индукция във въздушната междина, показани съответно на фиг.8, фиг.12 и фиг.15.



Фиг.14. Квази 3D пространствено разпределение на магнитната индукция във въздушната междина при $\alpha_c = 1.75.\alpha_к$



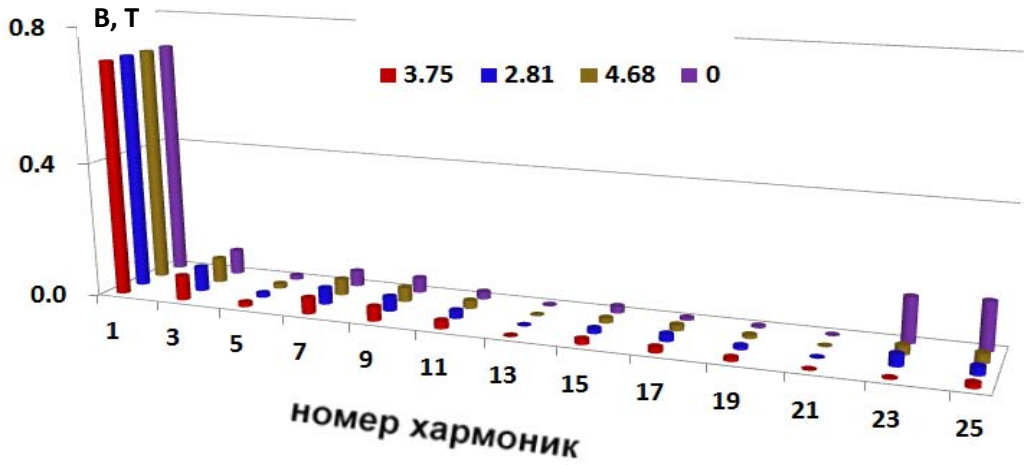
Фиг.15. Еквивалентно пространствено разпределение на магнитна индукция при $\alpha_c = 1.75.\alpha_к$

Определен е хармоничния състав, както на пространствените разпределения на магнитната индукция във всички разглеждани сечения за всички варианти, така и на еквивалентните функции на пространствено разпределение на магнитната индукция. посредством FFT (*Fast Fourier transform*). За тази цел е разработен алгоритъм, използващ библиотеките на средата на Matlab/SIMULINK.

На фиг.16 е направено сравнение между съдържанието на хармоници в пространственото разпределение на магнитната индукция за разглежданите варианти, като те са сравнени с хармониците в случай когато няма скосяване на статорните канали. Хармониците дължащи се на отворените статорни канали са с номера 23 и 25. Те са с най-ниска стойност при $\alpha_c = \alpha_к = 3.75$ градуса. Малко по-големи са за варианта $\alpha_c = 1.75.\alpha_к = 4.68$ градуса. На фиг.17 е направено по-подробно сравнение между стойностите на хармониците, дължащи се на назъбването на статора на хидрогенератора.

Изчислени са процентните съотношения на зъбните хармоници спрямо основ-

ния хармоник на магнитната индукция за всички разглеждани варианти, като резултатите са показан в табл.2. Определена е ”средната тежест” на зъбните хармоници спрямо основния, като резултатите са показани в последния ред от таблицата.



Фиг.16. Хармоничен състав на магнитната индукция във въздушната междина при скосяване на статорните канали

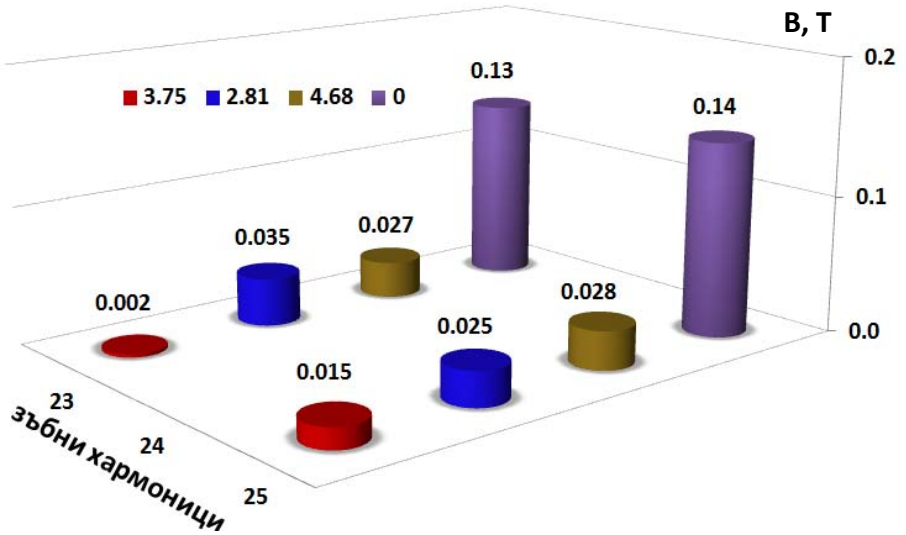
Фиг.16. Хармоничен състав на магнитната индукция във въздушната междина при скосяване на статорните канали

$\alpha_{c1} = \alpha_c = \alpha_к = 3.75$ град. $\alpha_{c2} = 0.75\alpha_к = 2.81$ град.

$\alpha_{c3} = 1.25\alpha_к = 4.68$ град $\alpha_{c4} = 0$ град.

Табл.2.

зъбен хармоник.	α_c=0	$\alpha_c = \alpha_к$	α_c = 0,75. $\alpha_к$	α_c = 1,75.$\alpha_к$
23, %	19,0	0,3	5,0	3,8
25, %	20,3	2,1	3,6	4,0
средно	19,7	1,2	4,3	3,9



Фиг.17. Стойности на хармониците на магнитната индукция, дължащи се на назъбването на статора

Фиг.17. Стойности на хармониците на магнитната индукция, дължащи се на назъбването на статора

5. Анализ и изводи

1. Резултатите получени вследствие на проведените изследвания дават основание да се направи извода, че скосяването при статорните канали е възможно да се извършва в граници от $0.75\alpha_к$ до $1.25\alpha_к$ без това да се отрази съществено върху нарастване на зъбните хармоници на магнитната индукция.
2. Използването на ъгли на скосяване близъки до $\alpha_к$ позволява да се намали оборудването, използвано при формоване на статорните секции както на синхронните машини – в частност при синхронните хидрогенератори, така и при асинхронните машини.

Литература

[1] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual

[2] Dimitar K. Sotirov, Plamen M. Rizov, Ivailo Panaytov, Dimitar Bozov, Boyan Krachev, Study of harmonics spectrum in wave form of magnetic induction in air gap and EMF of the synchronous hydrogenerators, SIELA 2009 Burgas, 4-6 June, Volume I, pp.262-271.

[3] Ангел Бахчевански, Пламен Ризов, Димитър Сотиров, "Положение на МКЕ при проектирането на неявнополюсни синхронни хидрогенератори", IV Научна конференция ЕФ2012 – Созопол 28.09-01.10 2012, Том 2, pp. 329-339.

Автори: Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg;* Адриан Иванов, гл. ас. д-р инж., катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *apiv@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Димитър К. Сотиров

СЪОТНОШЕНИЕ МЕЖДУ НАПРЕЖЕНИЯТА ПРИ КЪСО СЪЕДИНЕНИЕ В ПЪРВИЧНИТЕ НАМОТКИ НА НАПРЕЖЕНОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Пламен Ризов, Станимир Вичев

Резюме: *Доказва се възможността от появата на напрежение с нулева последователност на входа на цифровите защити на синхронен генератор при късо съединение в първичните намотки на напреженовите трансформатори на изводите му. Стига се до излишно изключване на генератора. Явлението е изучено чрез анализ на записите на цифровите защити и провеждане на физическо моделиране в лабораторни условия. Резултатите съвпадат. Построени са векторни диаграми на напреженията. Доказва се, че причината е в изолационните характеристики на напреженовите трансформатори.*

Ключови думи*: генераторни защити, напреженови трансформатори, късо съединени навивки, фазно напрежение, напрежение на неутралата, напрежение на нулева последователност, физически модел.*

SHORT CIRCUIT VOLTAGES CORRELATION IN VOLTAGE TRANSFORMER PRIMARY WINDINGS

Plamen Risov, Stanimir Vichev

Abstract: *In the work there is a proof of the appearance of zero sequence voltage at the input of digital protections when there is a short circuit on the primary windings of the voltage transformers on its output. This leads to a useless switch-off of the transformer. The event has been investigated through analysing the digital protection records and realizing a physical model in laboratory conditions. The results match. Vector diagrams of the voltage have been produced. It is proven, that the cause is in the isolation characteristics of the voltage transformers.*

Keywords: *generator protection, voltage transformer, short circuit on the primary windings, phase voltage, neutral voltage, zero sequence voltage, physical model*

1. Въведение

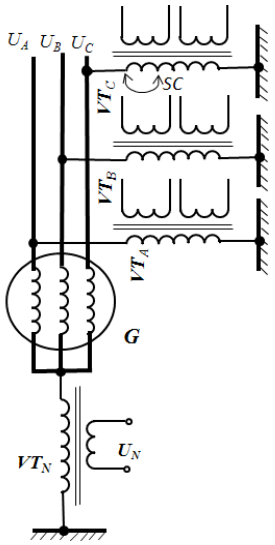
В материала се разглежда случай на излишно, от гледна точка на състоянието но генератора, заработване на земна статорна защита при късо съединение (к.с.) в първичната намотка на измервателен напреженов трансформатор (НТ). Изискванията към измерителните НТ са дефинирани в европейски стандарт IEC 60044-2. Същите изисквания се съдържат и в българския стандарт БДС EN

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

60044-2:2001**.** Няма съществени различия и със съдържанието на ГОСТ. Изискванията в нормативните документи са високи, но въпреки това, макар и относително рядко, се констатират дефекти в НТ, които могат да предизвикат излишно заработване на релейните защити, например на големи синхронни генератори.

При нормален режим (фиг.1) неутралата на генератора и неутралата на напреженовите трансформатори имат нулев потенциал. При несиметрия в първичните намотки на НТ (***VT***) неутралата на генератора (***VT***$_{\mathrm{N}}$) получава потенциал спрямо „земя“ и се създават условия за заработване на защитите, реагиращи на напрежението на неутралата ***U***$_{\mathrm{N}}$. Разглежданият случай се отнася за конкретен генератор, за който се разполага и със записи на реално събитие в цифровите му релейни защити.



Фиг.1. Режими на заземяване на неутралата на генератор и напреженовите трансформатори на изводите му

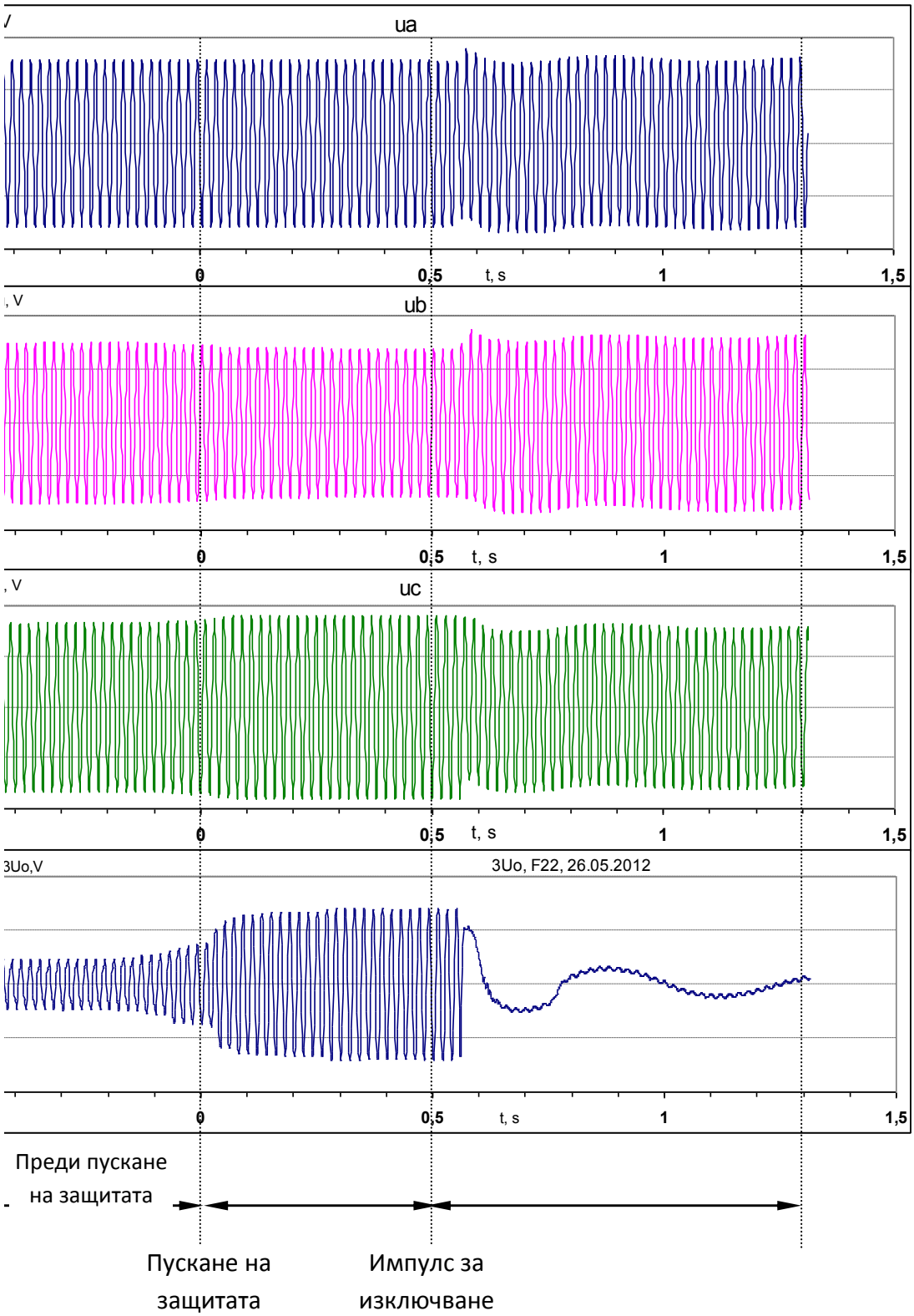
Фиг.1. Режими на заземяване на неутралата на генератор и напреженовите трансформатори на

2. Записи от реален случай на късо съединение в първичната намотка на еднофазен напреженов трансформатор

На фиг.2 е показан реален запис на напреженията на трите фази и на неутралата на голям синхронен генератор, който изключва от действието на земната статорна защита. Съотношението на напреженията е следното. Неутралата на напреженовите измервателни трансформатори е заземена в първичната и вторичната страна (фиг.1). Неутралата на генератора е изолирана. В същност, в нея е включен напреженов измервателен трансформатор с много голямо съпротивление.

И двете неутрали имат нулев или незначителен потенциал, когато веригите са в изправност. Това се вижда от началните данни на фиг.2. При несиметрия в съпротивлението на първичната намотка на НТ и симетрични генераторни напрежения във вторичните намотки на НТ се появяват разлики, които причиняват заработване на земните статорни защити.

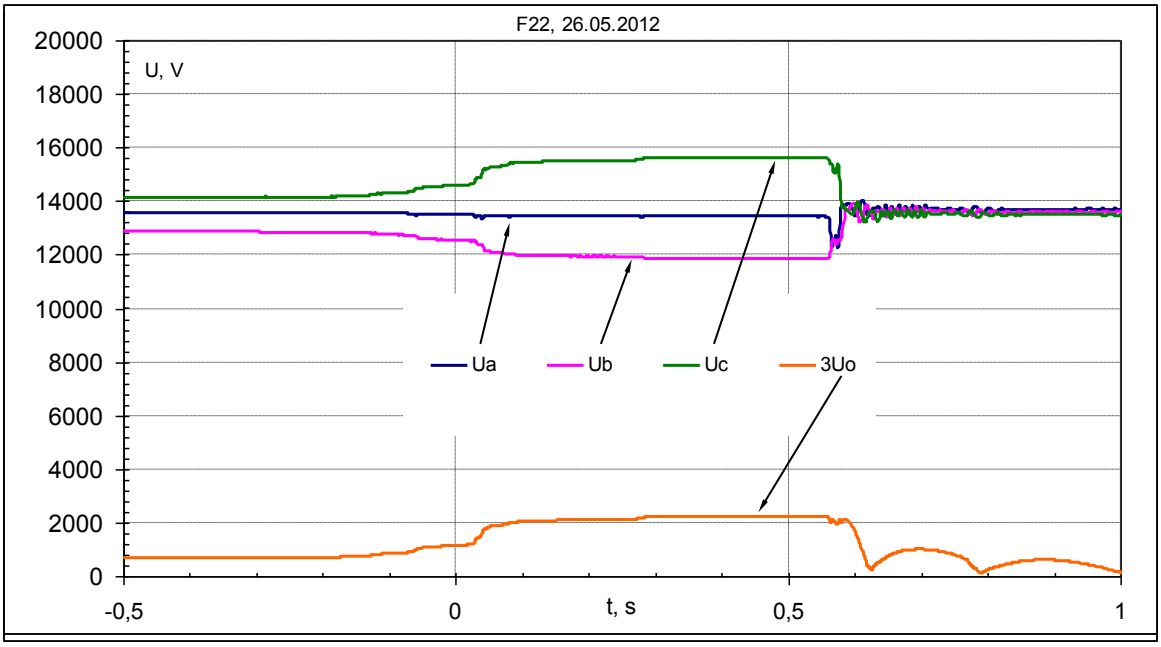
На фиг.3 е показано изменението на ефективните стойности на трите фазни напрежения и на напрежението с нулева последователност. К. с. е в първичната намотка на фаза ***C***. Преводното отношение на понижаващия НТ ***VT***$_{\mathrm{C}}$ се намалява и вторичното напрежение на фаза ***C*** спрямо „земя“ нараства.



Фиг.2. Осцилограми на напреженията, запис от защитата

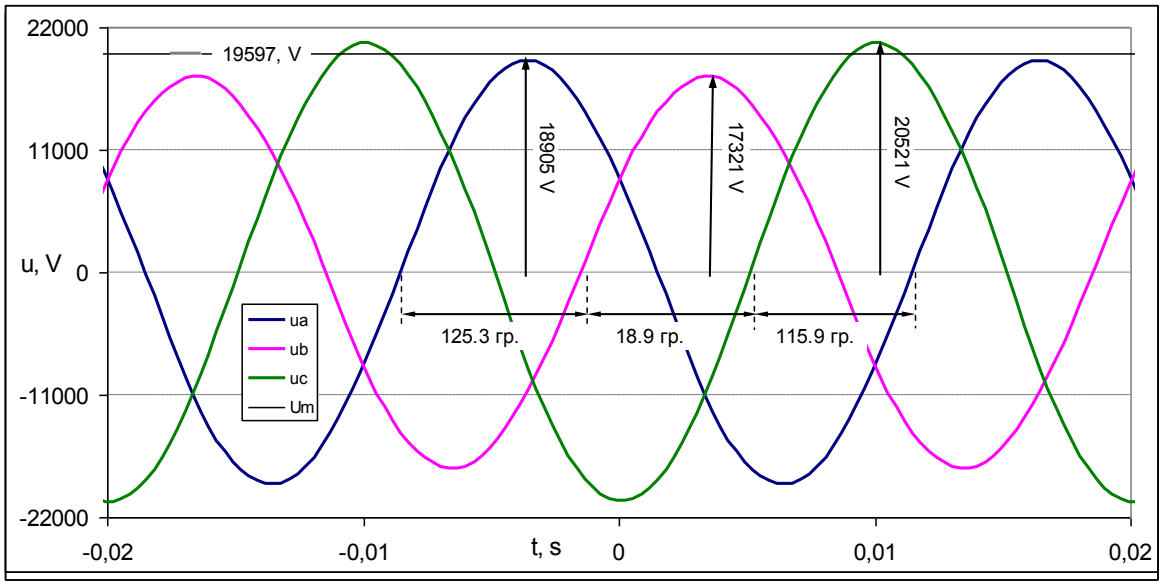
Фиг.2. Осцилограми на напреженията, запис от защитата

Осцилограми на напреженията около точката $t = 0$ s на пускане на защитата са показани на фиг.4. Видимо формата на напреженията е синусоидална и това дава основание да се различи к.с. от намесата на частични разряди и ферорезонансни явления. По-подробни данни за големините на напреженията и изменението на техните фази са дадени в табл.1. Защитата заработва при достигане на напрежение с нулева последователност от 8V.



Фиг.3. Ефективни стойности на фазни напрежения от фиг.2

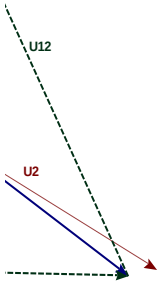
Фиг. 3. Ефективни стойности на фазни напрежения от фиг. 2



Фиг.4. Осцилограми на фазните напрежения в момента t=0 s на пускане на защитата

Фиг.4. Осцилограми на фазните напрежения в момента t=0 s на пускане на защитата

пускане на защитата $t=0s$



Фиг.5

3. Физическо моделиране на процесите в напреженовите измервателни трансформатори при късо съединение в първичните им намотки

Като допълнителна форма на доказване на реалното явление е избрано физическото моделиране в лабораторията „Релейна защита“ на ТУ-София.
Действителната трифазна статорна намотка на изследвания генератор е свързана в звезда и е изолирана от „земя“. Във физическият модела тя е моделирана посредством вторичната намотка на трифазен трансформатор (220/220 V, 50 kVA), свързана в звезда с изолирана неутрала. Първичната намотка на моделиращия трансформатор е свързана в триъгълник и се захранва от мрежата през фазорегулатори, с цел осигуряване на възможност за регулиране на първичните напрежения по големина и фаза. Напрежението на всяка фаза спрямо заземителната инсталация на лабораторията се измерва с волтметри, дефазирането им се следи с четириканален осцилоскоп.

Табл.1.

Време	Напрежение	Амплитудни стойности		Фаза	Ефективни стойности	
	U, V	u_{2m}, V	$u_{1m,\,ph}$, V	φ [°]	U_{2eff}, V	$U_{1eff,\,ph}$, V
-0,48	U_A	79,0	18969	123,3	55,9	13414
	U_B	74,6	17906	119	66,7	16007
	U_C	82,4	19780	117,7	58,3	13987
	$3U_0$	6,8		268,7	4,81	
0	U_A	78,8	18905	125,3	55,7	13368
	U_B	72,2	17322	118,9	51,0	12248
	U_C	85,5	20521	115,9	60,5	14511
	$3U_0$	10,5		269,6	8,21	
0,5	U_A	77,9	18707	134,4	55,1	13228
	U_B	68,6	16463	118,6	48,5	11641
	U_C	90,1	21616	107,2	63,7	15285
	$3U_0$	21,4	2959	270,5	15,96	2092
1	U_A	79,4	19046	121,2	56,1	13468
	U_B	79,9	19188	118,6	56,5	13568
	U_C	79,6	19100	120,3	56,3	13506
	$3U_0$					

Към изводите на вторичната намотка на моделиращия генератора трансформатор са свързани началата на първичните намотки на три еднофазни конвенционални трансформатора. С тях се моделират трите реални НТ. Краищата на първичните им намотки са свързани към заземителната инсталация на лабораторията.

Към вторичните им намотки са свързани волтметри. Краищата на вторичните намотки са заземени също към заземителната инсталация на лабораторията. Между изолираната неутрала и „земя“ е свързан волтметър за измерване на напрежението на неутралата.

Върху ядрата на всеки трансформатор, моделиращ напреженовите измервателни

трансформатори, свързани към изводите на генератора са навити равен брой допълнителни навивки. Във фазата, обозначена с U_1 през определен брой допълнителни навивки са изведени изводи, чрез които се моделират късосъединените навивки. Свързването на късо на определен брой навивки се извършва през амперметър и се измерва токът в контура.

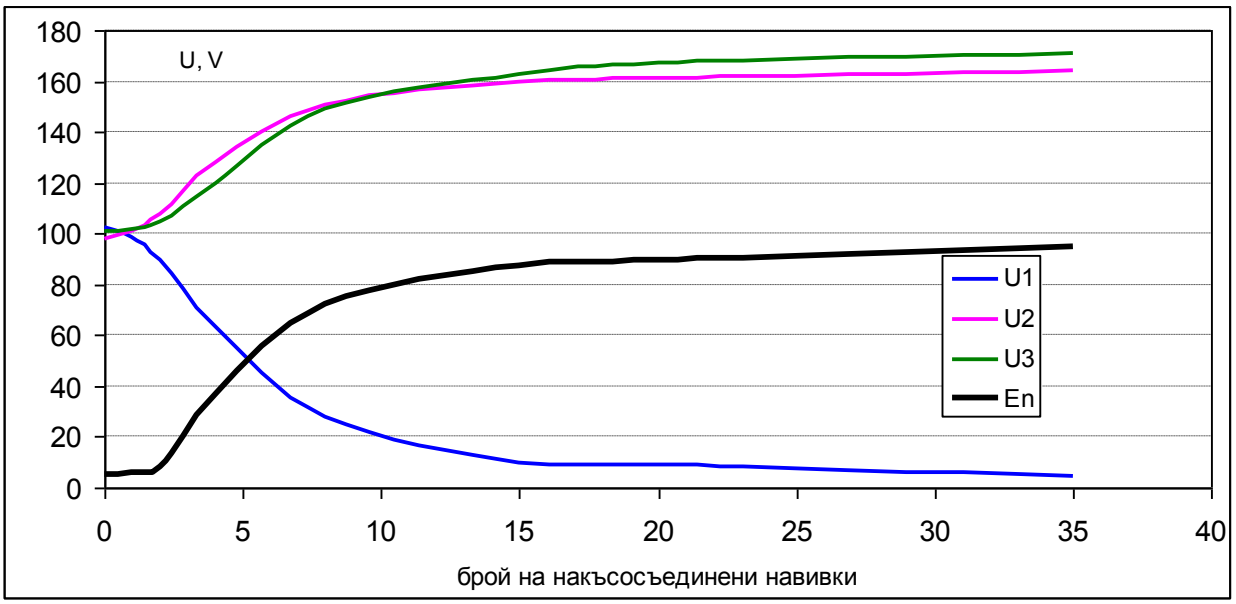
Осигурява се симетрия на захранващата трифазна система напрежения. Последователно се дават на късо все по-голям брой от допълнителните навивки, като се измерват: напреженията във вторичните намотки на трансформаторите, напрежението на неутралата спрямо „земя“; токът в късосъединените навивки. Получените резултати са показани на фиг.6.

В НТ с късосъединени навивки в първичната намотка се наблюдават противодействащи си процеси. Увеличаването на броя на късосъединените навивки води до намаляване на коефициента на трансформация и напрежението на вторичната му намотка нараства. Но появяването на късосъединени навивки води до образуване на късосъединен контур, в който се създава поток, обратен на причината, която го създава. Напрежението в контура е пропорционално на броя на навивките, а индуктивността е пропорционална на техния квадрат.

На фиг.7 е показано изменението на тока в късосъединения контур. Вижда се, че при определен брой навивки неговата стойност е най-голяма. Тогава и загряването около късосъединените навивки е най-високо. Впоследствие, при намаляване на стойността му, топлинното въздействие на този ток намалява.

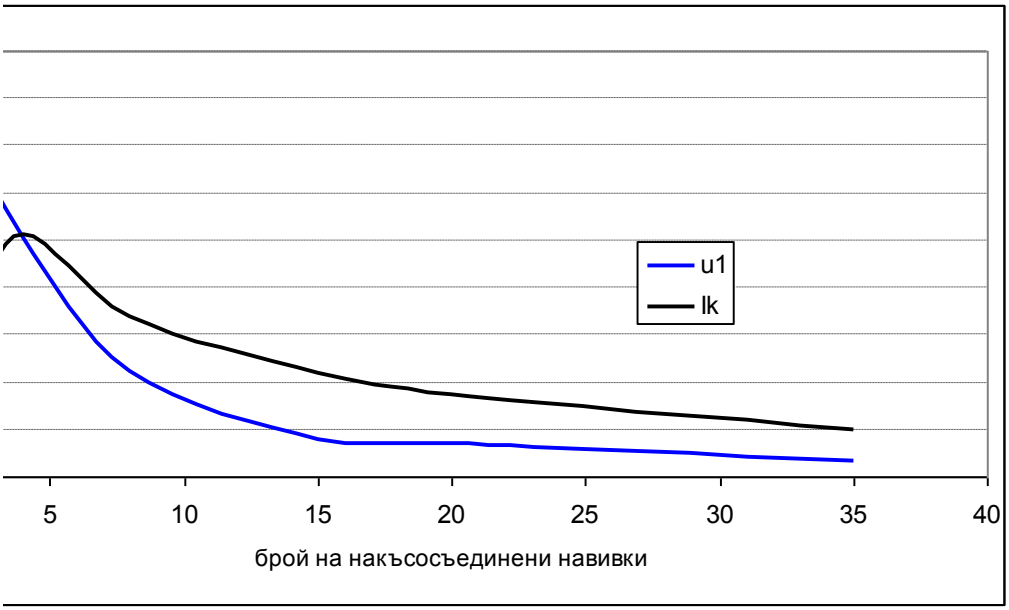
Физическото моделиране на схема с НТ и к.с. в първичните им навивки дава резултати, които съвпадат с реалните случай на такава повреда.

В литературата са описани случаи на ферорезонанс при наличие на НТ [3÷6], които водят до повреди и излишно заработване на релейните защити.



Фиг.6. Изменение на напрежението във фазите и неутралата на физическия модел при промяна на броя на късосъединените навивки

Фиг.6. Изменение на напрежението във фазите и неутралата на физическия модел при промяна на броя на късосъединените навивки



Фиг.7. Изменение на напрежението във вторичната намотка на трансформатор с късосъединени навивки и тока в тях

. Изменение на напрежението във вторичната намотка на
рансформатор с късосъединени навивки и тока в тях

4. Заключение

1. В разглеждания случай при поява на напрежение с нулева последователност генераторните защити са функционирали адекватно, изключвайки генератора. Спрямо състоянието на самия синхронен генератор, това действие обаче е „излишно“ и води до големи финансови загуби.

2. Причина за появата на напрежение с нулева последователност е съотношението на вторичните фазни напрежения на НТ при к.с. в първичните навивки на един от тях. Това е рядка повреда, която в литературата се свързва с пренапрежения при ферорезонанс. В разглеждания случай записите в защитите не отговарят на наличие на ферорезонанс.

3. Причината за повредата се търси в качеството на изолацията на използваните НТ. Може да се коментира и наличието на частични разряди.

4. Генераторът е с изолирана неутрала, а НТ, свързани в неутралата и към изводите му са с директно заземени неутрали. Промяна в параметрите на НТ, включени към изводите на генератора води до несиметрия, която поражда напрежение с нулева последователност.

5. Създаденият в лаборатория „Релейна защита“ към ТУ-София физически модел дава резултати, които съвпадат със записите на цифровите релейни защити.

6. Препоръчително е НТ, работещи в отговорни обекти да имат по-широка от традиционната гама от проверки преди и по време на експлоатацията. Например:

- Да се снема характеристиката „напрежение-ток“ в първичната намотка за целия диапазон от напрежение от нула до 1.9 пъти номиналното напрежение. При снемането на характеристиката да се следи и формата на напрежението и тока. Да се използват волтметри и амперметри с широк честотен обхват.

- Чрез осцилографиране, в режим на нормална работа на генераторите, да се следи големината и формата на напрежението на неутралата u_{En} и напрежението с нулева последователност $3u_0$ на изводите на генераторите. Да се състави статистика от получените данни.

Литература

[1] Siemens. **Защити при земно съединение в статорните намотки на големи синхронни генератори**. *www.gobookee.net/siemens-numerical-relays*

[2] Вичев С. Т. **Цифрови релейни защити**. Записки, 2012. *www.svichev.info*

[3] Ferracci Ph. **Ferroresonance.** Cahier technique, n° 190. ECT190, March 1998

[4] Третьяк Б. С., главный конструктор ОАО «ЗЗВА», А. Журахивский, дтн, проф. каф. ЭСС, НУ «ЛП», А.С. Чавке, зам. главного конструктора ОАО «ЗЗВА» **Повышение надёжности в работе измерительных трансформаторов напряжения в сетях с изолированной нейтралью**

[5] RITZ. Instrument transformers. **Гасящее устройство типа DE 6** для избежания эффектов феррорезонанса в системах от 10 до 36 кВ. Bergener Ring 65/67. 01458 Ottendorf-Okrilla. RD0307. *www.ritz-international.com*

[6] Lai Tianjiang, Lai Tianyu, Lai Qingbo. **Using ovef-damping method to suppress the ferroresonance of potential transformer.** Dalian Electric Power Company, China. **CIRED** 17th International Conference on Electricity Distribution Barcelona, 12-15 May 2003. DLP_TJLai_A1, Session 1, Paper No 32

Автори: Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж., катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg;* Станимир Трифонов Вичев, доц. дтн инж., катедра „Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *svichev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Димитър К. Сотиров

СТРАТЕГИИ ЗА РЕГУЛИРАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЕТО В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ С РАЗПРЕДЕЛЕНИ ЕНЕРГИЙНИ ИЗТОЧНИЦИ

Рад Станев

Резюме: *Този доклад представя оценка на влиянието на различни стратегии за регулиране на напрежението в разпределителни мрежи с разпределени източници. Чрез приложението на квазидинамичен похват за анализ на бавни преходни процеси в областта на времето е изследвана тестова система с разпределени фотоволтаични генератори. Въз основа на получените резултати са направени полезни изводи.*

Ключови думи: *регулиране на напрежението, анализ в областта на времето на електроенергийни системи; регулиране на реактивните мощности, разпределителни мрежи, разпределени енергийни източници*

VOLTAGE CONTROL STRATEGIES FOR DISTRIBUTION NETWORKS WITH DISTRIBUTED ENERGY RESSOURCES

Rad Stanev

Abstract: *This paper presents estimation of the effect of different voltage control strategies of distribution networks with distributed energy resources. Using the implementation of a quasi-dynamic approach for slow dynamics time domain analysis a test case with distributed pv generators within a distribution network is studied. Based on the results obtained some valuable conclusions are made.*

Keywords: *voltage control, time domain analysis of electrical power systems, reactive power control, distribution networks, distributed energy resources*

1. Introduction

The increasing presence of distributed generation in the distribution networks forces novel voltage control strategies which should respond the needs of normal performance of the network under the various new states which are arising [1,2]. In the past the entire voltage drop band of the distribution network was used to meet the needs of admissible voltage levels at the point of common coupling of the consumers. The conversion of the distribution networks from formerly passive to currently active one with distributed energy resources forces allocation of the available voltage drop band between the consumers and the producers.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. Methodology

The voltage control problem can be considered as both static and slow dynamic with typical time stamp of 1-10 minutes. As for the static issues of the problem the classical steady– state power flow analysis is used. In order to estimate the effect of different voltage control strategies over the time the “quasi- dynamic" type of simulations is used [2].

The steady state analysis is focused on the system parameters under some typical loading and generation conditions. In this work the following 3 typical states are considered:

- System state before the penetration of distributed generators under minimal and maximal load conditions;
- System state after the penetration of distributed generators under minimal generation and maximal load conditions;
- System state after the penetration of distributed generators under maximal generation and minimal load conditions.

The “quasi-dynamic” analysis carried out in this work is focused on the slow variation of loads, generations and other input parameters over a typical 24 h time period. The modeling and the analytical issues of this approach are presented in [2] and [3]. The main variables of interest for the quasi dynamic analysis are the node and branch variables: voltage magnitude, voltage phase, active and reactive power, current. The models of inverter tied generators are based on the (P,Q) capability diagram. For each individual snapshot the generator is modeled as a (P,V) node (in the case when the generator is able to inject or absorb reactive power in order to keep the voltage equal to the set point voltage) or as a (P,Q) node (in the case when the reactive power control is not present or is not possible anymore because of reaching the boundaries of the (P,Q) diagram). For each snapshot of the studied quasi dynamic simulation, the active power generations of the photovoltaic generators are given as the generated active power in the corresponding individual node.

3. Test system

A simple and representative test case of an existing 0.4 kV distribution network of a village near Sofia, Bulgaria is presented in order to illustrate the simulation approach (Fig.1).

The 21 bus network (Fig.1) has uniformly distributed, symmetric, predominantly active load. The minimal and the maximal system load are P_{min}= 33.2 kW and P_{max}= 110.8 kW respectively. Two inverter tied photovoltaic generators should be interconnected at bus 10 and at bus 18. The photovoltaic generator G1 with nominal power P_{G1}= 30 kW is connected at bus 10. The photovoltaic generator G2 with nominal power P_{G2}= 50 kW is connected at bus 18.

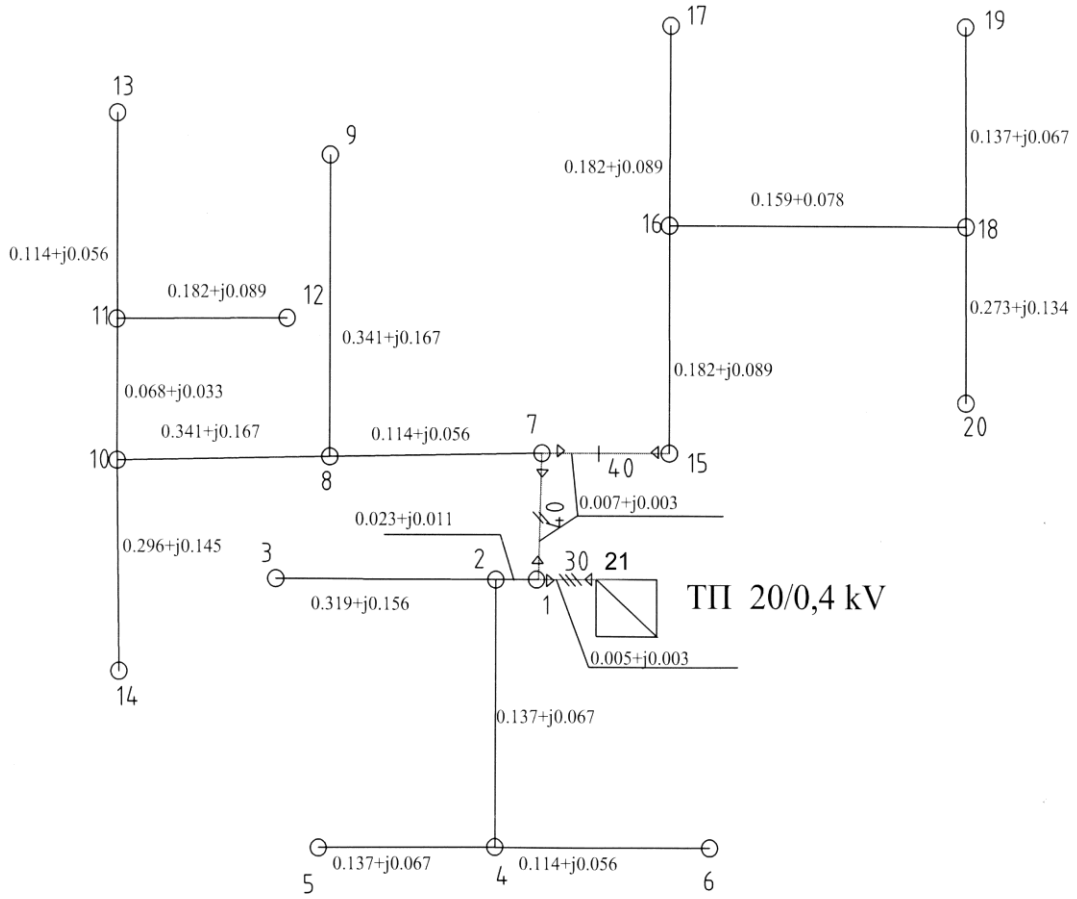


Figure 1: *One-line scheme of the tested system*

Figure 1: One-line scheme of the tested system

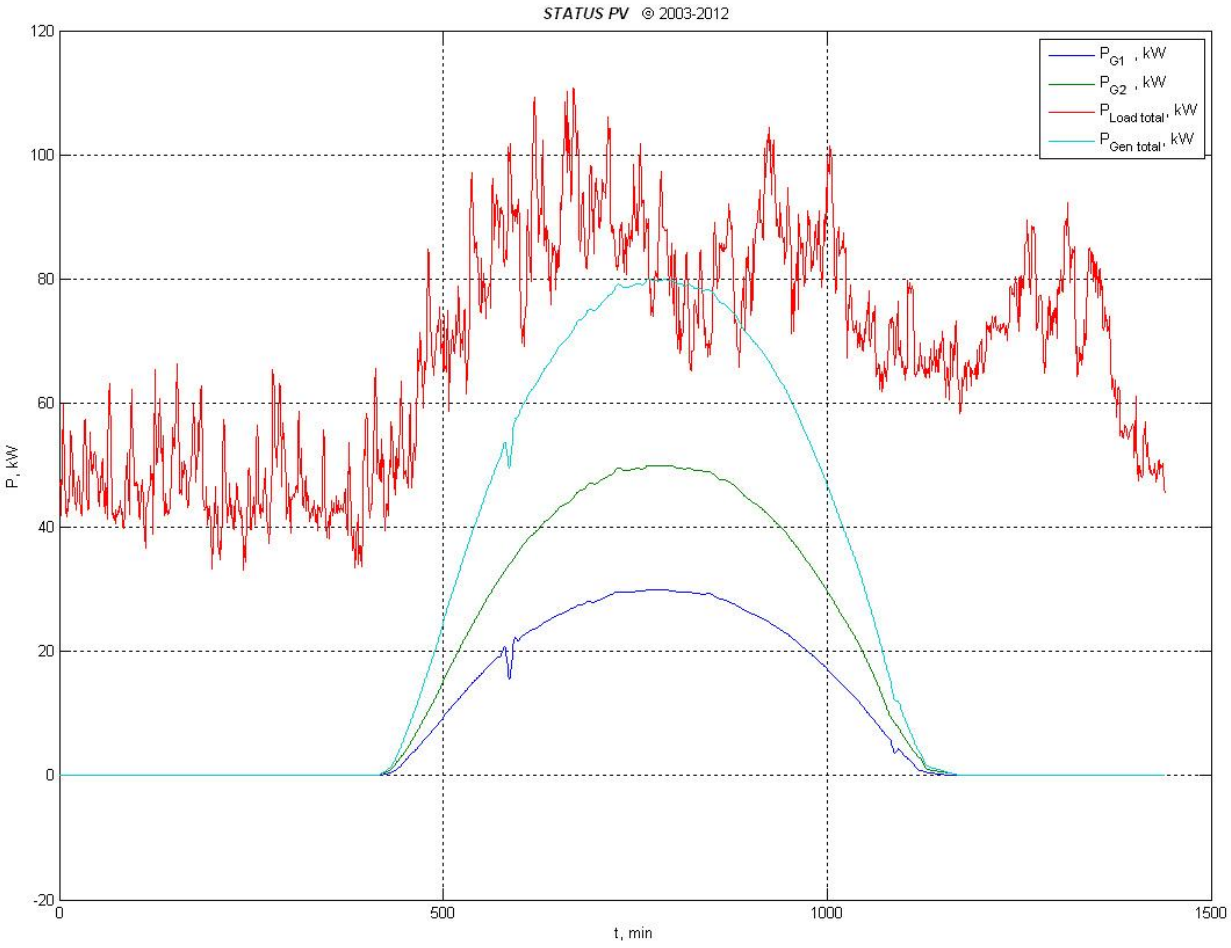


Figure 2: *Active power of the total load and of the PV generators*

In the considered test case the connected Distributed Energy Resources (DER) are the PV generators G1 and G2. The load and generation variations over a typical 24 h period are presented on Fig.2. When the generators are with reactive power control these are modelled as (P,V) nodes with the limitations on the produced reactive power as specified in Table 1 and Table 2.
The (P,Q) capability diagram points for the generator at bus 10 are:

Table 1: G1 reactive power capability boundary

P [kW]	0	30	30	0
Q [kVAr]	-22,5	-22,5	22,5	22,5

The (P,Q) capability diagram points for the generator at bus 18 are:

Table 2: G2 reactive power capability boundary

P [kW]	0	50	50	0
Q [kVAr]	-37,5	-37,5	37,5	37,5

In this test case, for low voltage network, the MV/LV transformer is represented as a slack (infinite) node.

A. Steady State Analysis

The test system performance has been simulated in the following three typical steady state conditions:

- **System state before the penetration of distributed generators (DG)**

Before the penetration of the DG the system operates as a typical radial network with unidirectional power flow serving the loads from the transformer substation. With transformer tap setting of V=1.05 p.u. rated the system keeps normal voltage levels under minimal load conditions (Fig.3) and nearly admissible voltage levels under maximal load conditions (Fig.4). However busses 10, 11, 12, 13 and 14 show high voltage sensitivity.

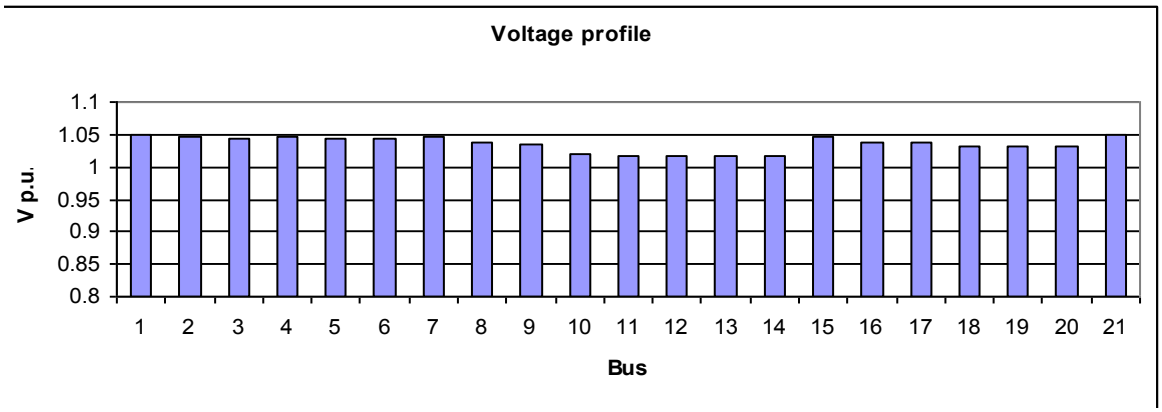


Figure 3: *Voltage profile under minimum load conditions*

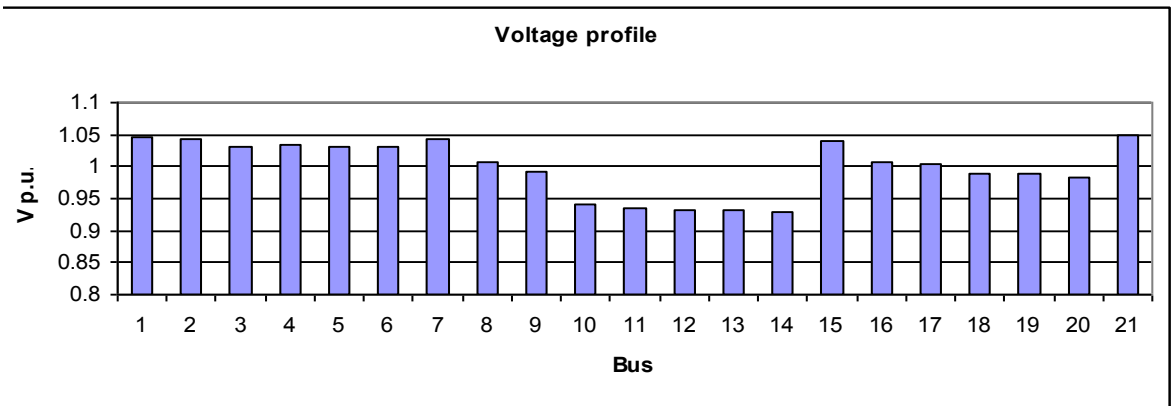


Figure 4: *Voltage profile under maximum load conditions*

- **System state after the penetration of distributed generators without voltage control**

With the connection of the photovoltaic generators to the network the power flow becomes bidirectional. Both photovoltaic generators G1 and G2 are connected to the network via inverters with unity power factor (cosφ = 1) without reactive power and voltage control. The conditions of minimal load and maximal generation are recognized to be critical for keeping the voltage within the admissible boundaries of ±5%. The minimal load which occurs during conditions of maximum generation from the photovoltaic systems is $P_{L_{min}}$= 66.48 kW. With transformer tap setting of V=1.025 p.u. rated and maximum generation (PG1=30 kW, PG2=50 kW) the system voltages are rising significantly above the admissible boundaries (Fig. 5). Under these conditions the maximum penetration level at bus 18 has to be restricted to 27 kW which guarantees admissible voltage levels (Fig.6).

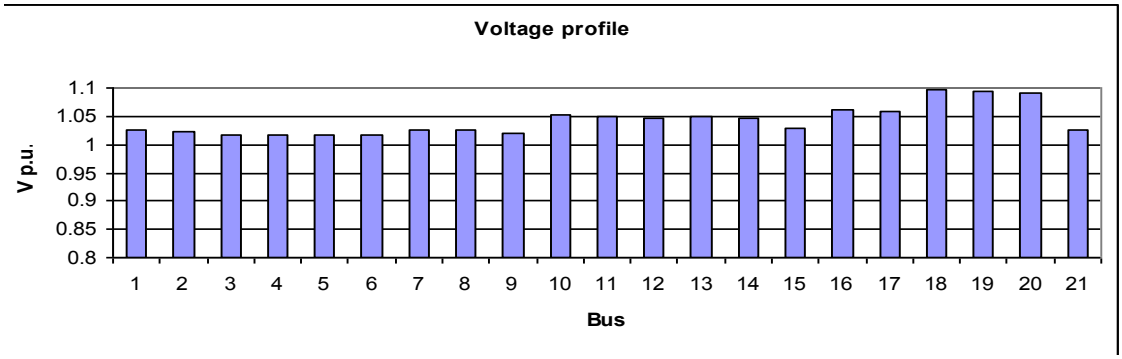


Figure 5: *Voltage profile with PG1=30kW u PG2=50 kW*

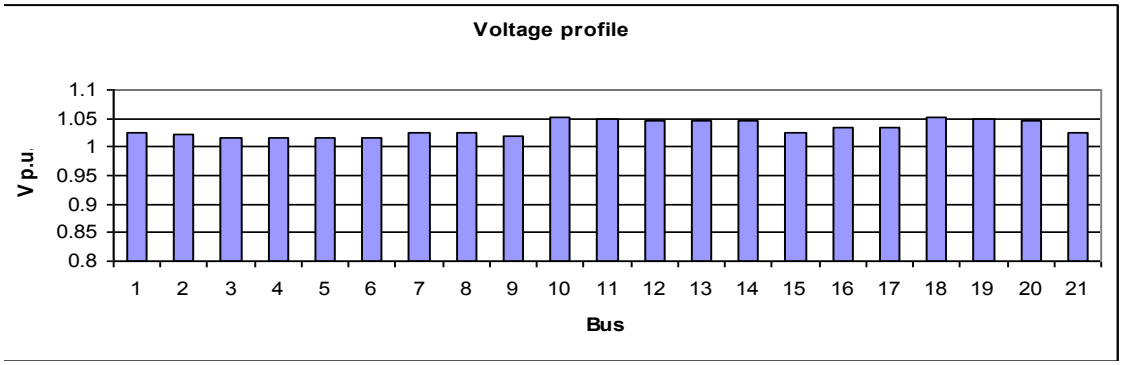


Figure 6: *Voltage profile with PG1=30kW u PG2=27 kW*

- **System state after the penetration of distributed generators with reactive power and voltage control**

Both photovoltaic generators are connected to the network via inverters with reactive power control which are able to regulate the voltage at their terminals for any point within the range from cosφ = 0.8 leading to cosφ = 0.8 lagging.

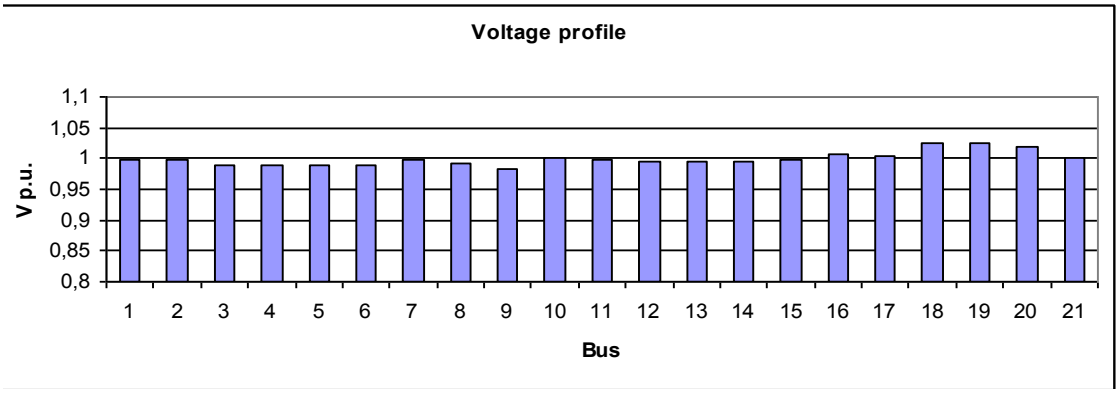


Figure 7: *Voltage profile with PG1=30kW u PG2=50 kW*

As in the previous case the conditions of minimal load and maximal generation are determined to be critical for the fulfilment of the voltage control objective. The minimal load occurring during maximal photovoltaic generation from G1 and G2 is $P_{L_{min}}$= 66.48 kW. With transformer tap setting of V=1.00 p.u. rated and maximum generation (P_{G1}=30 kW, P_{G2}=50 kW) the connection of both photovoltaic generators with voltage control leads to small voltage rise at the point of common coupling which results in admissible voltage profile in the network (Fig.7).

B. Quasi-dynamic analysis

The case study represents a quasi-dynamic simulation of the described test system for 24 h time period. The time stamp of the simulation is 1 min. Based on the network data and the data for the load and the generation in each individual node the system parameters over the time are computed using a quasi-dynamic approach. Based on generation and load time profile, presented at Fig.2, the evolution in time of each grid node voltage has been computed.

Three possible voltage control options are considered:

1. PV generators without reactive power control (Fig.8).
2. PV generators with daytime reactive power control: the inverters are providing reactive power control only during the time where the inverter is ON, injecting active power (i.e. during the night the inverters are OFF/ or stanby) (Fig.9).
3. PV generators with 24h reactive power control (i.e. the inverters are providing reactive power control also during the night) (Fig.10)

Using the quasi dynamic analysis made the system parameters over the time are obtained.

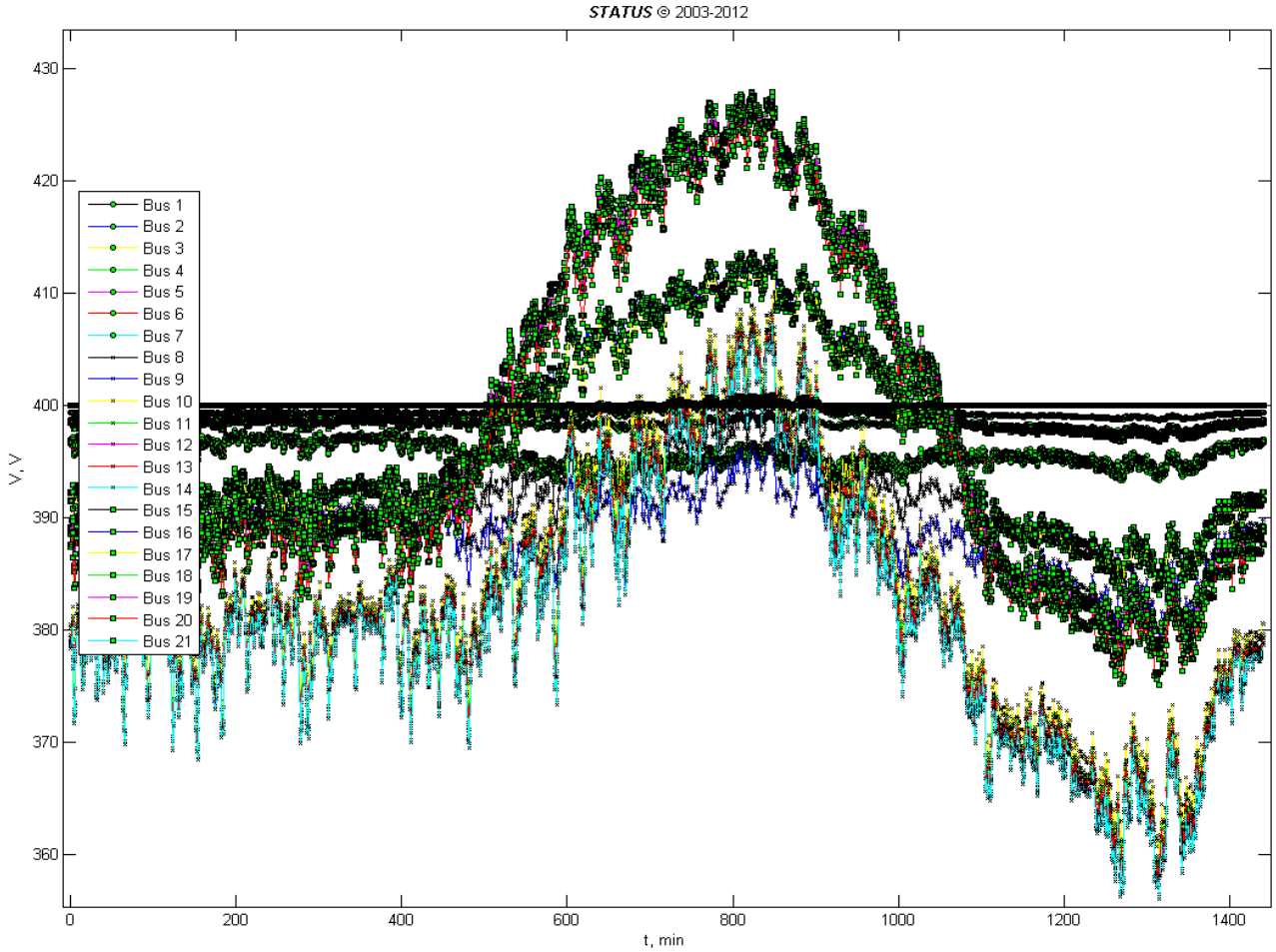


Figure 8: *Voltage levels without reactive power control*

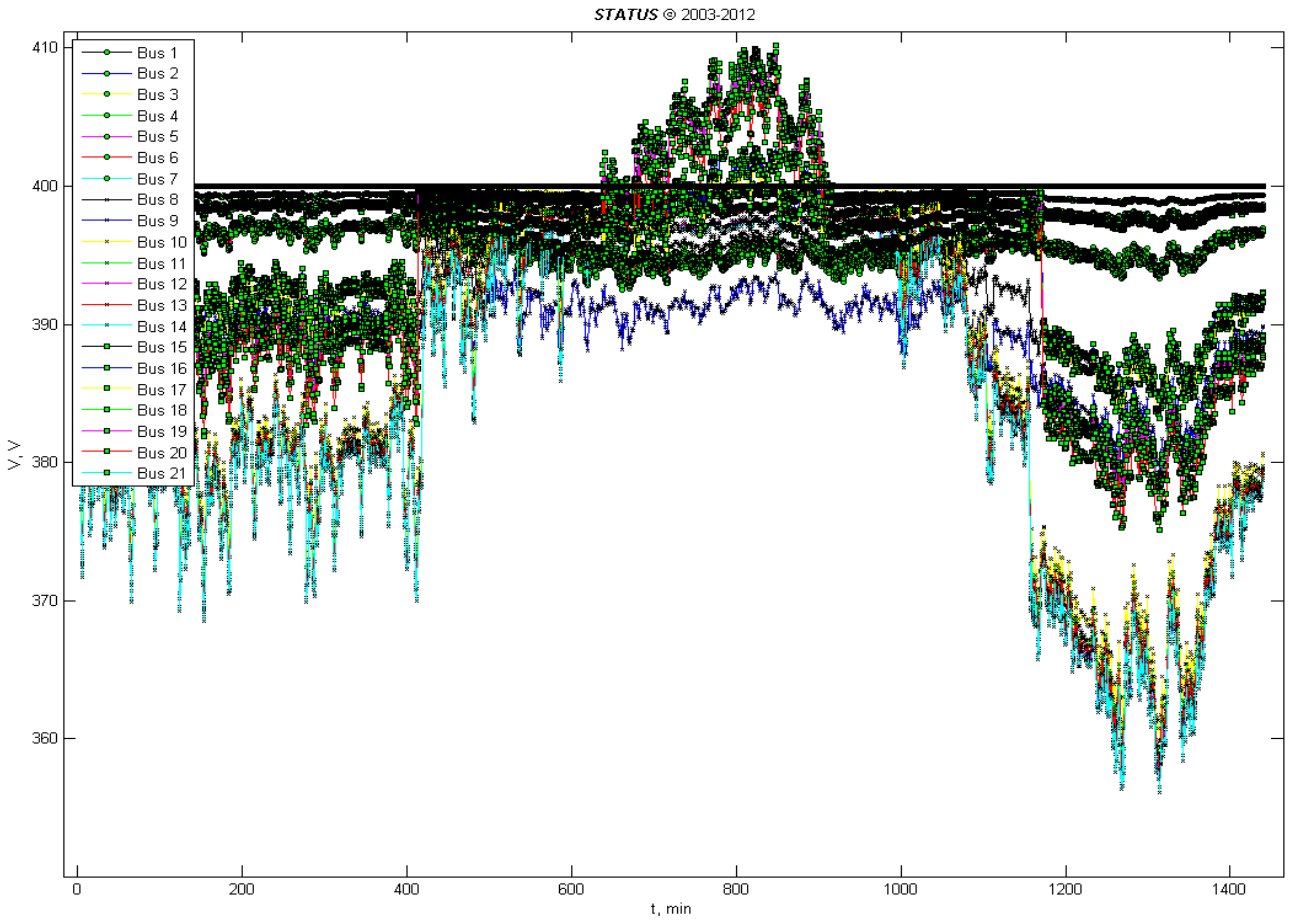


Figure 9: *Voltage levels with daytime reactive power control*

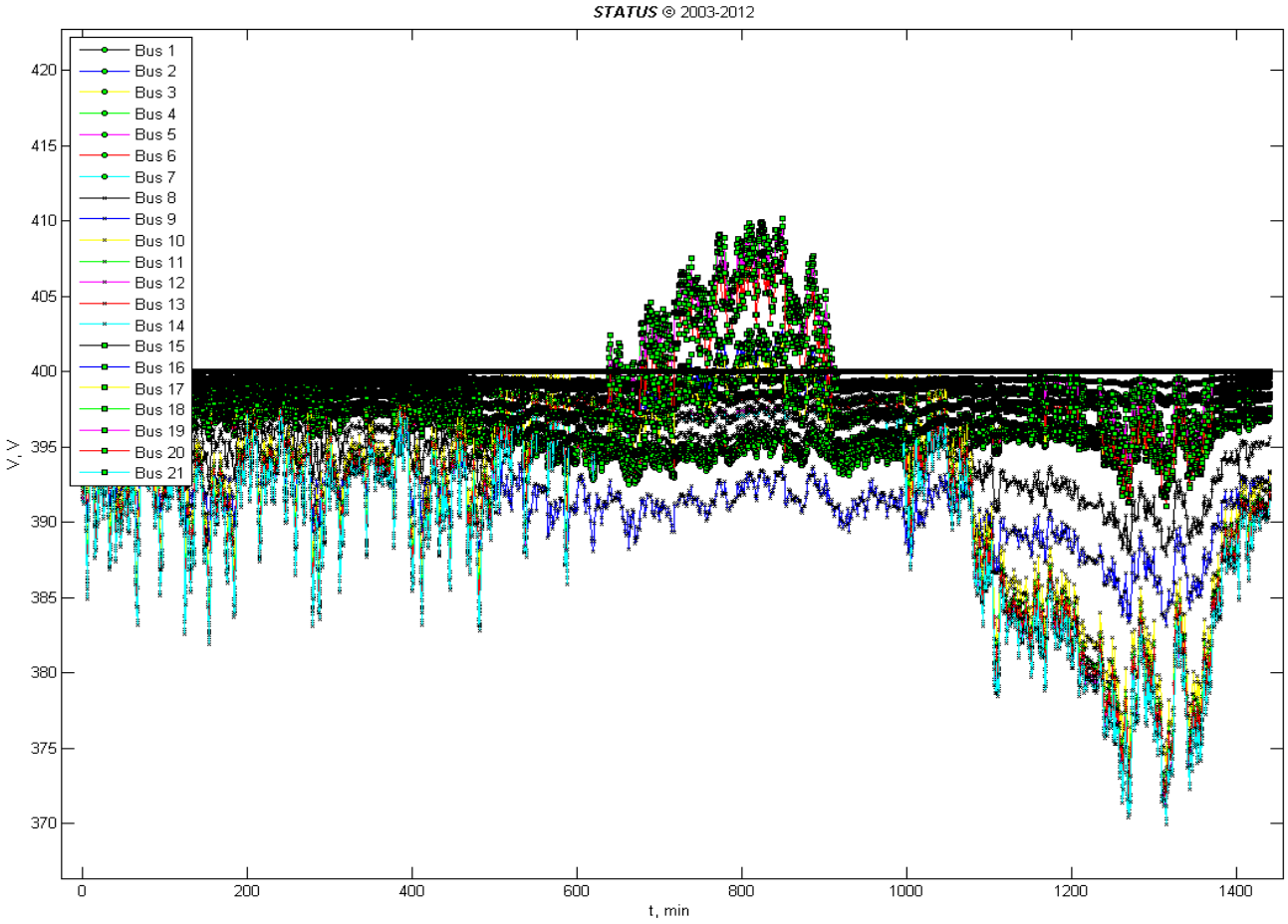


Figure 10: *Voltage levels with 24h reactive power control*

The connection of the generators G1 and G2 without reactive power control (Fig.8) results in significant and unacceptable increase of the network voltages close to the point of common coupling. This is especially evident during the midday maximum generation of these sources.

The connection of G1 and G2 with reactive power control during the day (Fig.9) keeps the voltage levels within the acceptable boundaries during the day. However the low voltage levels during the evening load maximum remains problematic for the most distinct and loaded nodes where the voltage remain below 360V.

The connection of G1 and G2 with 24h reactive power control results in admissible voltages during the entire 24h period (Fig.10). It has to be noted that the reactive power support of the inverters results in higher currents in the network. In this particular case study none elements of the overhead network were overloaded. However a more extensive research on other representative networks has to be done. The rise of the currents flowing into the network due to the reactive power support could be another limiting factor especially for cable networks which possess lower overloading capabilities.

4. Conclusion

The significant voltage level variation over the time show that the large and improperly connected distributed generation could lead to some network problems. Using the developed models and approach it will be possible to analyze networks with DER and

to predict the appropriate place and available maximum capacity for installation of the new distributed generators. The approach is also applicable for the needs of the demand side management.
The new inverter technologies provide high potential for voltage control of the distribution network. Three different voltage control strategies are considered. From the results of the dynamic simulations obtained the strategy with non-stop reactive power control of the photovoltaic inverters offers best results from voltage control point of view. However it has to be noticed that the increase of the reactive power flow of the networks leads to increase of the power and energy losses.

Acknowledgment

The authors thank the European Commission for the support from the FP7 project DERri GA No 228449 see also http://www.der-ri.net. The authors are solely responsible for the content of this publication, it does not represent the opinion of the European Community and the European Community is not responsible for any use that might be made of data appearing therein.

References

[1] Стоилов Д. Г., Гъвкавост на електроенергийните системи, Списание Енергетика, 2010г., брой 3, май-юни, стр. 17-21, ISSN 0324-1521.

[2] T. Strasser, Lehfuss F., Stanev R., Kotsampopoulos P., Tornelli C., Krusteva A. et al, "Parameter Identification and Validation Procedure for DER Component Models - Part B: Procedures D3.3.2," DERRI, January 2013

[3] A quasi-dynamic approach for slow dynamics time domain analysis of electrical networks with distributed energy resources, EF Scientific conference, September 2013

[4] R. Stanev, Mathematical modelling of transformers with OLTC for voltage stability analysis purposes, Energetika Journal, 2007.

[5] K. Morison, Kundur, P., Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches, IEEE Transactions on power systems, 1993, pp. 1159-1171

Authors: Rad Stanev, Electrical Power Engineering Dept., Technical University of Sofia, Bulgaria, E-mail address: *rstanev@tu-sofia.bg*

Received 02 September 2013 **Reviewer**: Professor, PhD Petko Notov

КВАЗИДИНАМИЧЕН ПОДХОД ЗА АНАЛИЗ НА БАВНИ ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ В ОБЛАСТТА НА ВРЕМЕТО В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ С РАЗПРЕДЕЛЕНИ ЕНЕРГИЙНИ ИЗТОЧНИЦИ

Рад Станев, Анастасия Кръстева, Карло Торнели, Карло Сандрони

Резюме: *Този доклад представя концепцията и приложението на квазидинамичен подход за анализ на бавни динамични процеси в електрически мрежи с разпределени енергийни източници* (*DER*). *Представеният подход показва бързо и ефективно от изчислителна гледна точка действие при анализа на многовъзлови мрежи с рапределено производство.*

Ключови думи: *бавни преходни процеси; анализ в областта на времето; разпределителни мрежи, разпределени енергийни изтоници*

A QUASI-DYNAMIC APPROACH FOR SLOW DYNAMICS TIME DOMAIN ANALYSIS OF ELECTRICAL NETWORKS WITH DISTRIBUTED ENERGY RESSOURCES

Rad Stanev, Anastassia Krusteva, Carlo Tornelli, Carlo Sandroni

Abstract: *This paper presents the concepts and the implementation of a quasi-dynamic approach for slow dynamics time domain analysis of electrical networks with distributed energy resources* (*DER*). *The approach presented shows fast and computationally effective performance for time domain analysis of multi node networks with distributed generation.*

Keywords: *slow dynamics; time domain analysis; distribution networks, distributed energy resources*

1. Introduction

The significant growth of distributed generation in the electrical power systems faces new challenges for the computational analysis of the distribution network performance. The conversion of the former “passive” distribution networks to currently “active” one with distributed energy resources requires novel and computationally efficient techniques for analysis and examination of the system parameters in the time domain. The slow dynamics analysis in multi node power systems with distributed generation using the conventional approach based on solving of differential equations needs significant computational effort and normally requires a very long computational time [1]. As an alternative to the conventional dynamic simulations this paper

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

proposes “quasi-dynamic” approach for slow dynamics time domain simulations using modified nonlinear algebraic equations. The proposed “quasi-dynamic" analysis is focused on time domain simulations with duration from several minutes to several weeks. These type of simulations are useful for analyses of power system behavior due to slow variations, studies on power and energy management, active and reactive power balancing, demand side management, voltage control strategies, determination of the proximity to operating limits, power system stability etc.

A set of generic power system component models for quasi-dynamic analysis is presented.

2. Methodology

A. Concept presentation

The “quasi-dynamic” approach uses a concept of division of the variables in “fast” and “slow”, with very different time constants, with the assumption that fast transients settling time is shorter than the time step used for slow variables simulation.

Focusing on the slow variables, the evolution in time of the grid is simulated as a sequence of steady state snapshots. Then, the “quasi-dynamic” approach use a static model for the grid for studying its behavior in response to slow variation of loads, generations and other input settings.

The “quasi-dynamic” type of simulations are characterized by time constants of tens of seconds to hours. Since the processes and the variables are very slow the typical simulation time steps are within the same range.

The main variables of interest for the quasi-dynamic analysis of the electrical power system are the node and branch variables: voltage magnitude, voltage phase, active and reactive power.

The state of each node in each individual snapshot is given by the state equations:

$$P_k = \sum_{m \in k} V_k V_m (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \sin\theta_{km}) \quad (1)$$

$$Q_k = \sum_{m \in k} V_k V_m (G_{km} \sin\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}) \quad (2)$$

P_k is the active power at node (bus) k;

Q_k - reactive power at node k;

V_k - voltage magnitude at node k;

V_m - voltage magnitude at node m,

$\dot{Y}_{km} = G_{km} + jB_{km}$ – element *k,m* from the bus admittance matrix;

θ_k - voltage angle at node k;

θ_m - voltage angle at node m,

and $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$.

B. Algorithm description and analytical Considerations

A basic algorithm is shown on Fig.1 in order to illustrate the approach presented. After loading the system data a solution for the initial snapshot is made. If the iteration process is not convergent a rollback to the last solution is performed after which a recalculation of the variables is made. In case of convergent iteration process the stability of the obtained solution is checked. If the solution is stable the state parameters are recorded and a calculation for the next snapshot is made.

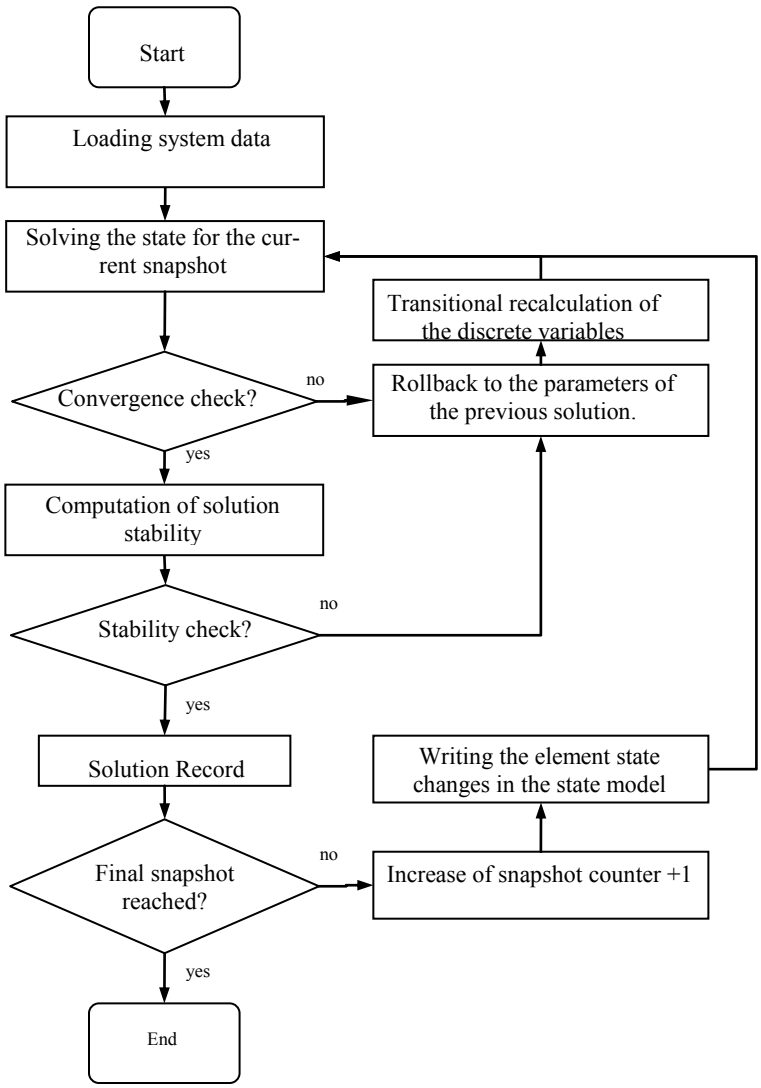


Figure 1: *Basic block diagram of algorithm for quasi-dynamic analysis*

The iteration methods used for solving the state of each snapshot does not always guarantee reaching a stable solution. A module of the program for power system analysis called *STATUS* is developed in order to overcome this problem. The module for transitional recalculation uses some special computation techniques with improved convergence and improved solution stability. In case of non convergent iteration process a rollback to the parameters of the last stable solution is done. At each step the solution received is recorded and used as a predictor for the following solution. The following techniques are applied independently until reaching a solution:

- Dynamic multiplying of the Jacobian by a scalar coefficient k_s, where $k_s \in \overline{0,1}$
- Dynamic multiplying of the Jacobian by a matrix coefficient k_m, proportional to the nodal $P-\theta, P-V, Q-\theta$ and $Q-V$ sensitivities
- Unload/Load technique consisting of two steps: Unload step=> Dynamic decreasing the load by multiplying P and Q by scalar coefficient k_s, ($k_s \in [0,1]$) until reaching a stable solution. Load step=> Dynamic increasing the load by multiplying P *and* Q by scalar coefficient k_s, ($k_s > 1$) until reaching a stable solution.

3. System elements modelling

The passive elements of the network are modeled using the well known steady state power flow models. The automation devices and controls of the passive elements are presented using linear equations.

The DER components connected via inverter (Fig.2) are modeled using the physical variables: V, P, Q, θ

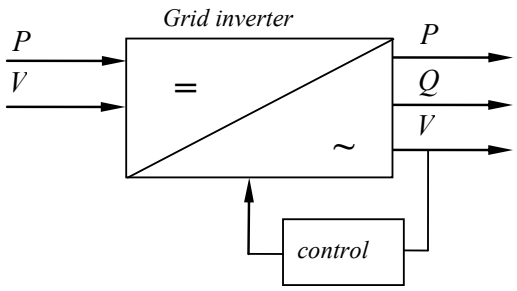


Figure 2: *Inverter tied DER component*

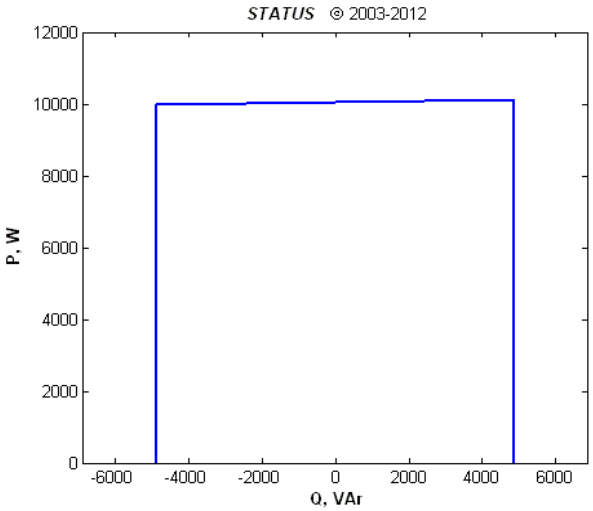


Figure 3: *Sample (P,Q) capability diagram of a 10 kW grid inverter (with reactive power control within cosφ= 0,9 leading cosφ= 0,9 lagging)*

The model describes the inverter tied generator by the following manner:

- Until the (P,Q) diagram boundaries are reached the generator is modeled as a (P,V) node. Thus it is represented by the only one equation of type (1)
- After the reactive power limitations of the inverter are reached (Fig.3) the node is automatically converted to a (P,Q) node represented both equations (1) and (2).

When the set point changes two states are computed: the first describes the steady state a bit before the transition (t=-0) and the second describes the steady state immediately after the transition (t=0+). This approach shows good adequacy when the time for transition from one state to the next state is much shorter than the time step.

For example, if slow dynamics with duration of 6 h are studied and the time step of the simulation is 1 minute, in case of change of the inverter set point for the bus voltage, then the inverter fast dynamics settling with duration 0,1-0,2s are not considered and only the both pre and after steady states are computed.

4. Test system

A simple and representative test case of an existing 0.4 kV distribution network of a village near Sofia, Bulgaria is presented in order to illustrate the simulation approach (Fig.4).

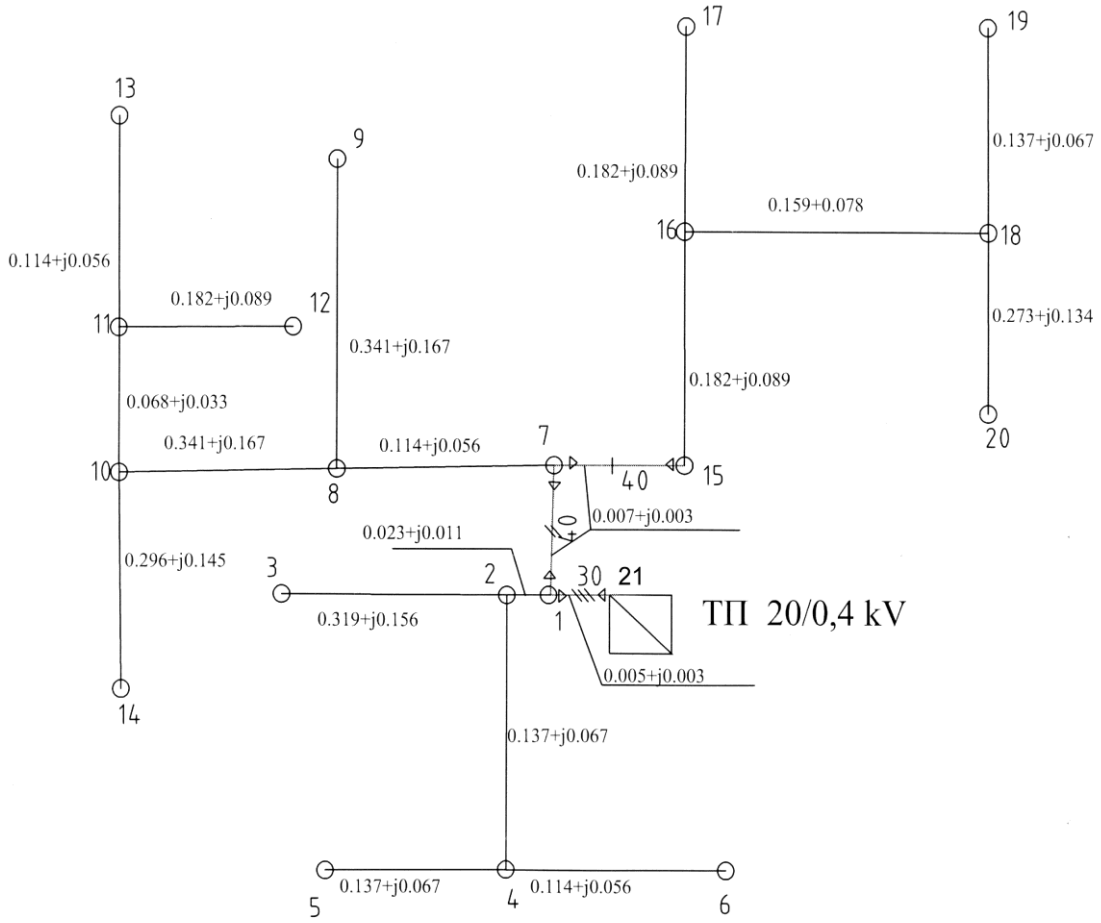


Figure 4: *One-line scheme of the tested system*

The 21 bus network (Fig.4) has uniformly distributed, symmetric, predominantly active load. The minimal and the maximal system load are Pmin= 33.2 kW and Pmax= 110.8 kW respectively.

Two inverter tied photovoltaic generators should be interconnected at bus 10 and at bus 18. The photovoltaic generator G1 with nominal power PG1= 30 kW is connected at bus 10. The photovoltaic generator G2 with nominal power PG2= 50 kW is connected at bus 18.

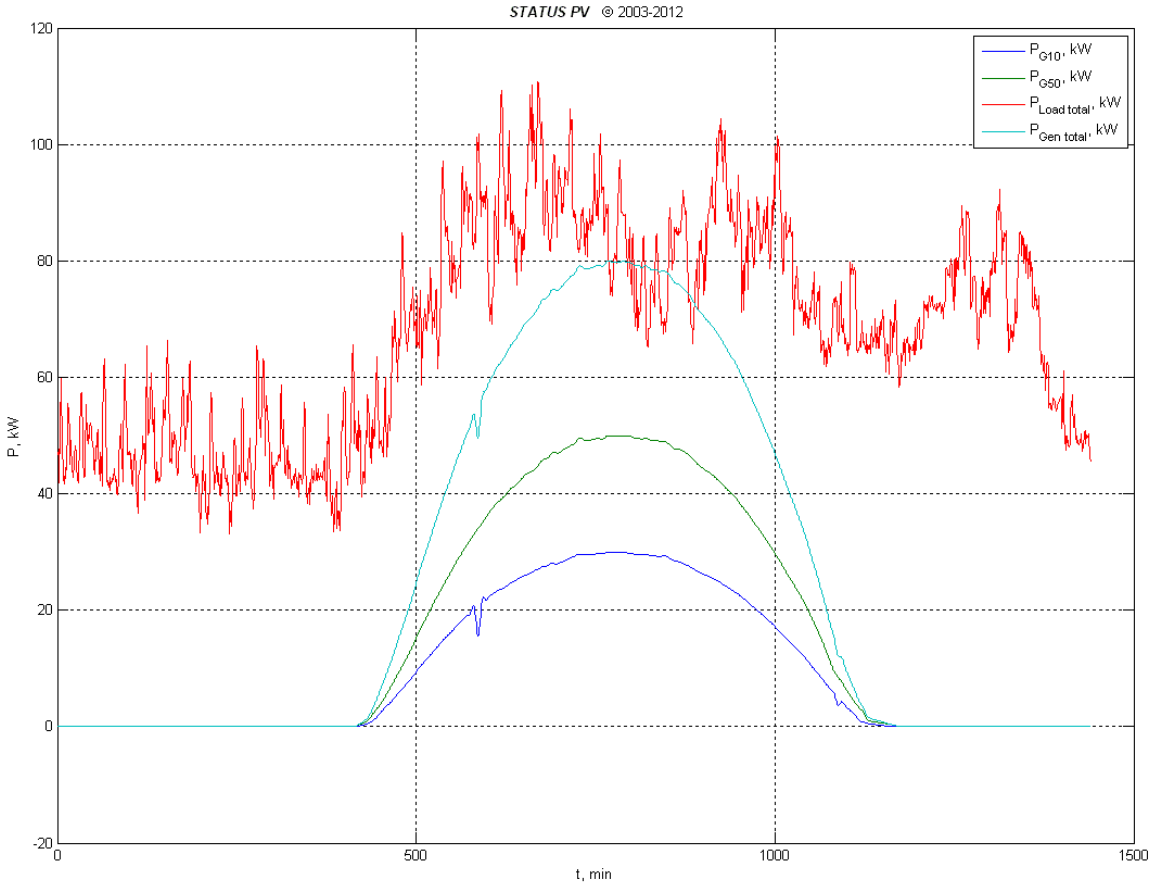


Figure 5: *Active power of the total load and of the PV generators*

The case study represents a quasi-dynamic simulation of the described test system for 24 h time period. The time stamp of the simulation is 1 min. Based on the network data and the data for the load and the generation profile in each individual node the system parameters over the time are computed using a quasi-dynamic approach. The load and generation are graphically presented on Fig.5.

Both photovoltaic generators are connected to the network via inverters with reactive power control which are able to regulate the voltage at their terminals for any point within the range from cosφ = 0.8 leading to cosφ = 0.8 lagging. The simulation computes a series of steady states for the grid.

The time domain quasi-dynamic simulation of the system after the penetration of distributed generators with reactive power and voltage control is performed using a specially designed module of the program for power system analysis STATUS developed at the Technical University of Sofia. For validation of the results obtained a similar quasi-dynamic simulation is performed in RSE using a procedure carried out using DIgSILENT software.

The results for the node voltages obtained using STATUS and DIgSILENT are presented on Fig.6 and Fig.7.

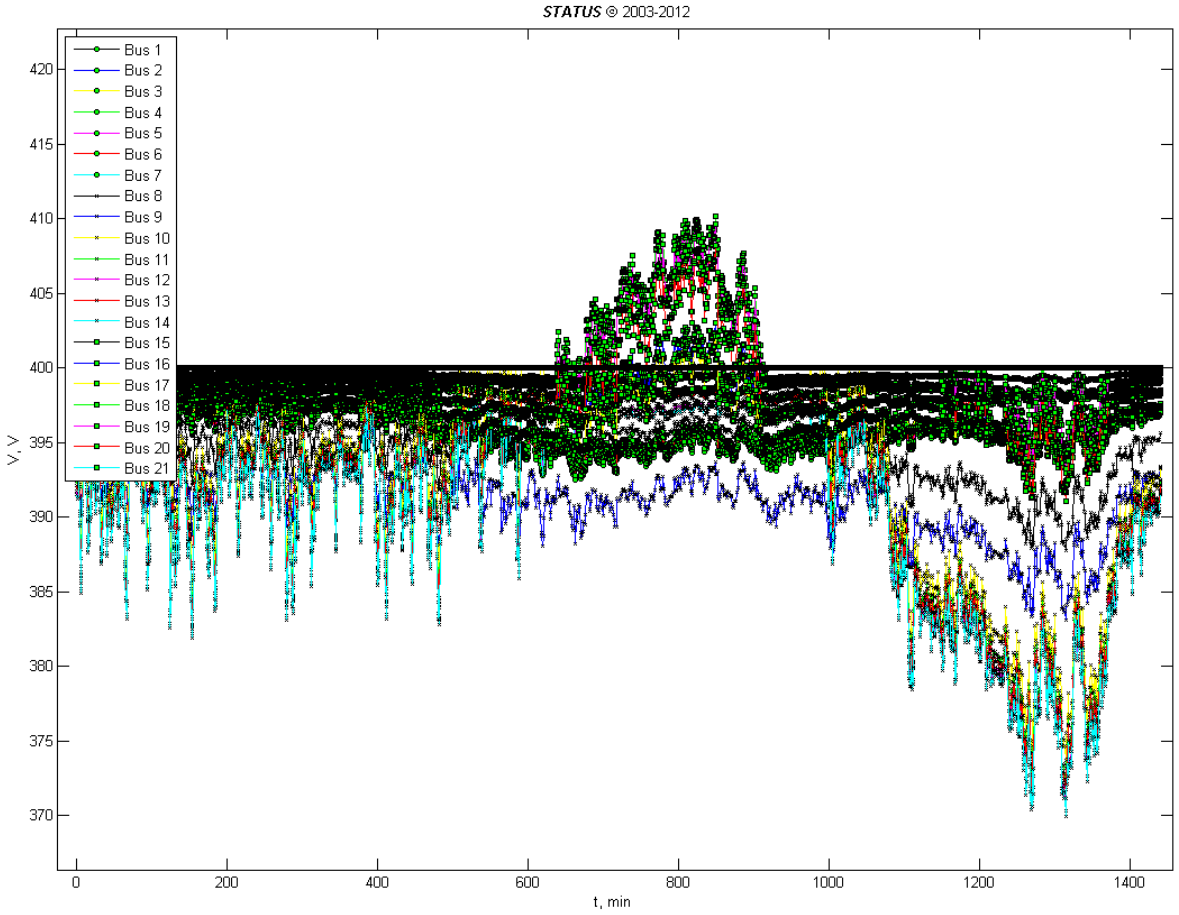


Figure 6: *Voltage levels with reactive power control obtained with STATUS*

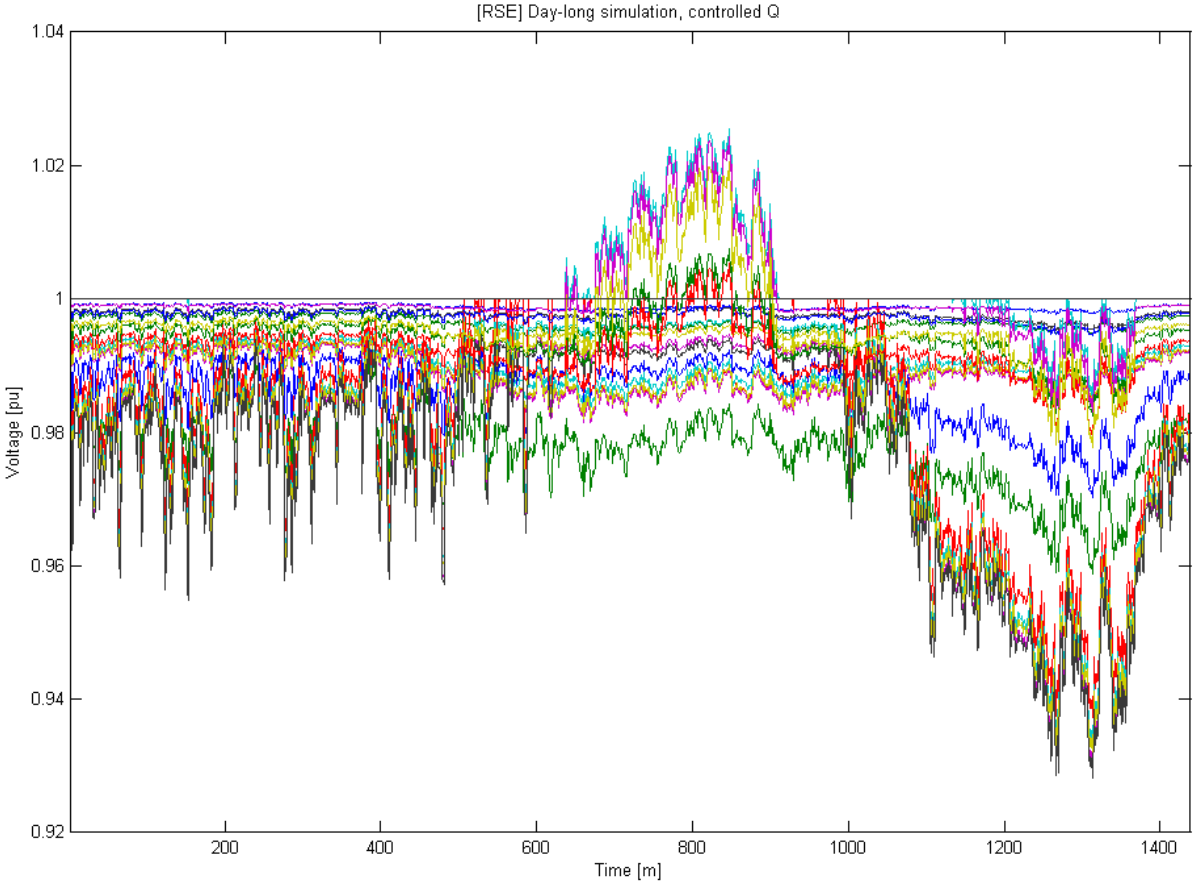


Figure 7: *Voltage levels with reactive power control obtained with DIGSILENT*

The results obtained, in both simulation environments, show a perfect matching within the accuracy given (The difference is bounded between ±0.003 p.u.).

The approach proposed seems to be very promising because of its computational efficiency and adequacy.

5. Conclusion

A fast and computationally efficient quasi-dynamic approach for analysis of slow dynamics in the time domain is presented. The approach shows good adequacy when slow processes with time step 1-15 minutes are studied. An analytical case study of a distribution networks with distributed generation are made using STATUS and DIGSILENT software showing the efficiency and portability of the proposed approach on different simulation tools.

Acknowledgment

The authors thank the European Commission for the support from the FP7 project DERri GA No 228449 see also http://www.der-ri.net. The authors are solely responsible for the content of this publication, it does not represent the opinion of the European Community and the European Community is not responsible for any use that might be made of data appearing therein.

References

[1] T. Strasser, Lehfuss F., Stanev R., Kotsampopoulos P., Tornelli C., Krusteva A. et al, "Parameter Identification and Validation Procedure for DER Component Models - Part B: Procedures D3.3.2," DERRI, January 2013

[2] R.Stanev, Mathematical modelling of transformers with OLTC for voltage stability analysis purposes, Energetika Journal, 2007.

[3] K. Morison, Kundur, P., Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches, IEEE Transactions on power systems, 1993, pp. 1159-1171

Authors: Rad Stanev, Electrical Power Engineering Dept., Technical University of Sofia, Bulgaria, E-mail address: *rstanev@tu-sofia.bg;*

Anastassia Krusteva, Power Electronics Deptartment, Technical University of Sofia, Bulgaria", E-mail address: *krusteva@tu-sofia.bg;*

Carlo Tornelli, T&D Technologies Dept., Ricerca sul Sistema Energetico - RSE S.p.A, Milano, Italy, E-mail address: *Carlo.Tornelli@rse-web.it*;

Carlo Sandroni, Power Generation Technologies & Materials Dept., Ricerca sul Sistema Energetico - RSE S.p.A, Milano, Italy, E-mail address: *Carlo.Sandroni@rse-web.it*

Received 02 September 2013 **Reviewer**: Professor, PhD Petko Notov

МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА АКУМУЛАТОРНИ БАТЕРИИ ЗА НУЖДИТЕ НА КВАЗИДИНАМИЧНИЯ АНАЛИЗ НА ХИБРИДНИ МИКРО ЕЕС

Рад Станев, Мартин Райков

Резюме: *Настоящият доклад представя математически модели на оловно-кисела акумулаторна батерия, приложими за нуждите на квазидинамичния анализ на електрически мрежи с разпределено производство. Описаният модел е валидиран посредством сравнение на аналитично получените резултати с реално измерени данни от тестова система. Направени са изводи относно точността на модела и неговия обхват на приложение.*

Ключови думи: *акумулаторни батерии, математическо моделиране, квазидинамичен анализ*

MATHEMATICAL MODELING OF STORAGE BATTERIES FOR THE NEEDS OF QUASI- DYNAMIC ANALYSIS OF HYBRID MICRO ELECTRIC SYSTEMS

Rad Stanev, Martin Raykov

Abstract: *This report describes mathematical models of lead-acid storage battery, applicable for the needs of quasi- dynamic analysis of electrical networks with distributed generation. The described model is validated by comparing the analytically received results with actual measured data from a test system. Conclusions about the accuracy of the model and its range of application are made.*

Keywords: *storage batteries, mathematical modeling, quasi- dynamic analysis*

1. Въведение

През последните години е налице навлизането на децентрализирани възобновяеми енергийни източници при производството на електрическа енергия в разпределителните мрежи. Увеличава се броят и мощността на автономните, островни и хибридни системи, където възобновяемите източници са основен източник на електроенергия. Променливият и стохастичен характер на производството и потреблението в такива системи налага съхраняването на част от енергията в акумулаторни батерии. В процеса на експлоатация батериите се намират в различни режими – разреждане и зареждане, подзаряд и изравнителен заряд, които следва да бъдат изследвани [1]. Настоящите модели представят поведението на акумулаторни батерии в режим на разреждане.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. Състояние на проблема

Съществуват различни математични модели, които описват поведението на акумулаторна батерия. Моделите се различават, както по тип, така и по степен на сложност. Изборът на адекватен модел зависи от необходимата точност, желаното изчислително време, наличния изчислителен ресурс и възможността за следене изменението на ключови параметри на батерията. Представени са два модела, различаващи се по степен на сложност и по броя на изходните параметри.

3. Типове математически модели на акумулаторна батерия

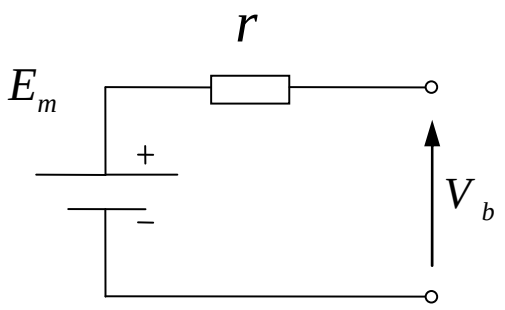
Съществуват различни типове модели за определяне на състоянието на батерията като се наблюдава поведението и по време на разрядните цикли. Те са съответно:

- **Електрохимични модели -** изучават се химичните реакции, които протичат при контакта на проводник на електрони (метал) и проводник на йони (електролит). Тези реакции включват трансфер на електрони между електродите и електролита. Поведението на батерията зависи не само от това, как се използва батерията, но и от определен брой конструктивни фактори като дебелината на плочите, плътността на активната маса, концентрацията на киселина, геометрията на електродите. Електрохимичният модел е насочен основно върху окислително – редукционните реакции между електрода и електролита.
- **Физични модели -** при този вид модели се използва метода на крайните елементи за числено намиране на решение. Използват се частни диференциални и интегрални уравнения.
- **Модели, ползващи електрически еквивалентни заместващи схеми -** използват се електрически еквивалентни схеми с различна степен на сложност, съдържащи пасивни, линейни и реактивни нелинейни, елементи, които представят динамичното изменение на параметрите на батерията.

В настоящата работа са изследвани модели с електрически еквивалентни заместващи схеми. Представени са два модела от този вид - опростен и усъвършенстван.

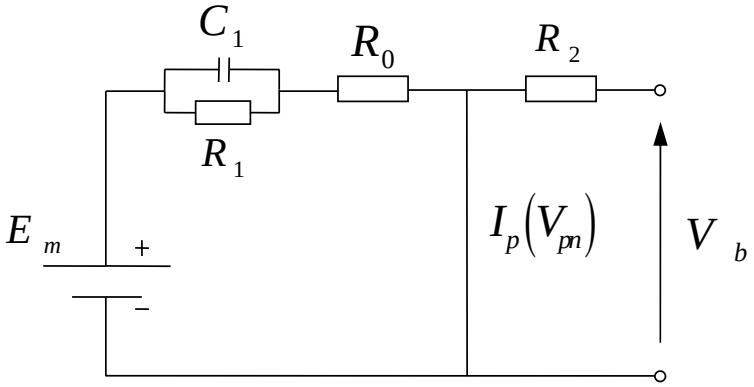
4. Математически модели на акумулаторна батерия с електрически еквивалентни заместващи схеми

Опростеният модел се състои от идеален източник на напрежение E_m, представящ електродвижещата сила на батерията и свързано последователно съпротивление r, представящо вътрешното съпротивление (фиг.1). V_b е напрежението на изводите на батерията. Този модел е прост и може да се използва за груби, ориентировъчни изчисления. Усъвършенстваният модел на батерия отразява основните динамични изменения, възникващи в една батерия и същевременно не изисква голямо изчислително време, което го прави приложим в анализа на бавните преходни процеси.



Фиг.1. Еквивалентна заместваща схема на батерия- опростен модел

Неговата еквивалентна заместваща схема е показана на фиг.2. Схемата се състои от променлив източник на напрежение (E_m), променливи съпротивления, отчитащи вътрешното съпротивление и съпротивлението, възникващо при пренапрежение, както и идеален кондензатор, представящ капацитета на батерията. Характерно за тази заместваща схема е, че не се отчита саморазряда на батерията, тъй като в съвременните технологии той е пренебрежимо малък при режим близък до цикличния, в който най-често работят автономните и хибридните микро електроенергийни системи.



Фиг.2. Еквивалентна заместваща схема на батерия- усъвършенстван модел

Друга характеристика на тази схема е добавянето на паралелен клон. Този клон отчита загубите, които възникват при заряд на батерията, например поради частична електролиза на водата и непълна рекомбинация. Клонът се нарича паразитен и неговото действие се отчита само при заряд на батерията. Токът в паразитния клон е функция на напрежението на клона V_{PN}, моделирайки по този начин нелинейния му характер. Други параметри, които се моделират са:

- **Капацитет** - Капацитетът на една батерия не е фиксирано количество, а се променя в зависимост от това, колко бързо се разрежда батерията. Законът, с който се определя това изменение е известен като закон на Peukert [2]:

$$C_P = I^k t \tag{1}$$

където C_P - капацитета на батерията при разряден ток 1 A; I - разряден ток, A; t - време за разряд, h; k - константа на Peukert; за оловно-кисели батерии има стойност в границите $1{,}1 \div 1{,}3$. Уравнението за пресмятане на капацитета в зависимост от разрядния ток е изведено като са използвани горните зависимости и след определен брой експерименти [3,4,5]:

$$C_P(I) = \frac{K_C C_{0^*}}{1 + (K_C - 1)(I / I^*)^m} \tag{2}$$

където $C_{0^*} = C_0(I^*)$ - капацитет при разреждане с нормирания разряден ток; обикновено номиналния капацитет C_{10}; K_C - емпиричен коефициент; за оловно-кисели батерии има стойност 1,18; m - емпиричен коефициент, равен на 1,2.

Недостатък на уравнението на Peukert е, че при пресмятане на капацитета на батерията за много малки разрядни токове, този капацитет се получава по-голям от действителния. Този недостатък може да се избегне чрез ползването на уравнение (3), в което се отчита същевременно и влиянието на температурата на клетката върху капацитета на батерията:

$$C(I, \Theta) = C_0(I)\left(1 + \frac{\Theta}{-\Theta_f}\right)^{\varepsilon} \tag{3}$$

където θ_f - температура на замръзване на електролита $\theta_f = -40^oC$; θ - температура на клетката; $C_0(I)$ - капацитет на батерията при разряд с ток I и температура 0^oC; $\varepsilon = 1,29$ - константа. Замествайки (3) в (2) за капацитета $C(I,\theta)$ се получава:

$$C(I, \Theta) = \frac{K_C C_{0^*}\left(1 + \frac{\Theta}{-\Theta_f}\right)^{\varepsilon}}{1 + (K_C - 1)(I / I^*)^m} \tag{4}$$

- **Ниво на заряд и дълбочина на заряда**

При усъвършенстваният модел на батерия за номинален капацитет може да се използва капацитета $C(0,\theta)$, а за действителния капацитет - $C(I_{avg},\theta)$. Следователно за нивото на заряда SOC и дълбочината на разряда DOC се получава:

$$SOC = 1 - Q_e / C(0,\theta) \tag{5}$$

$$DOC = 1 - Q_e / C(I_{avg},\theta) \tag{6}$$

където $Q_e(t) = \int_0^t I(\sigma)d\sigma$ е зарядът, изразходен от батерията; $C(0,\theta)$ - номинален капацитет на батерията; $C(I_{avg},\theta)$ - действителния капацитет на батерията при определен разряден ток.

- **Електродвижещо напрежение**

Електродвижещото напрежение на батерията, моделирано от E_m на фиг.2, е разликата между потенциалите на двата електрода. Когато батерията се зарежда или разрежда, плътността на електролита се променя, следователно електродвижещото напрежение се променя в зависимост от промяната на нивото на заряд. Връзката между двете е правопропорционална – с повишаване на нивото на заряд се увеличава и електродвижещото напрежение. То може да бъде представено с уравнението:

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC) \tag{7}$$

където E_{m0}, K_E - константи за батерията; θ - температура на клетката.

- **Вътрешно съпротивление на батерията**

Съпротивленията, представени на фиг.2, могат да бъдат пресметнати чрез следните зависимости:

$$R_0 = R_{00}\left[1 + A_0\left(1 - SOC\right)\right] \tag{8}$$

$$R_1 = -R_{10}\ln\left(DOC\right) \tag{9}$$

$$R_2 = R_{20}\frac{e^{\left[A_{21}(1-SOC)\right]}}{1+\exp\left(A_{22}I_m / I^*\right)} \tag{10}$$

където A_0, A_{21} и A_{22} са константи за всяка батерия, а R_{00}, R_{10} и R_{20} са параметри свързани със състоянието на здравето SOH. При този модел съпротивлението R_{20} може да се приеме за равно на нула, когато батерията се разрежда.

5. Реализация на моделите

Представените модели са реализирани програмно в средата на Matlab като модул, интегриран към програмата STATUS за статичен и квазидинамичен анализ на електроенергийни системи. Предвид обектно-ориентираният подход, използван при програмната реализация, моделът може да бъде ползван и от други Matlab- базирани приложения.

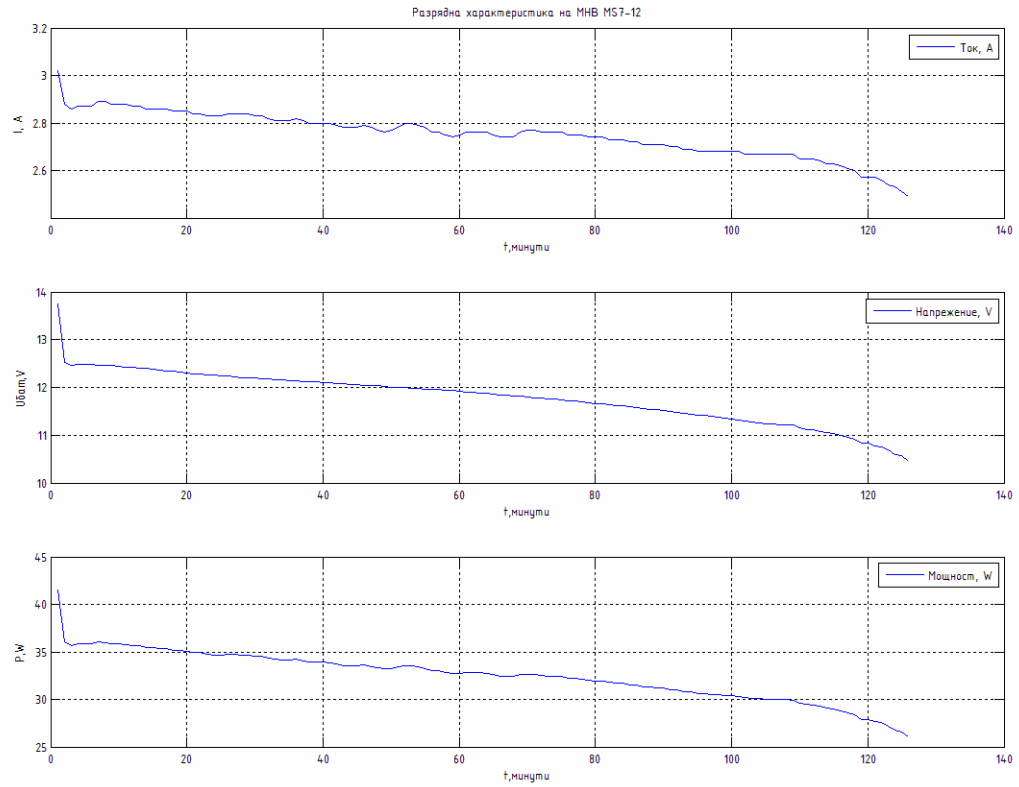
6. Валидация на модела

Направена е валидация на разгледаните модели чрез снемане на разрядната характеристика на акумулаторна батерия в лабораторни условия. Използвана е оловно- кисела батерия модел МНВ MS7-12. При снемане на разрядна характеристика на батерия, първоначално тя е заредена до максималния си капацитет. При разреждането са отчетени разрядния ток I, A, разрядното напрежение на батерията U, V и температурата на околната среда $Ta, ^{o}\mathrm{C}$. Анализът на резултатите почива на сравнение между експериментално снетите разрядни параметри и аналитично получените резултати от математичните модели. Разрядът започва от напрежение 12,52 V в заредено състояние и завършва при напрежение 10,45 V (1,74 V/клетка), което е максимално допустимото разрядно напрежение, посочено от производителя (фиг.3). За определяне на параметрите, използвани в усъвършенствания модел, са използвани методите посочени в [3]. Те имат стойности съответно (табл.1):

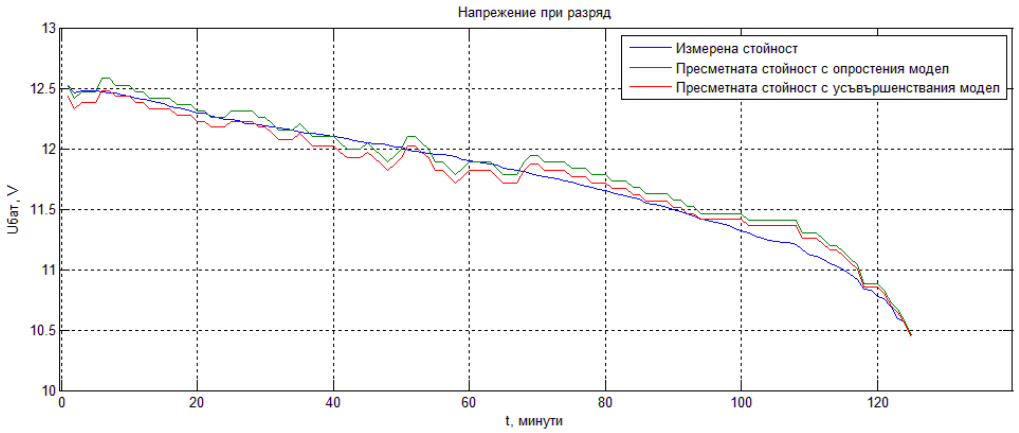
Табл.1. *Изчислителни параметри на усъвършенствания модел*

Параметър	K_c	δ	ε	K_e	R00	R10
Стойност	1,18	1,2	1,29	0,0001	0,5943	0,0224

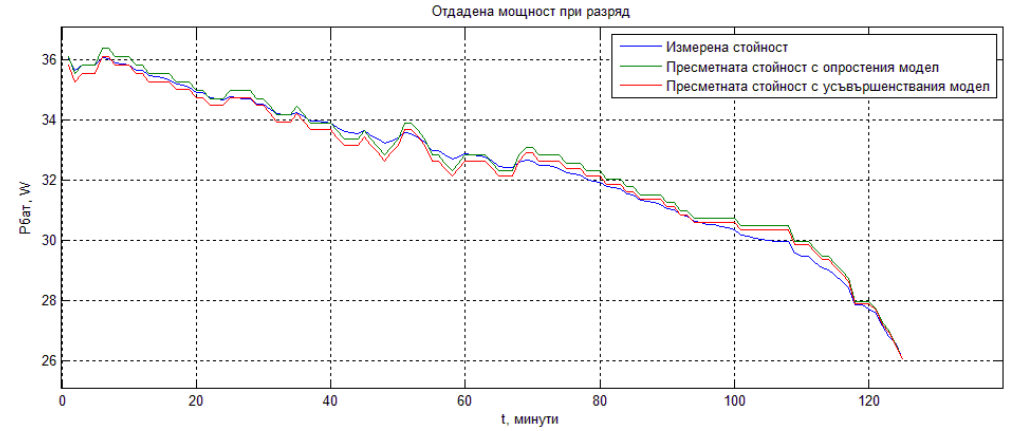
На фиг.4. е показана графиката на измереното и пресметнатото разрядно напрежение във функция от времето, получени чрез опростения и усъвършенствания модел. На фиг.5 е показано изменението на мощността във функция от времето. В края на разрядния период мощността намалява пропорционално на понижението на тока, който батерията отдава.



Фиг.3. Разрядна характеристика на MHB MS7-12



Фиг.4. Графика на изменение на напрежението при разряд



Фиг.5. Графика на отдадена мощност във функция от времето при разряд

Разликите между измерените и пресметнатите параметри са обобщени в табл.2. Усъвършенстваният модел предлага по- малка максимална абсолютна, относителна и интегрална грешка и съответно по- висока точност.

Табл.2. *Грешки на моделите*

	Максимална абсолютна грешка, V	Максимална относителна грешка, %	Относителна интегрална грешка, %
Модел 1 (опростен)	0,2016	1,7980	0,5005
Модел 2 (усъвършенстван)	0,1931	1,7758	0,2356

7. Заключение

Представени са модели на оловно-кисели батерии. Полученият резултат от валидацията показва задоволителна адекватност. Моделите може успешно да се използват, както при анализа на установените режими и бавните динамични процеси в разпределителните мрежи, така и при анализа на автономните, островни микромрежи.

След допълнителна обосновка, представеният усъвършенстван математичен модел може да бъде използван и за стратегиите за енергийно управление на разпределителни и автономни хибридни микро-мрежи.

Благодарности

Авторите изказват своята благодарност към Европейстака комисия за подкрепата в рамките на проекта DERri GA No 228449 по FP7 *http://www.der-ri.net*. Авторите са единствено отговорни за съдържанието на тази публикация. Тя не представя мнението на Европейската комисия и Европейската комисия не е отговорна за никое приложение, което може да е направено от данните показани в нея.

Acknowledgement

The authors thank the European Commission for the support from the FP7 project DERri GA No 228449 see also *http://www.der-ri.net*. The authors are solely responsible for the content of this publication, it does not represent the opinion of the European Community and the European Community is not responsible for any use that might be made of data appearing therein.

Литература

[1] Иванов М., Р. Станев, Я. Тодоров, Д. Стоилов и др., ***Статична устойчивост на електропровод средно напрежение с присъединени вятърни генератори***, Годишник на ТУ- София, Том 60 кн.1, 2010 г.

[2] D. Doerffel, S.A. Sharkh, ***A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead–acid and lithium-ion batteries***, Journal of Power Sources, 155 (2006) 395–400

[3] Guo, S., ***The Application of Genetic Algorithms to Parameter Estimation in Lead-Acid Battery Equivalent Circuit Models***, University of Birmingham, May 2010

[4] Al-Qasem, O., ***Modeling and Simulation of Lead-Acid Storage Batteries within Photovoltaic Power Systems***, PhD Thesis An-Najah National University, 2012

[5] Moubayed, N., Janine Kouta, ***Parameter Identification of the Lead-Acid Battery Model***, Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC'08. 33rd IEEE

Автори: д-р инж. Рад Станев - главен асистент, катедра „Електроенергетика" (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *rstanev@tu-sofia.bg;* инж. Мартин Райков, катедра „Електроенергетика" (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** гл. ас. д-р инж. Л. Стоянов

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ДЪГА

Росен Танев, Валентин Матеев, Илиана Маринова

Резюме *В статията се моделира постояннотокова и променливотокова електрическа дъга. Създаденият модел се използва за определяне на статичните и динамичните характеристики на дъгата при захранване с ниско напрежение. Симулацията на процесите е изпълнена чрез свързан модел на електрическото поле и модел на електрическа верига. Съпротивлението на дъгата се определя с уравнението на Айртон, като стойността на съпротивлението зависи от тока, разпределението на електрическото поле, разстоянието между електродите, материала от който са направени и др. Разпределението на електрическото поле около електродите се изчислява чрез метод на крайните елементи. Динамичните характеристики на променливотокова дъга са симулирани в съответствие с параметрите на изследваната електрическа верига. За проверка на модела и определяне на характеристиките на дъгата е използвана компютърно - експериментална постановка.*

Ключови думи: *електрическа дъга, статични и динамични характеристики на дъга, компютърно моделиране, метод на крайните елементи*

ELECTRIC ARC DICSCHARGE MODELING

Rosen Tanev, Valentin Mateev, Iliana Marinova

Abstract: *This paper considers simulation of DC and AC electrical arc discharge for acquiring the steady-state and dynamic arc characteristics of two electrodes system in low voltage. The simulation process couples together electric field model and electric circuit model. Arc resistance in the model is calculated by Ayrton equation and depends by: current, electric field distribution, distance between electrodes, material of the electrode etc. Electric field distribution is calculated by finite element method. Dynamic and steady-state arc discharge characteristics are simulated according to electric circuit parameters in modeled system. Computer aided experimental set-up is used for arc characteristics measurements and model verification.*

Keywords: *Electrical arc discharge, steady-state and dynamic arc characteristics, computer modeling, finite element method, arc resistance*

1. Introduction

Electric arc discharge is widely used in industrial processes as welding, plasma cutting, electrical discharge machining, arc lamps, arc furnaces for production of steel

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

and other substances etc. Arcing in contact systems of electrical apparatus is unwanted event.

Electric arc depends on plenty of physical phenomena which appear in a very short time. Because of that deep understanding of the processes in the electric arc burning is required in order to achieve effective and energy saving industrial technologies. These could be done by electric arc discharge modeling and simulation. Developing of precise models allows us to obtain the evolution of electric arc properties and characteristics, which are difficult to measure in laboratory tests. Furthermore, simulations could help to reduce the time for design and optimization of electric equipment and devices.

Electric arc models could be classified in three categories: black box models, physical models and parametric models.[1-8] In black box models, the arc is described by mathematical equations and the relation between the arc conductance and measurable parameters, such as arc voltage and arc current. The classical black box models are the Mayr model and the Cassie model. Physical arc models are based on the equations of fluid dynamics and obey the laws of thermodynamics in combination with Maxwell's equations. Parametric models simplify the description of the behavior of spatially distributed physical systems into topology consisting of discrete entities. Parametric models makes simplifying accession of the circuit attributes into idealized electrical components.

This paper presents modeling of electric arc discharge characteristics. Combination of electric circuit model and field model of the arc discharge of graphite electrode system is built and used to obtain the arc characteristics. This combination is made by Software package Femm in Matlab/Simulink environment. Arc resistance is calculated by Ayrton equation and depends on current, electric field distribution and distance between electrodes etc.

Dynamic model of the electric arc discharge is a good basis for research and accurate characteristic determination in power supply circuits. This model simplifies the process of acquiring the characteristics of the arc for different variables such as circuit parameters, environment, materials and power sources, and allows quick and easy analysis. Environment of Matlab/Simulink provides a wide range of opportunities for further improvement of the already established model. Exploring other variable parameters of arc discharge will allow us to achieve more complex virtual test system, for monitoring the behavior of the arc etc.

2. Modeling of electric arc discharge

A coupled dynamic circuit model and electric field model of AC and DC electric arc in graphite electrode system is built and implemented. Created model is used to acquire the steady-state and dynamic arc characteristics of the arc. The scheme and dimensions of the system are presented in Fig. 1, where ℓ is controlled distance between the electrodes. Electrodes are made of graphite with cylindrical base body and a conical tip. Electric circuit under investigation is shown in Fig.3 and measurement setup outlook is presented in Fig.4.

Development of the dynamic electric arc model is divided into four major stages. First stage is electric field modeling of electrode system. Electric arc finite element method

model is built using Femm/Lua script. The current distribution in the space between two electrodes is obtained by solving the electric field problem. Second stage is related to building the electric circuit model of the system in Matlab/Simulink environment. The third stage corresponds to calculate arc resistance with Ayrton equation in Matlab. The fourth corresponds to coupling of the two models, of the electric circuit and field model, and determination the arc characteristics

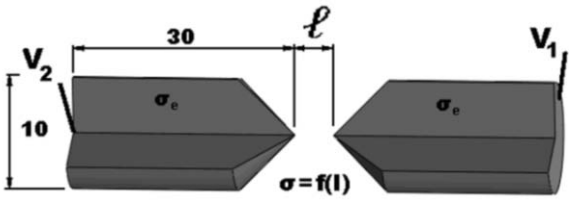


Fig.1. Two electrodes system

Electric Field Model

Electric field distribution between two electrodes is governed by the Laplace equation Eqn.1, with respect to electric scalar potential V

$$\nabla(\sigma\nabla V) = 0, \tag{1}$$

where σ is electrical conductivity between electrodes, i.e. the electric discharge conductivity Fig.5.

The electric field E is expressed by Eqn.2.

$$E = -\nabla V. \tag{2}$$

Determination of the electric scalar potential V allows adjusting the current by setting the potential at the anode to the appropriate value of the total voltage.

Electric field distribution and electric field intensity calculated by Femm are shown in Fig.2.

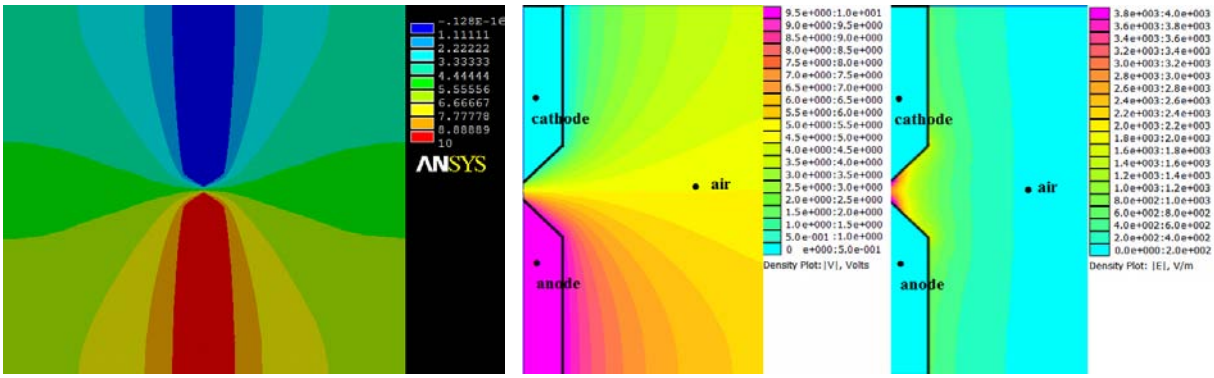


Fig.2. Electric field and electric field intensity

Boundary conditions are applied as fixed electric potentials with constant values. Cathode and anode voltages are respectively $V_1 = 0$ and $V_2 = U$, where U is total supply voltage.

Electric Circuit Model

Electric circuit model correspond to experimental setup shown in Fig.3. This model is applied to observe and acquire dynamic and steady-state arc characteristics.

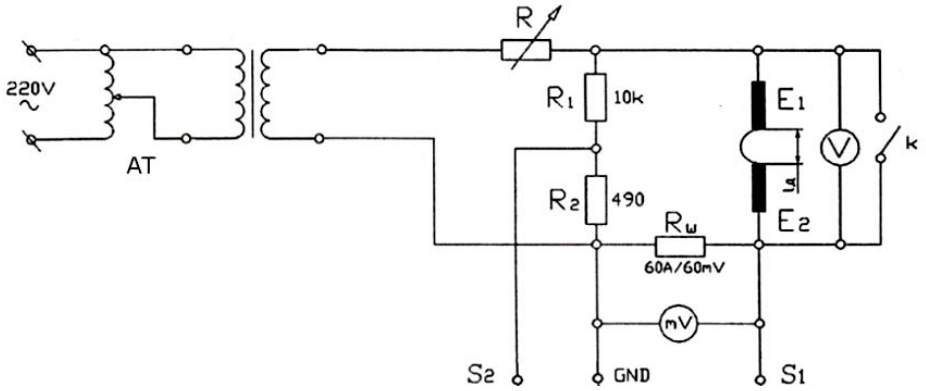


Fig.3. System electric circuit

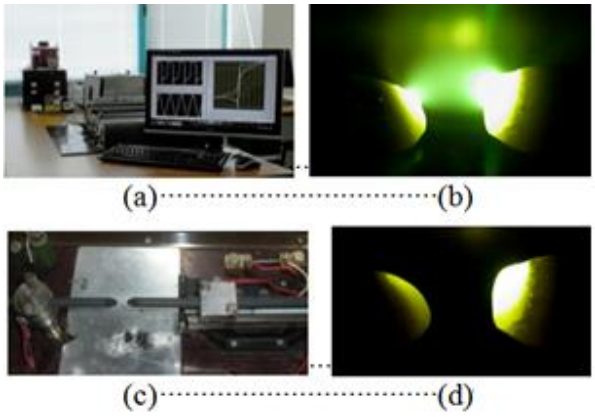


Fig.4. Measurement setup outlook and photos of the arc burning process

Electric circuit equation for the arc system Eqn.3

$$L\frac{di}{dt} + Ri(t) - U_m \sin(\omega t + \varphi) = 0, \tag{3}$$

where $U_m \sin(\omega t)$ is the instantaneous value of the supply voltage,

φ - phase angle;

R - circuit resistance;

$i(t)$ - instantaneous value of the current;

L – circuit self-inductance.

Eqn.3 for the electric circuit model is solved in Matlab/Simulink environment Fig.8. ODE45 is used to solve linear or non-linear differential equations. This is done with a 4th and 5th order Runge-Kutta method to integrate the equations. [11]

Arc resistance

Arc resistance in the model is obtained by Ayrton equation [8, 9].

The classical Ayrton equation according to arc voltage is given as:

$$U_d = a + bl_d + \frac{c + dl_d}{i}, \tag{4}$$

where U_d -the electrical arc discharge voltage; *a, b, c, d* are physic constants depend on materials of the electrodes, as shown in Table 1 [8]; *a* - anode/cathode voltage drop; *b* - voltage gradient; *c*- electric power coefficient; *d*– coefficient which corresponds to power change over the arc length; l_d - air gap length.

Table 1

Value of Ayrton equation constant for different materials

Electrodes	a, V	b, V/mm	c, VA	d, VA/mm
Coper	21,4	3,0	10,7	15,2
Carbon	**39**	**2,1**	**11,7**	**10,5**
Iron	15,7	2,5	9,4	15
Silver	14,2	3,6	11,4	19

The current density at the cathode is practically independent of the arc current, but it is strongly dependent on the electrode material. In refractory materials that have a high boiling point, such as carbon, tungsten, or molybdenum the cathode spot is observed to be relatively fixed. [8]

Arc resistance is obtain by Eqn.5,

$$Rd = \frac{(a + bl - U)^2}{4(c + dl)}. \tag{5}$$

Arc resistance is non-linear and depends on a number of variables: gap length, electrode materials, arc current magnitude, electrode configurations etc.

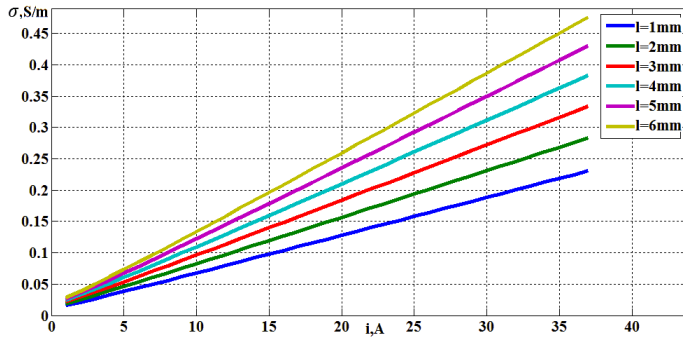


Fig.5. Electrical conductivity characteristic

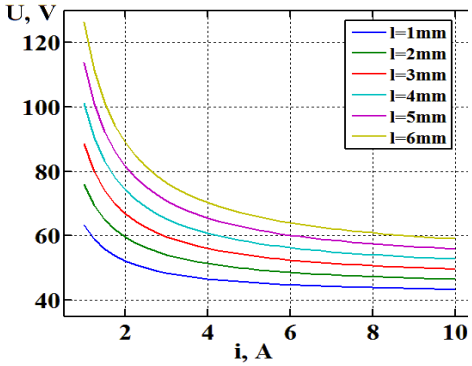


Fig.6. Steady-state characteristic

Subordination between arc resistance and conductivity is used to acquire electrical conductivity characteristic shown in Fig.5 using Matlab. Fig 6 illustrate steady state characteristic obtained in Matlab.

3. Circuit and field coupling

Multiphysics field and electric circuit coupling is made with Finite Element Method (Femm) software package v4.2 [9], controlled by Octave/Lua interface and electric circuit model is made in Matlab/Simulink environment. Block structure of proposed model coupling is shown in Fig.7.

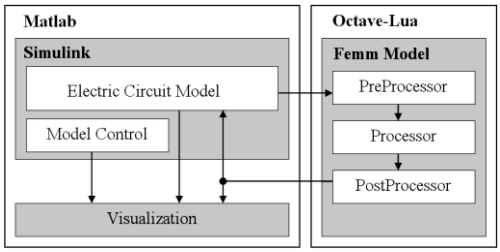


Fig.7. Block structure of model coupling

Octave/Lua interface is a Matlab toolbox that allows the operation of Femm via a set of Matlab functions. The syntax of the Octave-Femm toolbox closely mirrors that of Femm's existing Lua scripting language interface associated with Femm. However, there are some differences between the Lua functions and the analogous Octave/Matlab implementations. [10, 11]

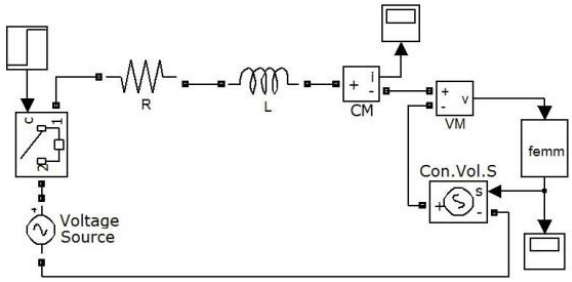


Fig.8. Circuit model

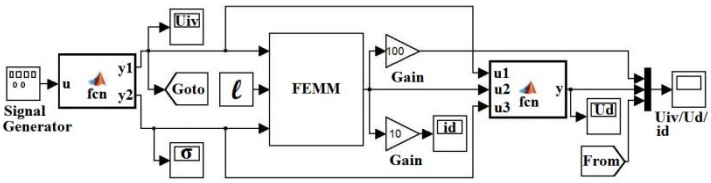


Fig.9. Circuit and electric field model

Fig.8 illustrates electric circuit model of arc created in Matlab/Simulink. This model corresponds to power electric circuit Fig.3. Connection between electric field model in Femm and circuit Simulink model is shown in Fig.9. Coupled model includes signal generator which sends values of the supply voltage to Femm. Conductivity is calculated through Matlab, distance between electrodes is given with value in block "ℓ". Current is outcome results of Femm block, which values depends by input parameters send to block entrance. Final results are observed in oscilloscope block. [12]

4. Results

Analyzed power electric circuit parameters are: variable resistance R (0 ÷ 20 Ω), variable voltage U (0 ÷ 250 V) and self-inductance of 10mH. Those parameters are taking into account in creation of coupled model.

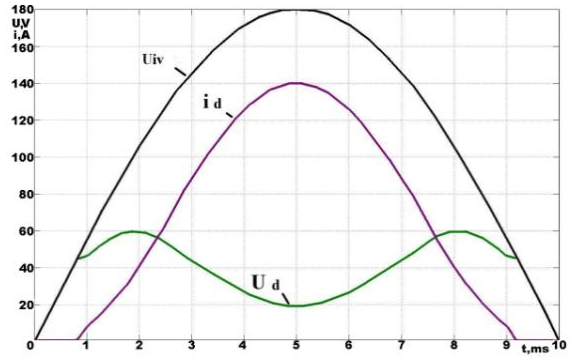


Fig.10. Arc characteristics of current and voltage

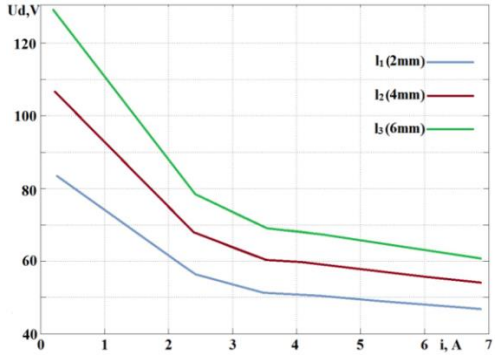


Fig.11. Steady-state arc characteristic

Characteristics acquire by coupled model are respectively shown in Fig.10 and Fig.11. Fig.10 illustrates dynamic arc characteristics of current and voltage in function of time. Steady-state arc characteristic acquire by coupled model is shown in Fig.11.

Computer aided experimental set-up is used for arc characteristics measurements and model verification. For acquiring of the next four characteristics is used experimental setup shown in Fig.3.

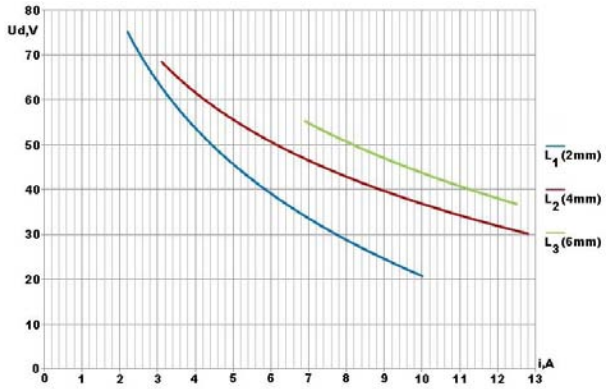


Fig.12. Steady-state arc characteristic.

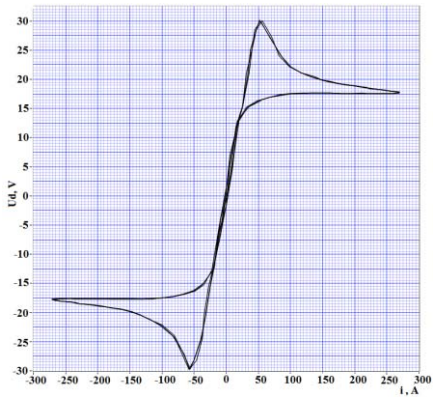


Fig.13. Dynamic V-A characteristic.

Fig.12 shows a steady-state characteristic of current in function of voltage for different distances between two electrodes. For experimental determination of the dynamic characteristics Fig.13, a measuring device National Instrument USB-6008 is used. For this purpose we use the voltage drops by the shunt resistor $R_{ш}$ and R_2 of the voltage divider R_1-R_2, for measuring the arc current and voltage according to Fig.3.

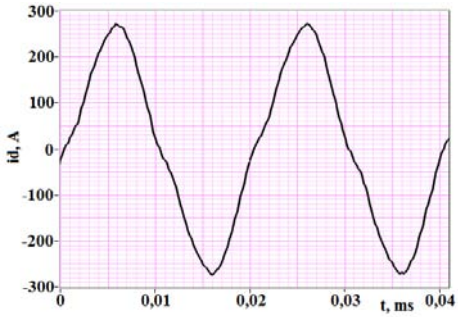


Fig.14. Current discharge characteristic.

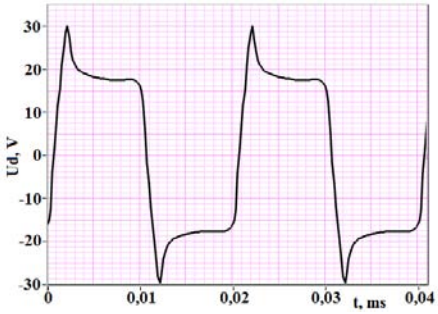


Fig.15. Voltage discharge characteristic.

Fig.14 and Fig.15 show the experimental characteristics of voltage and current as function of time.

5. Conclusion

This paper considers simulation of DC and AC electrical arc discharge for acquiring steady-state and dynamic arc characteristics in low voltage. The simulation process couples together electric field model and electric circuit model. Arc resistance in the model is calculated by Ayrton's equation. Coupled model uses high computational capabilities of Matlab/Simulink and Femm program with Lua-script and Octave interface. The finite element method is applied for modeling of electric field and determination of current in counter between the electrodes. FEM allows taking into account the actual geometry of the observed area, which create the field and increase the accuracy when solving the problem. Power electric circuit and coupled model are used for observation and acquiring characteristics of electric arc. The characteristics acquiring by the coupled model are closely related to the characteristics obtained by the experimental setup. Created model is capable to reduce the time for development and research of arc using equipment. Developed models allow obtaining the evolution of arc properties and behavior which are difficult to measure in laboratory tests. Some modification of the model can increase the accuracy of static and dynamic character-

istics. Future model will take into account other processes such as arc burning, thermal effects, ionization, moving of the arc etc.

References

[1] W. Tarczynski, T. Daszkiewicz, **Switching arc simulation**, Vol. R. 88 nr 7b, Wydawnictwo SIGMA-NOT, 2012, pp. 60-64

[2] A. Iturregi, E. Torres, **Analysis of the Electric Arc in Low Voltage Circuit Breakers**."OCREPQ'11, Las Palmas de Gran Canaria, April 2011

[3] V. Logar, D. Dovzan, I. Skrjanc, **Mathematical Modeling and Experimental Validation of an Electric Arc Furnace**, ISIJ International, Vol. 51, No. 3, pp. 382-391, 2011

[4] L. Ghezzi, A. Balestrero, **Modeling and simulation of low voltage arcs**, Delft University of Technology, 2010

[5] L. Sluis, **Transients in Power System**, John Wiley & Sons LTD, 2001

[6] A. Alexandrov, **Computer aided design of electrical apparatus**, Avangard, 2004.

[7] H. Ayrton, **The electric arc**, New York: D. Van Nostrand Co, 1902.

[8] A. Alexandrov, I. Yatchev, **Electrical apparatus part II**, Avangard, 2010.

[9] D. Meeker, **Finite element method current flow**, Version 4.2, User's manual, 2009

[10] D. Meeker, **Finite element current flow: Octave/Femm**, Version 1.2, User's manual, 2009

[11] Matlab Inc, **The Language of Technical Computing**, MATLAB Graphics Reference, 2006

[12] R. Tanev, V. Mateev, I. Marinova, **Coupled field and circuit modeling of electric arc discharge**, Coupled field and circuit modeling of electric arc discharge, 7th International PhD Seminar on Computational electromagnetics and bioeffects of electromagnetic fields – CEMBEF, Niš, Serbia, pp 71-74, 28-31 August 2013

Автори: Росен Танев, маг. инж., докторант, катедра „Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *rtanev@tu-sofia.bg*; Валентин Матеев маг. инж. ас., катедра „Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vmateev@tu-sofia.bg*; Илиана Маринова, проф. дтн. инж., катедра „Електрически апарати" Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *iliana@tu-sofia.bg*

Постъпила на: 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р К. Хинов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ ЗАХРАНВАЩА БИТОВИ КОНСУМАТОРИ В ЗАТВОРЕН ЖИЛИЩЕН КОМПЛЕКС

Светлана Цветкова

Резюме: *В доклада са дадени и анализирани резултати от изследване на качеството на електрическата енергия захранваща битови консуматори в затворен жилищен комплекс. Периодът на изследване е една седмица. Нивата на хармониците на тока не отговарят на стандарта БДС IEC 61000-3-4. Нивата на фликера надвишават допустимите норми на стандарта БДС EN 50160.*

Ключови думи: *битов консуматор, качество на електрическата енергия, хармоници.*

STUDY OF THE ELECTRICAL ENERGY QUALITY SUPPLIED DOMESTIC CONSUMERS IN CLOSED HOUSING ESTATE

Svetlana Tzvetkova

Abstract: *The results from study of the electrical energy quality supplied domestic consumers in closed housing complex are given in the paper. The obtained results for electrical energy quality indexes are analyzed. The study period is one week. The current harmonics are over the levels given in BDS IEC 61000-3-4. The measured values of flicker are over admissible norms given in BDS EN 50160.*

Keywords: *domestic consumer, electrical energy quality, harmonics.*

1. Въведение

Днес, в бита масово се използват консуматори с нелинейна V-A характеристика, които влияят върху качеството на електрическата енергия на захранващата мрежа. Такива консуматори са: аудио и звуково обзавеждане, халогенни и компактни луминесцентни лампи, регулатори на светлинния поток, миксери и режещи инструменти, хладилници и фризери, микровълнови печки, прахосмукачки, перални машини, съдомиялни машини, компютри, помпи, малки електрически двигатели. От друга страна, нормалната работа на самите консуматори зависи от качеството на електрическата енергия на захранващата мрежа. Влошеното качество на електрическата енергия може да причини смущения или повреди в електрическите уреди и съоръжения, които да имат тежки икономически последици или дори да са опасни за хората [1].

Осигуряването и поддържането на качеството на електрическата енергия е основно задължение на електроснабдителната компания. Потребителите са в пра-

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

вото си да изискват и да получават качествена електрическа енергия, но те трябва да имат и задължението чрез своите консуматори и режимите има на работа да не влошават показателите за качество на електрическата енергия в електроснабдителната система.
В доклада са дадени и анализирани резултати от изследване на качеството на електрическата енергия захранваща битови консуматори в затворен жилищен комплекс.

2. Характеристика на обекта на изследване

Комплексът включва многофамилни, еднофамилни и редови къщи, собствен парк, търговска зона и офисни площи. Еднофамилните къщи са с квадратура от 250 до 450 m^2, 3 до 6 спални, 4 до 6 бани и сервизни помещения, минимум едно подземно паркомясто и допълнителни открити паркоместа за посетители. Редовите къщи са с квадратура с от 180 до 280 m^2 и самостоятелен зелен двор за барбекю. Те са с 4/5 спални, 4/5 бани и паркоместа за един или два автомобила. Многофамилните къщи имат 6 до 8 апартамента, всеки с 1 до 3 спални и 1 до 3 бани. Размерите на апартаментите варират от 80 до 200 m^2. Подземните нива на отделните многофамилни сгради в един квартал са свързани с топла връзка. Всяка жилищна единица - апартамент е обезпечена с минимум едно подземно паркомясто.
Обект на изследване са многофамилните къщи. Всички електрически консуматори в сградата се захранват от главно електромерно електрическо табло (ГРТ). Инсталираната мощност е 217 kW, 400V, а разчетната работна мощност е 141 kW. ГРТ се захранва от табло НН на трафопост. Електрическата инсталация е изпълнена по схема TN-S. Всички апартаментни табла се захранват по радиална схема от ГРТ на сградата. Всички електрически консуматори в сутерена се захранват от шина “общи нужди” на ГРТ, където е предвидено търговско измерване на електрическата енергия, чрез трифазни двойнотарифни електромери. В гаража е предвидена смукателна инсталация (вентилатор 1kW, 400V монтиран в подпокривно пространство), която се захранва от самостоятелен токов кръг. Предвиден е извод 1kW, 400V за захранване таблото на автоматизирана гаражна врата.
В ГРТ е предвиден самостоятелен извод до табло TL1 (10kW, 400V) монтирано в гаража за захранване на отоплителна инсталация за топене на лед и сняг на рампата към гаража. В настилката на рампата се монтират нагревателни кабели със средна мощност на квадратен метър 175÷250W/m^2. В ГРТ на блока има извод до табло TL2 (3kW, 230V) за захранване и управление на ледотопителния контур в улуците на покрива.

3. Изследване на качеството на електрическата енергия

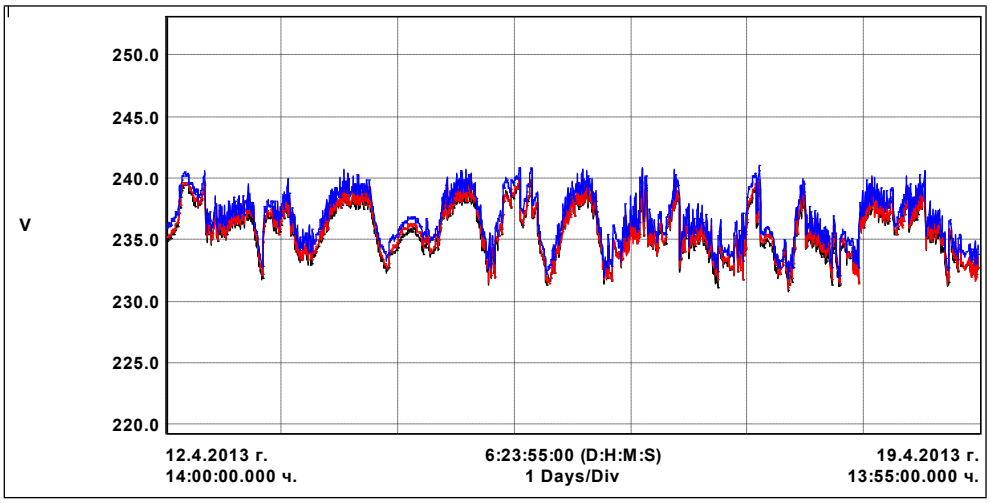
Измерванията са проведени с трифазен анализатор на качеството на електрическата енергия QUALISTAR C.A 8332. Уредът дава възможност за измерване, изчисляване, запис и анализ на всички електрически величини и показателите за качество на електрическата енергия, съгласно БДС EN 50160 [2]. Получената

информация от измерванията е обработена със софтуерите DataViewer Professional и Qualistar Viewer V2.
Жилищният блок се състои от осем самостоятелни апартамента с еднаква квадратура и разпределение на стаите. За контролна точка на провеждане на измерванията е избрано главното разпределително табло, което се намира във входното фоайе на блока. Измервателният уред е присъединен към трите фази на захранващия кабел, преди главния автоматичен прекъсвач. Измерванията се осъществяват чрез 3 броя ампер клещи и 3 броя сонди за напреженов сигнал. Периодът на измерване е 1 седмица - от 14:00:00 часа на 12.04.2013 г. до 13:55:00 на 19.04.2013 г. Захранващата мрежа е трифазна, петпроводна. Интервалът от време за осредняване на измерванията е 5 минути, в резултат на което се получават 2016 стойности за всеки от изследваните параметри.

- ***Честота на захранващото напрежение***

От записаните данни от уреда се вижда, че максималната стойност на честотата на захранващото напрежение за периода на измерване е 50.12 Hz, която е достигната през работен ден в 22:55 ч. Минималната стойност на честотата е 49.91 Hz, измерена в същия работен ден в 22:00 ч., а средната стойност е 50 Hz. Допустимите норми регламентирани в БДС EN 50160, са 49,5÷50,5Hz за 99,5% от годишен период или 47÷52Hz целогодишно. Следователно в 100% от случаите честотата на захранващото напрежение е в допустимите норми.

- ***Захранващо напрежение***



Фиг.1. Стойности на фазните напрежения

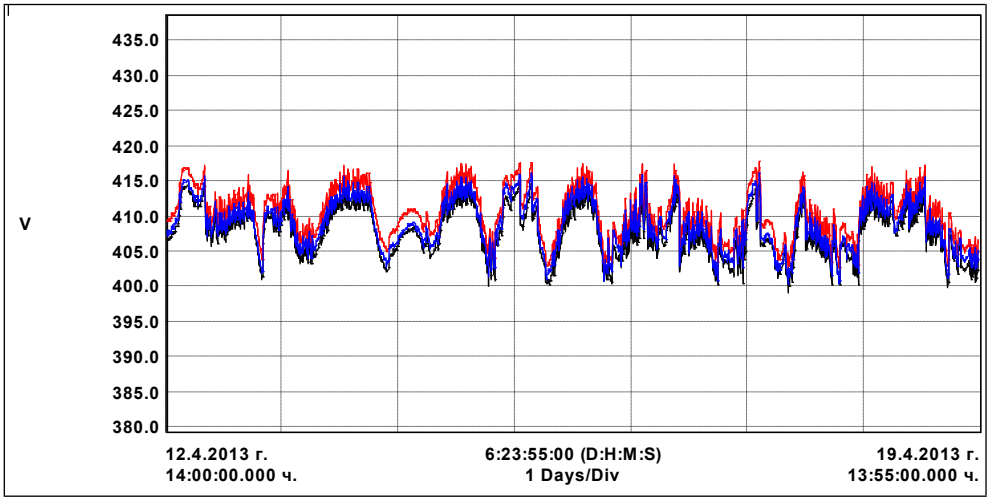
Една от важните компоненти на електрическата енергия е отклонението на напрежението, като се следят стойностите на фазните и линейните напрежения. За да се осъществява качествено и максимално използване на всички електрически съоръжения и домакински уреди е необходимо захранващото напрежение да е нормите, които се дават в наредбите и стандартите. Допустимите отклонения на напрежението, които са регламентирани в БДС EN 50160 са ± 10% $U_н$ за 95% от период една седмица, средна ефективна стойност за 10 минути. Стандартното фазно и линейно напрежение за обществени системи ниско напрежение е съответно 230V и 400V.
На фиг.1 е показано изменението на ефективните стойности на фазните напре-

жения. В табл.1 са дадени съответно минималната, максималната и средната стойност на фазните напрежения за периода на измерване. Средноквадратичното отклонение на фазните напрежения е съответно: $\sigma_{L_1} = 2{,}05\,\text{V}$, $\sigma_{L_2} = 2{,}06\,\text{V}$, $\sigma_{L_3} = 2{,}03\,\text{V}$.

Табл.1. Стойности на фазните напрежения

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
U, V	L_1	230,8	239,9	235,7
	L_2	231,0	240,1	235,9
	L_3	231,9	241,1	236,7

На фиг.2 е показано изменението на ефективните стойности на линейните напрежения. В табл.2 са дадени съответно минималната, максималната и средната стойност на линейните напрежения за периода на измерване. Средноквадратичното отклонение на линейните напрежения е съответно: $\sigma_{L_{12}} = 3{,}56\,\text{V}$, $\sigma_{L_{23}} = 3{,}55\,\text{V}$, $\sigma_{L_{13}} = 3{,}53\,\text{V}$.



Фиг.2. Стойности на линейните напрежения

Табл.2. Стойности на линейните напрежения

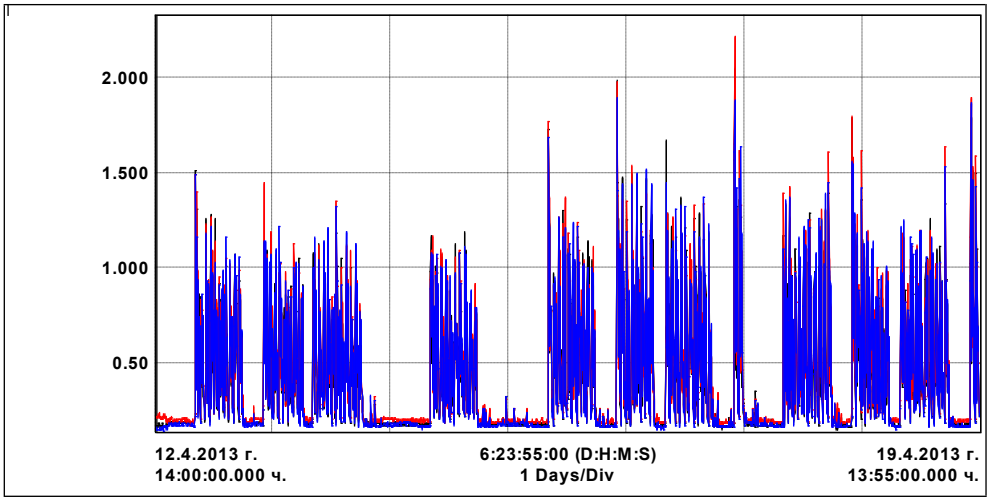
Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
U, V	L_{12}	399,2	415,0	407,8
	L_{23}	402,0	417,8	410,5
	L_{13}	400,4	416,1	408,8

Максималното отклонение на фазното напрежение е 4,3% за L_1, 4,4% за L_2, 4,8% за L_3, а на линейното напрежение е 3,8% за L_{12}, 4,5% за L_{23}, 4% за L_{13}.

От експерименталните данни се вижда, че стойностите на фазните и линейните напрежения за 100% от периода на измерване са в допустимия диапазон в $\pm 10\% U_H$ (от 207 до 253 V и от 360 до 440 V), регламентирани в БДС EN 50160.

Краткотрайни спадания и пренапрежения на захранващото напрежение не се наблюдават.

Краткотрайните изменения на напрежението се оценяват по стойността на фликера и неговата строгост за дълъг интервал от време P_{lt}. На фиг.3 е показано изменението на фликера за трите фази. В табл.3 са дадени минималната, максималната и средната стойност на фликера за отделните фази.



Фиг.3. Фликер

Табл.3. Стойности на фликера

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
$\mathbf{P_{lt}}$	L_1	0,15	2,05	0,40
	L_2	0,17	2,22	0,42
	L_3	0,14	1,90	0,41

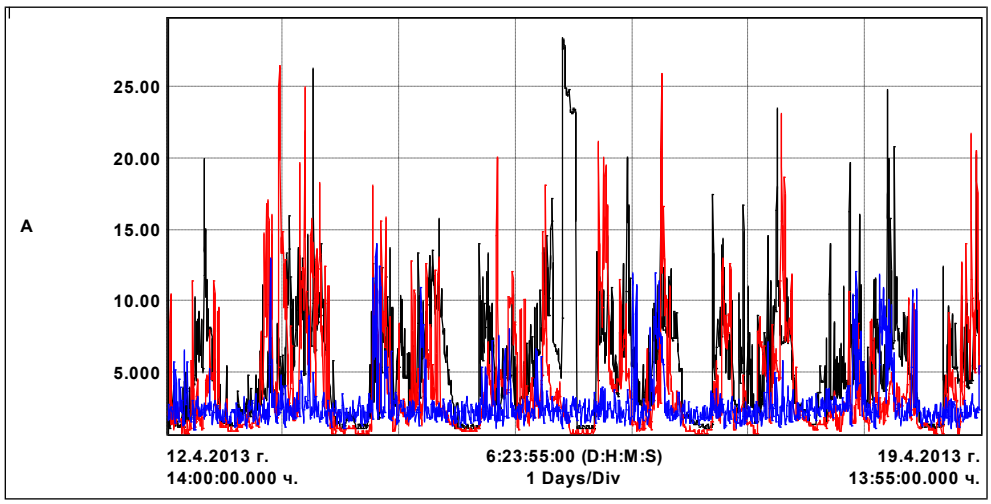
Вижда се, че в 6,7% (136 случая) за фаза L1, в 6,4% (129 случая) за фаза L2 и в 7,4% (150 случая) за фаза L3 измерените стойности на фликера са над допустимата стойност 1, нормирана в БДС EN 50160.

Следователно, стойността на фликера и за трите фази е извън допустимата норма (в 99,5% не трябва да надвишава 1), което е предпоставка за влошаването на качеството на захранващото напрежение и от тук нормалната и пълноценна работа на електрическите съоръжения в жилищния блок.

- ***Токове***

На фиг.4 е показано изменението на токовете в трите фази. Максималните стойности на тока в трите фази са: фаза L_1 28,4A; фаза L_2 26,5A; фаза L_3 14A.
Измерените средни стойности на токовете в трите фази са съответно: 5,62 A за фаза L_1; 4,05 A за фаза L_2; 2,79 A за фаза L_3.

От експерименталните данни се вижда, че токовете в трите фази са различни по стойности, като най-малко натоварена е фаза L_3. Причина за това е неравномерно използвания еднофазен товар.



Фиг.4. Ефективни стойности на фазните токове

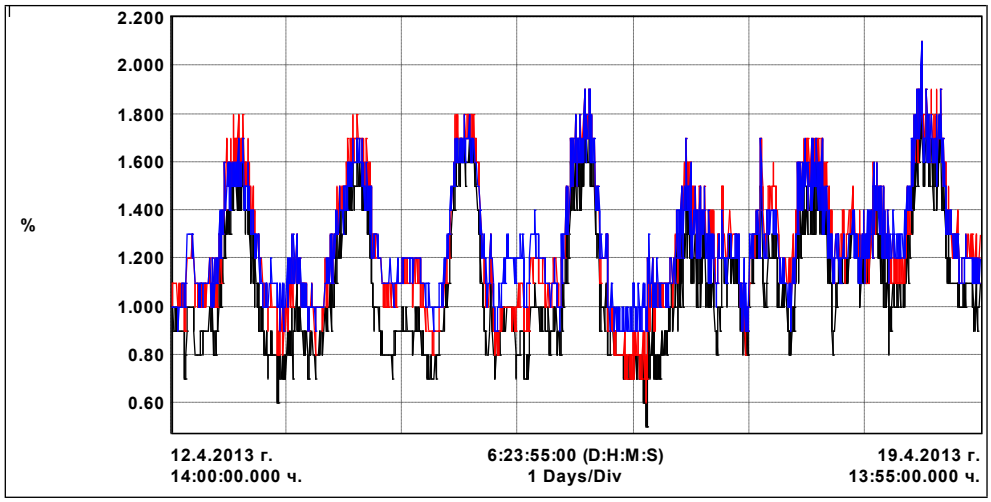
- ***Несиметрия на напрежението и токовете***

Максималната стойност на несиметрията на напрежението е 0,5% и е под допустимата стойност от 2% в 100% от времето на измерване.

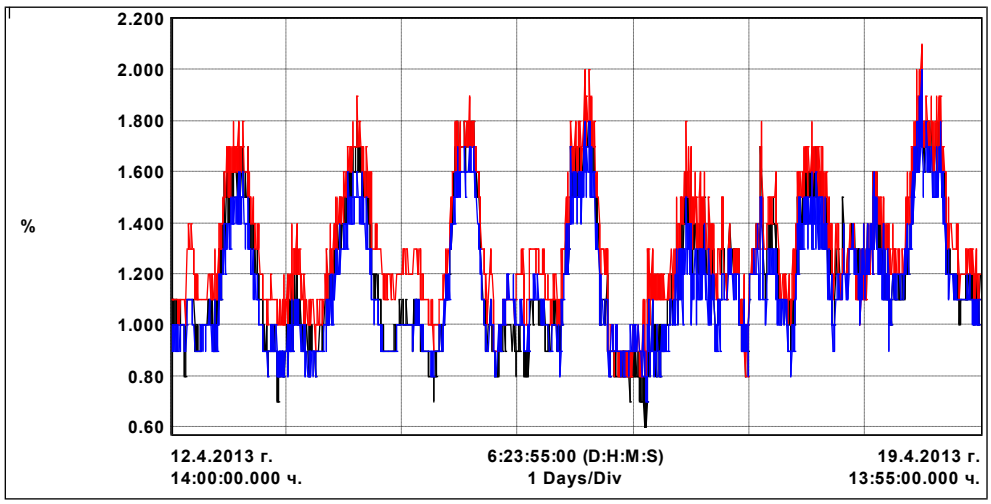
За несиметрията на тока са измерени минимална стойност от 1,3%, средна стойност от 35,1% и максимална стойност от 84%. Причината за това може да се търси в еднофазните консуматори, които се използват в бита.

- ***Висши хармоници на тока и напрежението***

На фиг.5 е показано общото хармонично изкривяване на фазните, а на фиг.6 на линейните напрежения, в %.



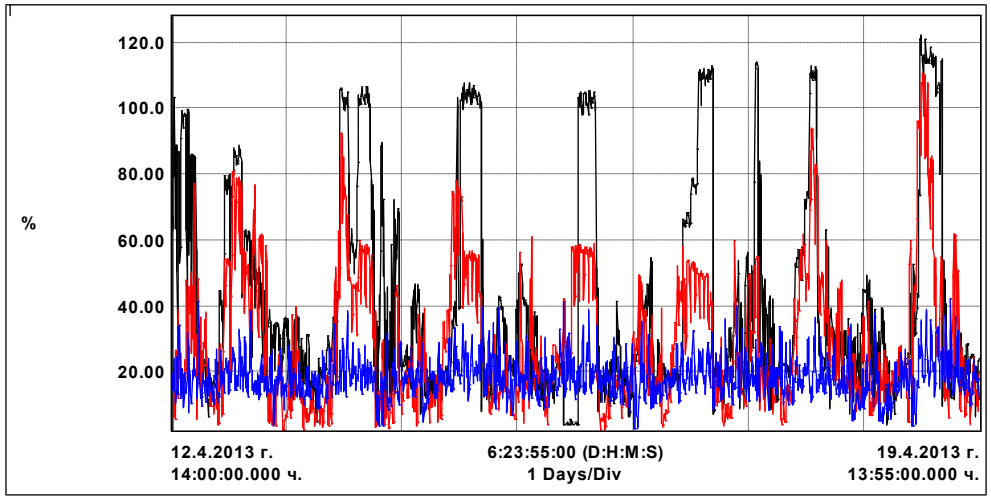
Фиг.5. Общо хармонично изкривяване на фазните напрежения



Фиг.6. Общо хармонично изкривяване на линейните напрежения

Максималните стойности на общото хармонично изкривяване, както на фазните напрежения (1,9% за L_1, 2,1% за L_2 и L_3), така и на линейните напрежения (2% за L_{12} и L_{13}, 2,1% за L_{23}) отговарят на нормите дадени в БДС EN 50160, който регламентира големината на общото хармонично изкривяване на захранващото напрежение да не превишава 8%.

На фиг.7 е показано общото хармонично изкривяване на токовете в трите фази.



Фиг. 7. Общо хармонично изкривяване на фазните токове

В табл.4 са дадени измерените минимални, максимални и средни стойности на общото хармонично изкривяване на фазните токове.

Табл.4. Стойности на общото хармонично изкривяване на фазните токове

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
Athd, %	L_1	3,9	122,2	42,4
	L_2	2,2	111,0	29,6
	L_3	2,8	42,3	18,5

Вижда, че в 56,3% (1135 случая) за фаза L_1, в 45,8% (924 случая) за фаза L_2, в

12,4% (250 случая) за фаза L_3 измерените стойности на общото хармонично изкривяване на токовете са значително по-високи от допустимата стойност от 25% дадена в БДС IEC 61000-3-4 [3].
В Табл.5 са дадени измерените стойности на висшите хармоници на напрежението, като е направено и сравнение със съществуващите стандарти и дали са в допустимите граници.

Табл.5. Стойности на хармониците на линейното напрежение

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_{12}	L_{23}	L_{13}
3	5,0	0,4	0,8	0,7
5	6,0	1,5	1,3	1,3
7	5,0	1,3	1,5	1,3
9	1,5	0,2	0,1	0,1
11	3,5	0,7	0,6	0,7
13	3,0	0,4	0,4	0,4

От хармониците на напрежението се наблюдават 3, 5, 7, 9, 11 и 13 хармоник, като измерените им стойности са много по-ниски от допустимите норми дадени в БДС EN 50160. Четни хармоници на напрежението не се наблюдават.

Табл.6. Стойности на хармониците на фазните токове

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_1	L_2	L_3
3	21,6	66,6	53,6	27,1
5	20,7	65,1	53,4	24,4
7	7,2	48,5	46	18,7
9	3,8	41,7	38,4	13,1
11	3,1	38,5	35,1	13,8
13	2,0	28,6	25,9	8,0
15	0,7	27,9	24,3	8,2
17	1,2	21,7	18,5	6,9
19	1,1	16,8	13,6	4,3
21	0,6	13,7	10,3	3,9
23	0,9	10,1	6,8	3,3
25	0,8	7,2	4,3	2,3

Табл.7. Стойности на четните хармоници на фазните токове

Хармоник	Максимална, %	Допустима, %
2	23	4,0
4	4,6	2,0
6	3,4	1,3
8	3,5	1,0
10	3,2	0,6
12	2,7	0,6
14	2,3	0,6
16	2,0	0,6
18	2,2	0,6
20	1,6	0,6
22	1,3	0,6
24	2,6	0,6

В табл.6 са дадени стойностите на хармониците на тока. От хармониците на тока се наблюдават всички нечетни хармоници на тока до 25 хармоник, като всички измерени стойности са значително по-високи от регламентираните допустими стойности в БДС IEC 61000-3-4. Тези високи нива на хармониците на тока се дължат на използваните консуматори с нелинейна V-A характеристика.
В табл.7 са дадени стойностите на четните хармоници на тока отчетени за целия

измервателен период, като са сравнени с допустимите стойности по БДС IEC 61000-3-4. Всички измерени стойности са значително по-високи от допустимите.

- ***Фактор на мощността***

Достигнатите максимални стойности на фактора на мощността за отделните фази са: 0,999 за фаза L_1 и L_2, 0,998 за фаза L_3. Средните стойности за целия измервателен период са: 0,876 за фаза L_1, 0,879 за фаза L_2, 0,947 за фаза L_3.

Максималната стойност на фактора на мощността при несинусоидален режим и за трите фази е 1. Средните стойности са: 0,963 за фаза L_1, 0,923 за фаза L_2, 0,982 за фаза L_3.

- ***Активна, реактивна и пълна мощност***

В табл.8 са дадени минималната, средната и максималната стойност на измерените активна, реактивна и пълна мощност, за периода на измерването.

Табл.8. Активна, реактивна и пълна мощност

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	средна	максимална
P, kW	L_1	0,148	1,267	6,713
	L_2	0,010	0,092	6,247
	L_3	0,188	0,642	3,305
	сумарна	0,530	2,823	10,510
Q, kVAr	L_1	-0,386	-0,104	0,380
	L_2	-0,243	-0,097	0,841
	L_3	-0,117	0,074	0,388
	сумарна	-0,495	-0,154	0,890
S, kVA	L_1	0,258	1,333	6,719
	L_2	0,179	0,963	6,256
	L_3	0,244	0,671	3,315
	сумарна	0,765	2,967	10,580

- ***Активна, реактивна и пълна енергия***

Консумираната активна енергия за периода на измерването е 475 kWh, реактивната енергия е -0,02 kVArh, а пълната енергия е 498 kVAh.

4. Заключение

От направения анализ се вижда, че качеството на електрическа енергия е в допустимите норми според БДС EN 50160. Изключения правят:

- нивата на хармониците на тока, които не отговарят на стандарта БДС IEC 61000-3-4, който не е със задължителен характер. Високите стойности, до които достигат хармонците на тока влошават електрическите и изолационни свойства на захранващите кабели и проводници, както и качествената и надеждна експлоатация на наличната техника и обзавеждане в жилищният блок. Предприемането на мерки за ограничаването на нивата на хармониците на тока, ще доведе до намаляване загубите на електрическа енергия.
- нивата на фликера в жилищния блок надвишават допустимите норми от

стандарта, което е притеснително и може да повлияе върху уредите и електрониката, която е внедрена в обзавеждането на апартаментите. Относно нивата на фликера, причината следва да се търси в електроснабдителната компания захранваща комплекса, тъй като на територията на комплекса няма електрообзавеждане, което може да предизвика това явление.

Литература

[1] Цанев Ц., С. Цветкова, ***Качество на електрическата енергия***, Авангард Прима, София, 2011.

[2] БДС EN 50160 ***Характеристика на напрежението на електрическата енергия доставяна от обществените разпределителни електрически системи***, 2006.

[3] 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.

Автори: Светлана Цветкова, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *stzvet@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 г. **Рецензент** проф. д-р С. Стоянов

ПРЕКЪСВАНИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ - ОЦЕНКА И АНАЛИЗ

**Светлана Цветкова, Николай Стоманярски,
Ангел Петлешков, Ваня Петрова**

Резюме: *В доклада са дадени резултати от изследване на прекъсванията в електрическата мрежа на град София. Направена е класификация по различни показатели и анализ на получените данни за прекъсванията. Определени са показателите за качество на електроснабдяването и е направен сравнителен анализ с номиналните стойности зададени от ДКЕВР. В заключение са направени препоръки за подобряване на качеството и сигурността на електроснабдяването.*

Ключови думи: *сигурност на електроснабдяването, показатели за качество на електроснабдяването.*

INTERRUPTIONS IN ELECTRICAL NETS - ESTIMATION AND ANALYSIS

Svetlana Tzvetkova, Nikolai Stomaniarski, Angel Petleshkov, Vania Petrova

Abstract: *The results from study of interruptions in electrical net in Sofia are presented in paper. It has been classified by various criteria and analysis of the statistics of the interruptions. Certain indicators for quality of electricity supply are determined and a comparative analysis with the nominal values specified by the regulator. Finally, recommendations are made to improve the quality and security of electricity supply.*

Keywords: *security of electricity supply, quality of electricity supply*

1. Въведение

Последните години все по-голямо внимание се обръща на качеството на електрическата енергия. За това е нужно да се анализира всеки етап от използването на електрическата енергия, за да могат да се намалят факторите влияещи върху качеството й. Влошеното качество на електрическата енергия може да причини поява на смущения или предизвика повреди в електрическите уреди и съоръжения, които да имат тежки икономически последици.

Един от показателите за качество на електрическата енергия е прекъсването на електрозахранването на потребителите. Прекъсванията биват:

- планирани - прекъсване, свързано с планови работи по заявка на мрежовите оператори, обществените доставчици, крайните снабдители, НЕК/ЕСО и/или трети страни, когато клиентите са уведомени за това;

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

- случайни (непланирани) - прекъсвания, които са по причина на устойчиви или преходни откази на съоръжения, неправилни манипулации и др., и за които не е възможно потребителите да бъдат предварително информирани.

Непланираните прекъсвания според тяхната продължителност се разделят на краткотрайни, при които прекъсването е с продължителност, по-малка или равна на 3 минути и продължителни - прекъсване с продължителност, по-голяма от 3 минути.

Електроразпределителните предприятия са задължени да доставят електрическа енергия на присъединените към техните мрежи потребители с показатели за качество регламентирани в [1, 2, 3].

Електроснабдяването на потребителите на електрическа енергия се осъществява чрез електрически мрежи. В доклада са дадени резултати от изследване на прекъсванията в електрическата мрежа на град София. Направена е класификация по различни показатели и анализ на получените данни за прекъсванията. Определени са показателите за качество на електроснабдяването и е направен сравнителен анализ с номиналните стойности зададени от ДКЕВР. Изследването, анализът и статистическата обработка на данните за възникнали прекъсвания на електроснабдяването се прави с цел определяне на мерки за повишаване на надеждността на електроснабдителната мрежа и намаляване до възможния минимум на прекъсванията.

2. Класификация и анализ на прекъсванията и повредите

На територията на София общата дължина на електрическата мрежа средно и високо напрежение е 4340 km, като от тях 3437,3 km са кабелни линии, а 902,7 km са въздушни електропроводи. Общият брой на трансформаторни постове и възлови станции в експлоатация е 4988 с обща инсталирана мощност 3563,92 MVA.

Обект на изследване и анализ са прекъсванията в електрически разпределителни мрежи средно напрежение 6÷35 kV и високо напрежение 110 kV експлоатирани на територията на град София за 2012 година. От извадката се получава информация за: мястото (квартала) на прекъсване на електроснабдяването; вида на повредите; час на прекъсване на електроснабдяването; час на възстановяване на електроснабдяването; продължителност на прекъсването в минути; тип на прекъсването (планирано или случайно); причини, поради които е възникнало прекъсването; брой на потребителите засегнати от прекъсването на електроснабдяването; недоставена електрическа енергия, вследствие на прекъсването. Извадката от данни дава възможност да се определи кой квартал е с най-голям брой прекъсвания и каква е сумарната продължителност на прекъсванията за всеки квартал.

Обобщени данни за прекъсванията за 2012 г. са дадени в табл.1

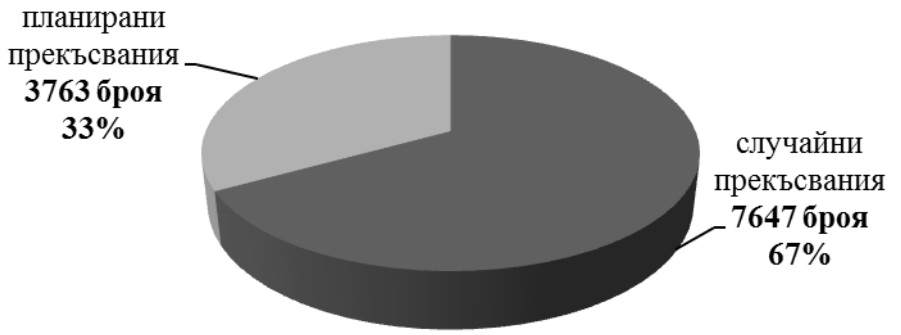
Отношението на краткотрайните към дълготрайните случайни прекъсвания е показано на фиг.2. Преобладават дълготрайните прекъсвания 63,2%, т.е. прекъсвания с продължителност по-голяма от 3 минути, което се явява недостатък в процеса на електроснабдяването на потребителите с електрическа енергия и

електроснабдителното предприятие би следвало да си постави за цел намаляване на процента на дълготрайните прекъсвания и повишаване на качеството на електроснабдяването на потребителите.

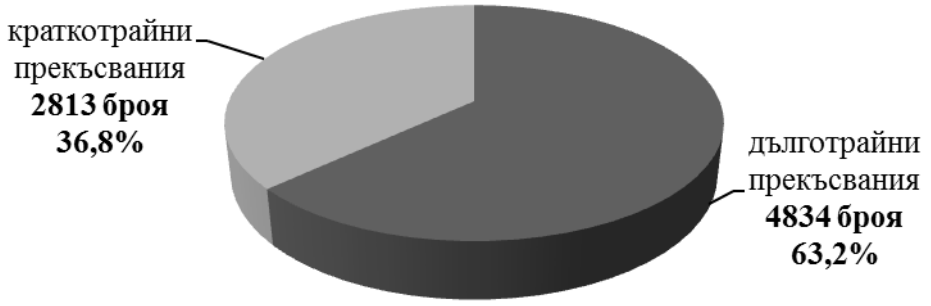
Табл.1

Общ брой прекъсвания	11 410
Общ брой прекъснати потребители	11 809 319
Сумарна продължителност на прекъсванията, минути	540 624
Общ брой случайни прекъсвания	7 647
Сумарна продължителност на случайните прекъсвания, минути	182 962
Общ брой планирани прекъсвания	3 763
Сумарна продължителност на планираните прекъсвания, минути	357 662
Общ брой краткотрайни прекъсвания	2813
Сумарна продължителност на краткотрайните прекъсвания, минути	4868
Общ брой дълготрайни прекъсвания	4834
Сумарна продължителност на дълготрайните прекъсвания, минути	178064

На фиг.1 е показано отношението на планираните и случайните прекъсвания на електроснабдяването. От анализа на извадката се установява, че по-голям процент имат случайните прекъсвания 67%, т.е. такива възникнали в резултат на непредвидени обстоятелства, докато планираните прекъсвания са 33%.



Фиг.1. Планирани и случайни прекъсвания за 2012 година



Фиг.2. Краткотрайни и дълготрайни случайни прекъсвания за 2012 година

В табл.2 са дадени обобщени данни за случайните прекъсвания в електрическата мрежа на град София по месеци за 2012 г. Вижда се, че прекъсванията са в резултат на повреди в кабелни електропроводи СрН, въздушни електропроводи СрН, трафопостове и подстанции и на чужди съоръжения, които не са собственост на електроснабдителната компания. За периода са регистрирани 11 прекъсвания в резултат на повреди на въздушни електропроводи ВН и 24 прекъсвания на кабелни електропроводи ВН.

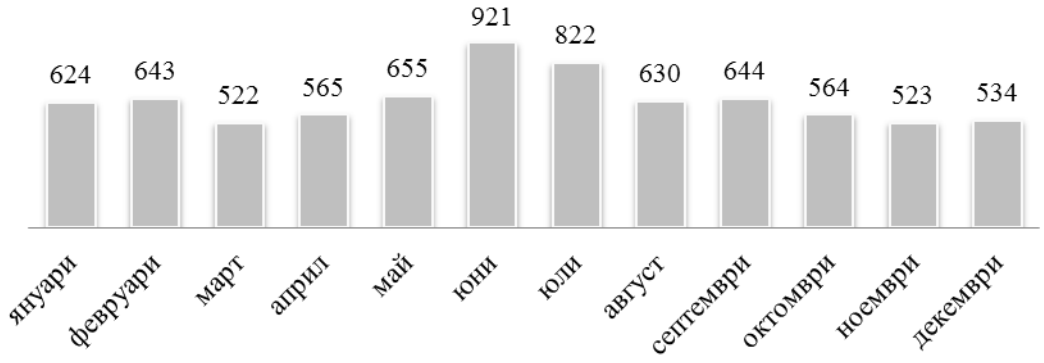
Табл.2

Електрическо съоръжение	**Месец, 2012 година**											
	I	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**
Прекъсвания във въздушни електропроводи СрН, бр.	186	149	113	94	191	375	338	245	213	160	93	143
Общо време, h.	227	154	39	26	40	58	74	42	41	41	13	133
Средно време, h.	1,22	1,04	0,34	0,28	0,21	0,16	0,22	0,17	0,19	0,26	0,14	0,93
Недоставена електрическа енергия, MWh	245	149	58	30	43	63	76	42	36	42	17	112
Прекъсвания в кабелни електропроводи СрН, бр.	330	348	311	356	359	406	365	298	351	273	295	264
Общо време, h	115	140	106	155	102	165	173	127	102	83	84	78
Средно време, h	0,34	0,40	0,37	0,42	0,27	0,44	0,45	0,41	0,29	0,29	0,30	0,35
Недоставена електрическа енергия, MWh	103	168	103	119	69	115	112	88	77	63	57	91
Прекъсвания в трафопостове и подстанции, бр.	89	132	71	84	77	85	70	61	47	89	54	76
Общо време, h	60	87	24	58	43	31	30	24	12	15	10	24
Средно време, h	0,67	0,65	0,34	0,69	0,56	0,37	0,43	0,40	0,26	0,17	0,19	0,32
Недоставена електрическа енергия, MWh	53,7	64	26	40	26,7	14,6	18,1	9,6	9,6	7,7	15,2	18,8
Прекъсвания в чуждо съоръжение, бр.	17	13	19	28	22	51	46	26	33	35	80	51
Общо време, h	18	13	25	17	22	26	37	11	21	22	50	48
Средно време, h	1,03	0,99	1,32	0,60	1,00	0,50	0,81	0,42	0,63	0,62	0,62	0,93
Недоставена електрическа енергия, MWh	27	11	4	15	13	21	108	5	9	15	35	39
Общо прекъсвания за месец, бр.	624	643	522	565	655	921	822	630	644	564	523	534
Общо време за месец, h	420	394	194	256	207	280	316	204	176	161	157	283
Общо средно време за месец h	0,67	0,61	0,37	0,45	0,32	0,30	0,38	0,32	0,27	0,29	0,30	0,53
Обща недоставена електрическа енергия за месец, MWh	429	392	191	204	151	214	314	145	132	128	126	260

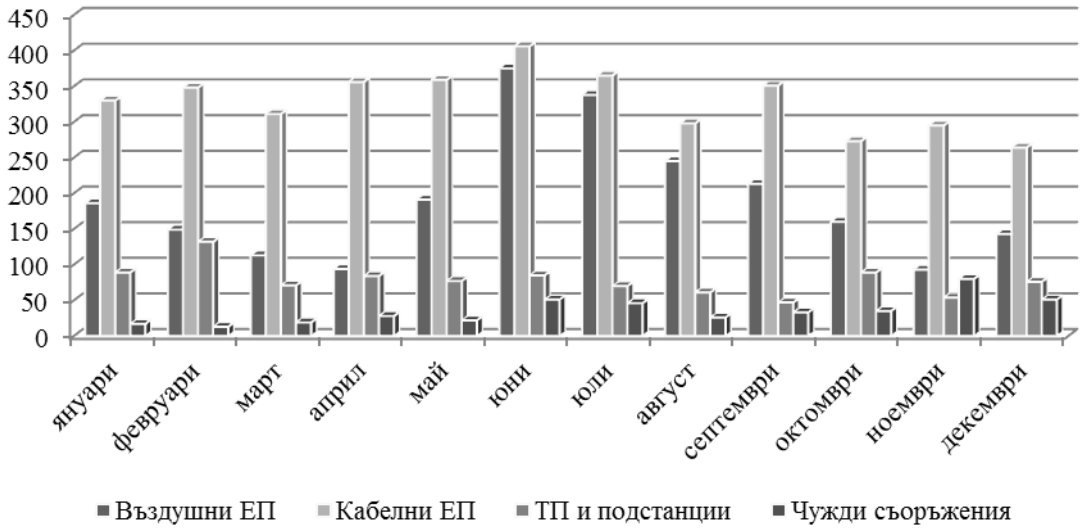
На фиг.3 са показани общо прекъсванията по месеци. Най-голям брой прекъсвания са регистрирани през месеците юни и юли.

На фиг.4 са показани прекъсванията в електрическите съоръжения по месеци.

В табл.3 са дадени обобщени данни за случайните прекъсвания в различните съоръжения на електрическата мрежа на град София за 2012 г. - брой прекъсвания, засегнати потребители, общо и средно времетраене на прекъсванията и недоставена електрическа енергия.



Фиг.3. Брой прекъсвания за месец



Фиг.4. Прекъсвания в електрическите съоръжения по месеци

Табл.3

Електрическо съоръжение	**Прекъсвания, броя**	**Засегнати потребители, броя**	**Прекъсвания, мин.**		**Недоставена енергия, kWh**
			общо	средно	
Въздушни електропроводи ВН	11	46 621	5	0,45	2 017
Въздушни електропроводи СрН	2 300	3 495 003	53 312	23,18	912 913
Кабелни електропроводи ВН	24	0	92	3,83	0
Кабелни електропроводи СрН	3 956	3 881 905	85 768	21,68	1 164 948
Трафопостове и подстанции	935	1 051 999	25 178	26,93	303 689
Чуждо съоръжение	421	432 211	18 492	43,92	301 695
Общо:	**7 647**	**8 907 739**	**182 847**	**23,91**	**2 685 262**

От представената табл.3 се вижда, че най-голям брой са прекъсванията в кабелни електропроводи СрН (51,7%), следвани от прекъсвания във въздушни електропроводи СрН (30%). Наблюдаваните прекъсвания в трафопостове и постанции са 12,2%, в чужди съоръжения 5,5%, а в кабелни и въздушни електропроводи ВН съответно 0,31% и 0,14%. Средното време на прекъсване е най-голямо при чужди съоръжения 43,92 мин. Следвано от трафопостове и подстанции, въздушни електропроводи СрН и кабелни електропроводи СрН. Недоставената енергия и засегнатите потребители са най-голями при кабелни електропроводи СрН, следвани от въздушни електропроводи СрН.

Средното време на прекъсване през 2012 година е 23,9 мин.

В табл.4 са показани броя на прекъсванията, засегнатите потребители, времетраене на прекъсванията и недоставената енергия за различните напрежения. Най-голям брой на прекъсванията, засегнати потребители, общо време на прекъсванията и недоставена енергия има при мрежи с напрежение 20 kV, следвани от мрежи с напрежение 10 kV. Наблюдаваните прекъсвания са съответно: в мрежи 20 kV – 60,7%; в мрежи 10 kV – 35,7%; в мрежи 110 kV – 2,8%; в мрежи 35 kV – 0,4%; в мрежи 6 kV – 0,37%. Най-голямо е средното бреме на прекъсване в мрежи 6 kV, следвано от мрежи 20 kV и 10 kV.

Табл.4

Напрежение, kV	**Прекъсвания, броя**	**Засегнати потребители, броя**	**Прекъсвания, мин.**		**Недоставена енергия, kWh**
			общо	средно	
6	28	123	845	30,18	1 931
10	2 731	2 816 019	56 469	20,68	604 997
20	4 642	5 909 397	124 387	26,80	2 039 268
35	31	7 774	484	15,61	12 383
110	215	174 426	662	3,08	26 683
Общо:	**7 647**	**8 907 739**	**182 847**	**23,91**	**2 685 262**

Табл.5

Причина	**Прекъсвания**		**Засегнати потребители**
	броя	%	
Оперативни превключвания	3202	42	2948323
Неустановени причини	1913	25	2709004
Повреди на съоръжения	1025	14	1405469
Строително-ремонтни дейности	566	7	669250
Чуждо съоръжение или намеса на трета страна	530	7	570195
Метеорологични и природни стихии	411	5	605501

На базата на обобщената информация от извадките, в табл.5 е показана зависимостта на броя на прекъсванията и на засегнатите потребители от причината за тяхното възникване. Вижда се, че те се дължат основно на: оперативни превключвания, строително-ремонтни дейности, повреди на съоръжения, чуждо съо-

ръжение или намеса на трета страна, метеорологични и природни стихии, и голям процент неустановени причини.

3. Определяне на показателите за качество на електроснабдяването

Индексът на средната честота на прекъсванията SAIFI (System Annual Interruption Frequency Index) отчита средния брой прекъсвания на един потребител за период от една година. Определя се по формулата

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^{m} n_i}{N}, \text{ броя/година} \qquad (1)$$

където: n_i - брой абонати, засегнати при i-тото прекъсване; N - общ брой присъединени клиенти; m - брой на прекъсванията.

Индексът на средната продължителност на прекъсванията SAIDI (System Average Interruption Duration Index) отчита средната продължителност на прекъсванията, която се пада на един клиент за период от една година (в минути за година). Определя се [4] по зависимостта (2)

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^{m} t_i \, n_i}{N}, \text{ минути,} \qquad (2)$$

където: t_i - времетраене на i-тото прекъсване.

В табл.6 и табл.7 са дадени резултатите от изчисленията за двата показателя за прекъсванията, съответно за непланирани и планирани прекъсвания, при 2 239 000 потребители за 2012 година.

Табл.6

Месец	m, броя	$\sum_{i=1}^{m} n_i$,	$\sum_{i=1}^{m} t_i \, n_i$,	SAIFI, броя/година	SAIDI, минути
януари	624	691 715	21 012 624	0,31	9,38
февруари	643	716 175	23 905 179	0,32	10,68
март	522	587 496	14 375 928	0,26	6,42
април	565	623 104	15 141 654	0,28	6,76
май	655	733 070	13 154 194	0,33	5,88
юни	921	1 097 985	21 213 715	0,49	9,47
юли	822	1 023 433	30 224 757	0,46	13,50
август	630	824 143	16 116 715	0,37	7,20
септември	644	784 452	12 664 062	0,35	5,66
октомври	564	661 855	13 884 457	0,30	6,20
ноември	523	620 093	10 363 100	0,28	4,63
декември	534	544 221	21 004 842	0,24	9,38
Общо:	**7647**	**8 907 742**	**213 372 819**	**3,98**	**95,3**

Табл.7

Месец	m, броя	$\sum_{i=1}^{m} n_i$,	$\sum_{i=1}^{m} t_i\ n_i$,	SAIFI, броя/година	SAIDI, минути
януари	207	189 249	13 543 121	0,08	6,05
февруари	107	60 376	2 187 872	0,03	0,98
март	258	207 273	11 089 971	0,09	4,95
април	392	281 080	11 923 635	0,13	5,33
май	400	267 663	8 040 709	0,12	3,59
юни	334	265 880	6 852 692	0,12	3,06
юли	225	194 879	9 072 237	0,09	4,05
август	318	284 204	11 859 517	0,13	5,30
септември	309	206 932	11 058 546	0,09	4,94
октомври	442	280 792	7 289 193	0,13	3,26
ноември	446	391 182	13 901 408	0,17	6,21
декември	325	272 087	10 385 744	0,12	4,64
Общо:	**3763**	**2 901 577**	**117 204 645**	**1,30**	**52,35**

В табл.8 са дадени препоръчителните стойности на качествените показатели SAIFI и SAIDI регламентирани от ДКВЕР за 2012 г. [3].

Табл.8

Непланирани прекъсвания		**Планирани прекъсвания**	
SAIFI, броя/година	SAIDI, минути	SAIFI, броя/година	SAIDI, минути
3,63	**194,1**	**5,25**	**296,7**

От таблиците се вижда, че средната честота на прекъсванията при непланираните прекъсвания е по-голяма от препоръчителните стойности от ДКВЕР. Това означава че при непланираните (случайни) прекъсвания броя на засегнатите потребители е по-голям от препоръчителното и трябва да се предприемат съответните мерки за намаляване на този показател.

4. Заключение

Анализът на прекъсванията в електрическата мрежа на град София за 2012 година, показва голям брой прекъсвания в съоръженията, както и значителни загуби от недоставена електрическа енергия. Основни причини са оперативни превключвания, повреди на съоръжения и строително-ремонтни дейности.

За повишаване на качеството и непрекъснатостта на електрозахранването е необходимо:

- модернизация на електроснабдителната мрежа и съоръжения;
- инвестиции в иновации, насочени към подобряване на ефективността на електроснабдителната мрежа;
- поетапно подновяване на електроразпределителната мрежа;
- подмяна на елементи на мрежата с изчерпан експлоатационен ресурс;
- ремонт на съоръженията за пренос и разпределение на електрическа енергия;
- повишаване на контрола върху съоръженията;
- намаляване на посегателствата върху електросъоръженията.

За модернизиране на електроразпределителната мрежа СрН е необходимо:

- монтаж на съвременна комутационна апаратура;
- въвеждане в редовна експлоатация на комплектни разпределителни устройства в електро-, газова- и въздушна изолационна среда;
- подмяна и монтаж на нови цифрови релейни защити;
- монтаж на индикатори за къси и земни съединения;
- въвеждане в експлоатация само на кабели СрН с изолация от химически омрежен полиетилен, водоблокиращ слой и полиетиленова защитна обвивка;
- въвеждане на вериги за телеуправление във възлови станции;
- подмяна на остарели и с нарушена цялост железорешетъчни и железобетонни стълбове;
- монтаж на нови и подмяна на прекъсвачи във възлови станции и трафопостове.

Основните направления за подобряването на показателите за непрекъснатост на снабдяването с електрическа енергия трябва да са насочени към намаляване на броя на прекъсванията, намаляване на броя на засегнатите от прекъсванията потребители и намаляване на времето за възстановяване на снабдяването с електрическа енергия.

Литература

[1] ДКЕВР, ***Показатели за качество на електроснабдяване на ДКЕВР***, 2004

[2] ДКЕВР, ***Методика за отчитане изпълнението на целевите показатели и контрол на показателите за качество на електрическата енергия и качество на обслужването на мрежовите оператори, обществените доставчици и крайни снабдители***, 2010-2013

[3] Цветкова С., ***Изследване на прекъсванията на електроснабдяването в кабелни мрежи ниско напрежение***, IV Научна конференция ЕФ 2012, Созопол, 28 септември - 1 октомври 2012, том 2 стр. 94-103

[4] Цветкова С., И. Георгиев, А. Петлешков, Ц. Цанев, В. Петрова, ***Изследване на повредите в електроразпределителна мрежа средно напрежение***, Енергиен форум 2012, 13-17 юни 2012, Варна, стр. 318-329

Автори: Светлана Цветкова, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *stzvet@tu-sofia.bg*; Николай Стоманярски, маг. инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *nstomaniarski@tu-sofia.*bg; Ангел Петлешков, гл. ас., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет – София, E-mail address: *apetl@tu-sofia.bg*; Ваня Петрова, инж, ПГЖТ „Н. Вапцаров“, E-mail address: *vaniatzvet@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 г. **Рецензент** проф. д-р С. Стоянов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ НА ПОМПЕНА СТАНЦИЯ НА ЗАТВОРЕН ЖИЛИЩЕН КОМПЛЕКС

Светлана Цветкова, Ангел Петлешков, Николай Стоманярски

Резюме: *В доклада са дадени резултати от едноседмично изследване на качеството на електрическата енергия на помпена станция. Направен е анализ и сравнение на получените резултати за показателите за качество на електрическата енергия със съответните нормативни документи.*

Ключови думи: *качество на електрическата енергия, помпена станция.*

STUDY OF THE ELECTRICAL ENERGY QUALITY IN PUMP STATION OF CLOSED HOUSING ESTATE

Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov, Nikolai Stomaniarski

Abstract: *The results from one week study of the electrical energy quality in pump station are given in the paper. The obtained results for electrical energy quality indexes are analyzed and compared with normative documents.*

Keywords: *electrical energy quality, pump station.*

1. Въведение

Качеството на електрическата енергия е въпрос от съществена важност както при производството, преноса, разпределението на електрическата енергия, така и при използването й от крайните потребители. В значителна степен то зависи от характеристиките на електрическите величини: честота, амплитуда и форма на монофазното напрежение и симетрия на трифазното напрежение. Тези характеристики търпят промяна по време на нормалната работа на захранващата система, дължащи се на промяна в товара, смущения породени от дадено съоръжение и поява на аварии, причинени главно от външни фактори. Изискването към качеството на електрическата енергия е свързано и с развитието на техниката и технологиите днес, тъй като се създават и използват уреди и съоръжения, чувствителни към смущенията на електрическата енергия. Влошеното качество на електрическата енергия може да причини поява на смущения или да предизвика повреди в електрическите уредби и съоръжения, които да станат опасни за хората и обслужващия персонал [1].

В доклада са дадени резултати от едноседмично изследване на качеството на електрическата енергия на помпена станция. Направен е анализ и сравнение на получените резултати за показателите за качество на електрическата енергия със съответните нормативни документи [2, 3].

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. Характеристика на обекта на изследване

Помпената станция осигурява необходимото дневно количество вода за нуждите на поливната система на затворения жилищен комплекс. В нея са разположени четири седем стъпални помпи и главното разпределително табло, в което е и управлението. За изравняване на неравномерността на постъпване на вода и на разхода на вода за поливане на зелените площи е предвиден стоманобетонен резервоар с полезен обем 350 m^3. Резервоарът се захранва с вода от два водоизточника: от сондажи, изградени в близост до резервоара на територията на комплекса и от уличен водопровод.

За поливната система се използват две помпени групи:

- хидросистема HYDROPIM S от две вертикални помпи GRUNDFOS CR5-9 с мощност 1,5 kW, напрежение 3x400V, дебит 1,75 l/s и напор 41,7 m;
- хидросистема HYDROPIM S от две вертикални помпи GRUNDFOS CR15-6 с мощност 5,5 kW, напрежение 3x400V, дебит 5 l/s и напор 64,7 m.

Всяка от хидросистемите включва смукателен и нагнетателен колектори, свързваща арматура и електрическо табло. Електрическото табло е оборудвано с контролер с микропроцесорно управление, осигуряващ каскадно управление на помпите, LED дисплей, клавиатура за осъществяване на настройките. И двете системи са оборудвани с мембранен хидрофорен съд 100 l, 10 atm. И при двете системи, една от помпите е с честотно регулиране на оборотите. Наличието на честотно регулиране на оборотите намалява до минимум пулсациите на налягането в системата, води до икономии на електрическа енергия и подобрява експлоатацията.

Напълно автоматизирано е включването и изключването на помпите, отварянето и затварянето на смукателния колектор с електрическо задвижване. Автоматизацията е в зависимост от водното ниво в резервоара. Работата на помпите на хидросистемите се автоматизира и в зависимост от поливния режим на системата. Изключването им при падането на нивото на водата в резервоара следва да се разглежда като предпазно средство с оглед да не работят на сухо.

3. Изследване на качеството на електрическата енергия

Измерванията са проведени с трифазен анализатор на качеството на електрическата енергия QUALISTAR C.A 8332. Уредът дава възможност за измерване, изчисляване, запис и анализ на всички електрически величини и показателите за качество на електрическата енергия, съгласно БДС EN 50160. Получената информация от измерванията е обработена със софтуерите DataViewer Professional и Qualistar Viewer V2.

За контролна точка на провеждане на измерванията е избран захранващия кабел на главното разпределително табло, преди главния автоматичен прекъсвач, като по този начин се отчита работа и на четирите помпи. Периодът на измерване е 1 седмица - от 10:15:00 часа на 13.05.2013 г. до 10:10:00 на 20.05.2013 г. Захранващата мрежа е трифазна, петпроводна. Интервалът от време за осредняване на измерванията е 5 минути, в резултат на което се получават 2016 стойности за всеки от изследваните параметри.

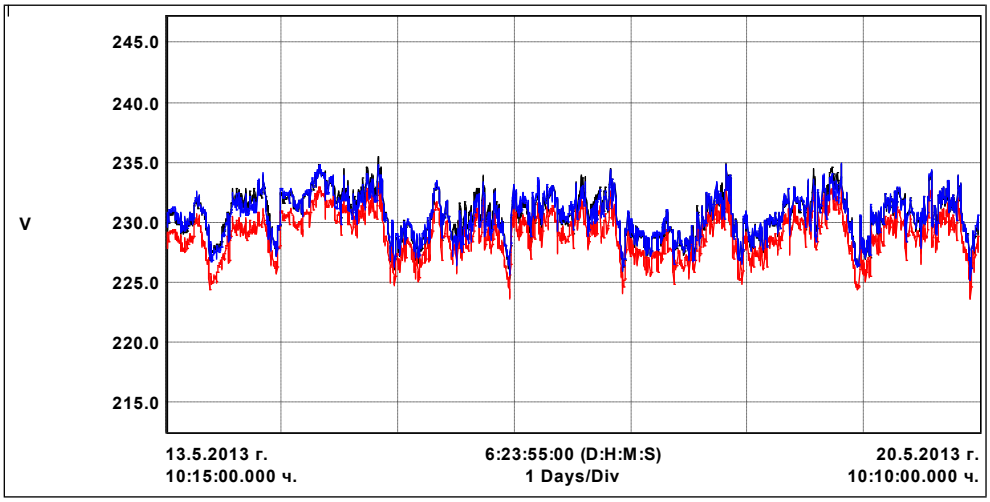
- ***Честота на захранващото напрежение***

От експерименталните данни се вижда, че максималната стойност на честотата на захранващото напрежение за периода на измерване е 50.07 Hz, минималната стойност е 49.91 Hz, а средната стойност е 49.99 Hz. Допустимите норми регламентирани в стандарта БДС EN 50160, чрез който регулаторните органи следят за качеството на електрическата енергия, са 49,5÷50,5Hz за 99,5% от годишен период или 47÷52Hz целогодишно. Следователно в 100% от случаите честотата на захранващото напрежение е в допустимите норми.

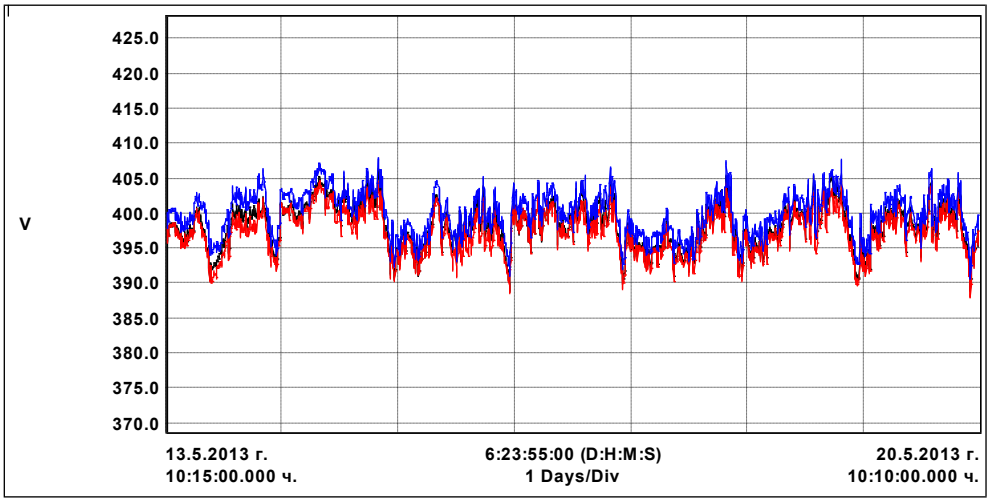
- ***Захранващо напрежение***

Основни консуматори в помпената станция са асинхронните двигатели, задвижващи помпите. За да се осъществява качествено и максимално използване на всички електрически съоръжения е необходимо захранващото напрежение да е в нормите, които се дават в наредбите и стандартите. Допустимите отклонения на напрежението, които са регламентирани в БДС EN 50160 са ± 10% $U_н$ за 95% от период една седмица, средна ефективна стойност за 10 минути [2]. Стандартното номинално напрежение за обществени системи ниско напрежение е 230V между фаза-неутрала и 400V между фаза-фаза.

На фиг.1 е показано изменението на ефективните стойности на фазните напрежения, а на фиг.2 - на линейните напрежения, захранващи помпената станция в комплекса. В табл.1 и табл.2 са дадени съответно минималната, максималната и средната стойност на фазните и на линейните напрежения за периода на измерване.



Фиг.1. Изменение на фазните напрежения



Фиг.2. Изменение на линейните напрежения

Табл.1. Стойности на фазните напрежения

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
U, V	L_1	225,3	235,5	230,7
	L_2	223,6	233,3	229,0
	L_3	225,2	235,0	230,6

Табл.2. Стойности на линейните напрежения

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
U, V	L_{12}	388,8	406,4	398,3
	L_{23}	388,0	404,8	397,4
	L_{13}	390,6	407,9	400,0

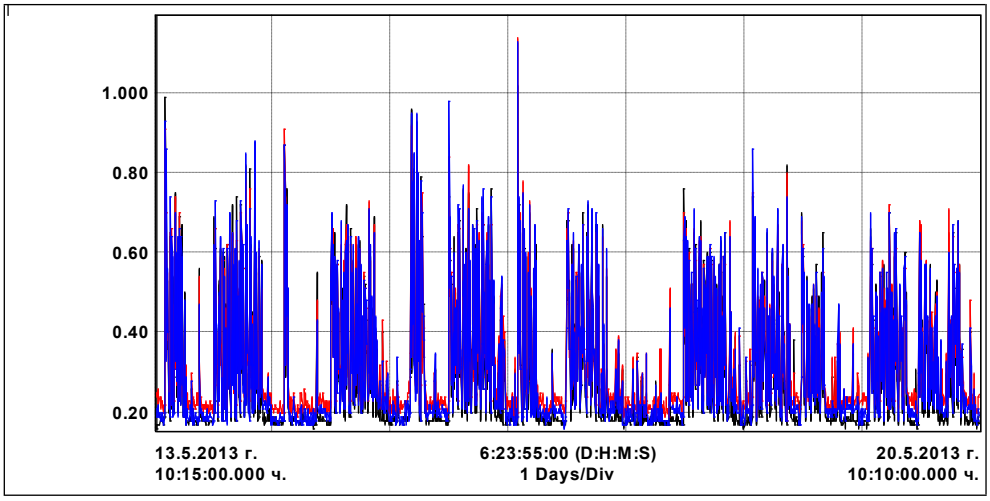
Максималното отклонение на фазното напрежение е 2,4% за L_1, $-2{,}8\%$ за L_2, 2,2% за L_3, а на линейното напрежение $-2{,}8\%$ за L_{12}, -3% за L_{23}, $-2{,}4\%$ за L_{13}.

От данните се вижда, че стойностите на фазните и линейните напрежения за 100% от периода на измерване са в допустимия диапазон в $\pm 10\% U_H$ (от 207 до 253 V и от 360 до 440 V), регламентирани в БДС EN 50160.

Краткотрайни спадания и пренапрежения на захранващото напражение не се наблюдават.

Краткотрайните изменения на напрежението се оценяват по стойността на фликера и неговата строгост за дълъг интервал от време P_{lt}. На фиг. 3 е показано изменението на фликера за трите фази.

В табл.3 са дадени минималната, максималната и средната стойност на фликера за всяка фаза. Вижда се, че само в 1 случай или 0,05% е измерена стойност на фликера над допустимата стойност 1, нормирана в БДС EN 50160. Следователно в 99,95% стойността на фликера и за трите фази е в допустимата норма - не надвишава 1.



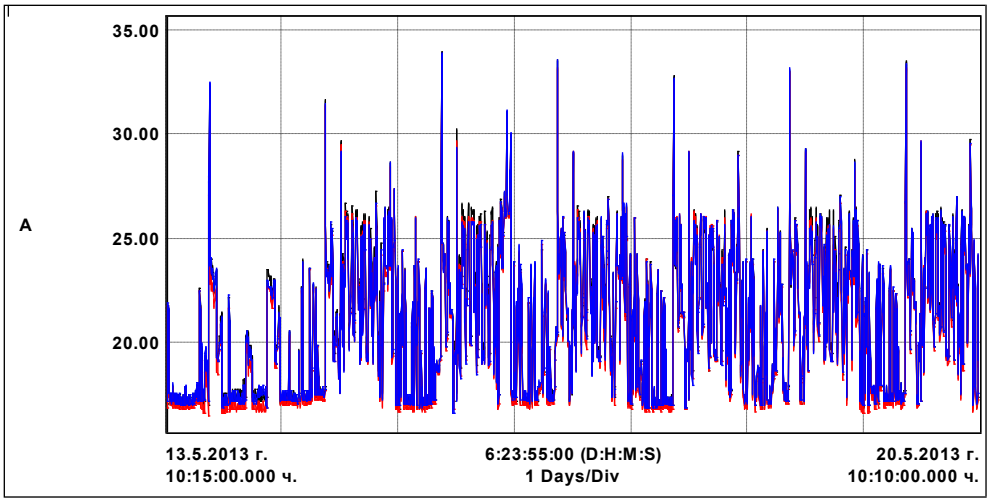
Фиг.3. Фликер

Табл.3. Стойности на фликера

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
$\mathbf{P_{lt}}$	L_1	0,16	1,02	0,29
	L_2	0,18	1,14	0,31
	L_3	0,16	1,13	0,30

- ***Токове***

На фиг.4 е показано изменението на тока в трите фази. Натоварванията на отделните фази са: фаза L1 между 16,8A и 34A; фаза L2 между 16,5A и 33,6A; фаза L3 между 16,6A и 33,9A. Средното натоварване за фаза L1 е 20,99 A, за фаза L2 е 20,75 и за фаза L3 е 20,92.



Фиг.4. Ефективни стойности на фазните токове

Помпите се задвижват с трифазни асинхронни двигатели, което е предпоставка за равномерно натоварване на отделните фази. От експерименталните данни се вижда, че токовете в трите фази са близки по стойност.

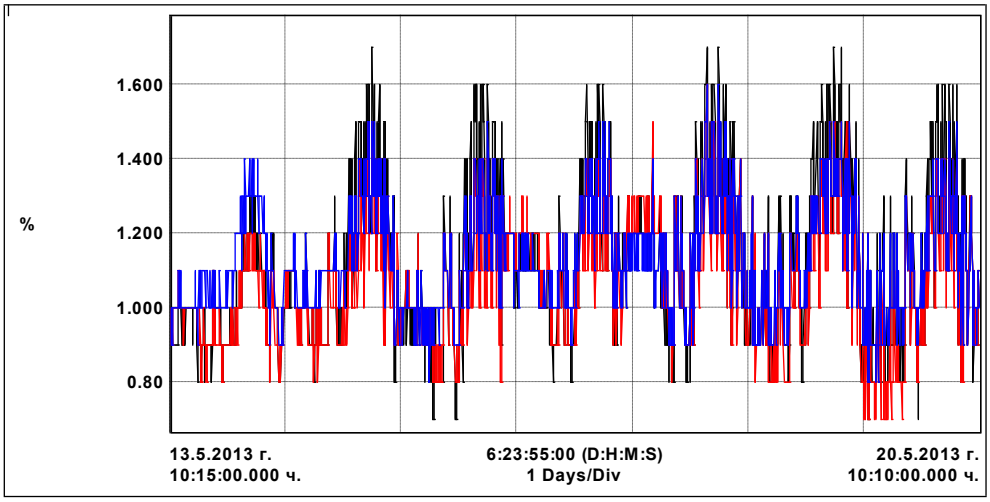
- ***Несиметрия на напрежението и токовете***

Несиметрията на напрежението има измерена минимална стойност от 0,3%, средна стойност от 0,49% и максимална стойност от 0,8%. Максималната стойност на несиметрията на напрежението от 0,8% е под допустимата стойност от 2% в 100% от времето на измерване.

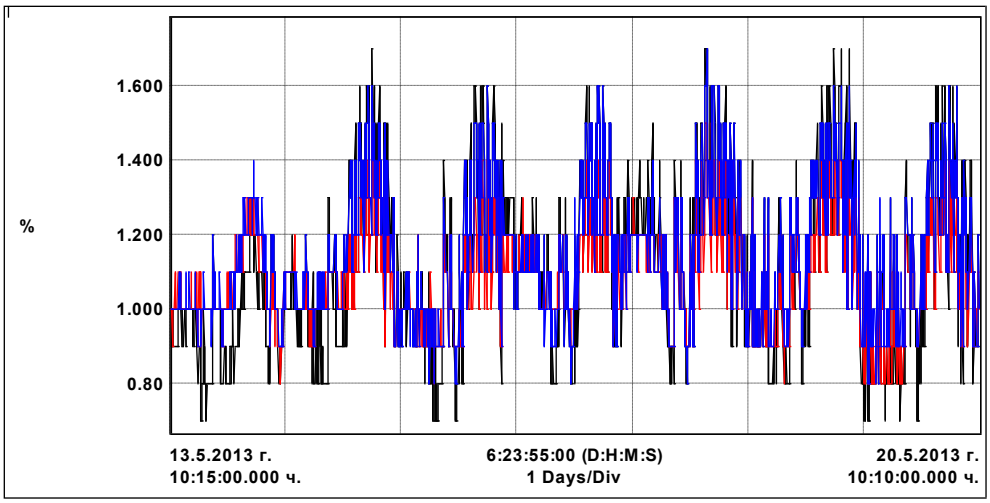
За несиметрията на токовете са измерени минимална стойност от 0%, средна стойност от 0,92% и максимална стойност от 2,9%. Макар несиметрията на тока да не се нормира, то за по-ефективна работа на съоръженията трябва да й се обърне внимание.

- ***Висши хармоници на тока и напрежението***

На фиг.5 и фиг.6 е показано общото хармонично изкривяване, съответно на фазните и на линейните напрежения, в %.



Фиг.5. Общо хармонично изкривяване на фазните напрежения



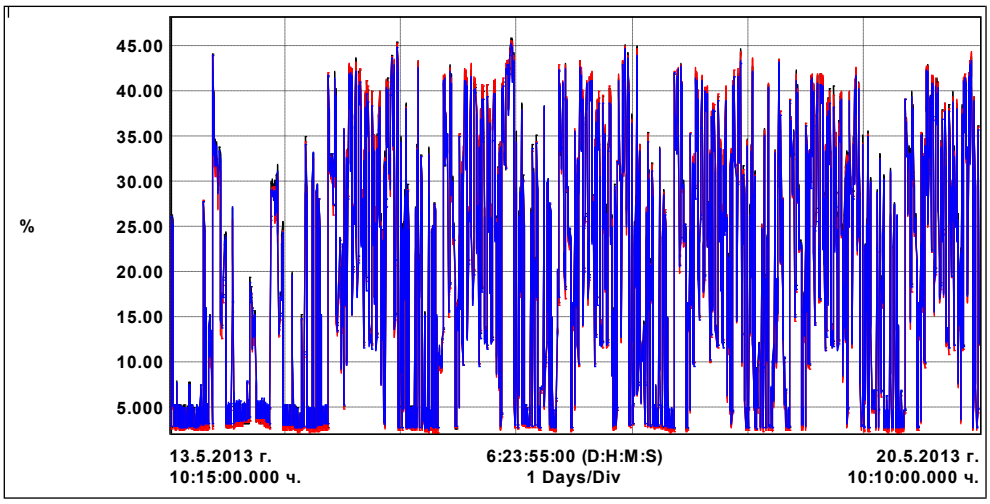
Фиг.6. Общо хармонично изкривяване на линейните напрежения

Максималните стойности на общото хармонично изкривяване, както на фазните напрежения (1,7% за L_1, 1,6% за L_2 и L_3), така и на линейните напрежения (1,7% за L_{12} и L_{13}, 1,5% за L_{23}) отговарят на нормите дадени в БДС EN 50160, който регламентира големината на общото хармонично изкривяване на захранващото

напрежение да не превишава 8%.

На фиг.7 е показано общото хармонично изкривяване на токовете в трите фази. В табл.4 са дадени измерените минимални, максимални и средни стойности на общото хармонично изкривяване на фазните токове.

В 39,5% (796 случая) за фаза L1, в 38,5% (777 случая) за фаза L2 и в 38,1% (769 случая) за фаза L3 измерените стойности на общото хармонично изкривяване на токовете са значително по-високи от допустимата стойност от 25% дадена в БДС IEC 61000-3-4 [3].



Фиг.7. Общо хармонично изкривяване на фазните токове

Табл.4. Стойности на общото хармонично изкривяване на фазните токове

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	максимална	средна
Athd, %	L_1	2,4	45,9	19,72
	L_2	2,1	45,5	19,41
	L_3	2,5	45,2	19,44

Получените експериментални резултати за висшите хармоници на напрежението и тока са обработени и систематизирани в табл.5 и табл.6, като е направено и сравнение със съществуващите стандарти [2, 3].

От хармониците на напрежението преобладават 3, 5, 7, 11 и 13 хармоник. Всички хармоници на напрежението са много по-ниски от допустимите норми дадени в БДС EN 50160. От четните хармоници на напрежението се наблюдават само 10 и 12 хармоник с максимални стойности 0,1%, които са много по-ниски от допустимата норма от 0,5 % за 10 хармоник и 0,2% за 12 хармоник.

От хармониците на тока преобладават 3, 5, 7, 11 и 13 хармоник. Всички измерени максимални стойности на хармониците на тока, с изключение на 3 хармоник са значително по-високи от регламентираните допустими стойности в БДС IEC 61000-3-4.

В табл.7 са дадени стойностите на четните хармоници на тока отчетени за целия

измервателен период, като са сравнени с допустимите стойности по БДС IEC 61000-3-4. Вижда се, че над допустимата стойност са 10, 12 и 14 хармоник на тока.

Табл.5. Стойности на хармониците на линейното напрежение

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_{12}	L_{23}	L_{13}
3	5,0	0,3	0,6	0,7
5	6,0	1,1	1,1	1,0
7	5,0	1,0	0,8	1,0
9	1,5	0,2	0,2	0,2
11	3,5	1,1	1,0	1,1
13	3,0	0,7	0,6	0,6
17	2,0	0,2	0,2	0,2
19	1,5	0,1	0,2	0,2
23	1,5	0,1	0,1	0

Табл.6. Стойности на хармониците на фазните токове

Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_1	L_2	L_3
3	21,6	2,5	4,0	4,9
5	20,7	31,6	32,3	30,3
7	7,2	26,7	25,9	28,0
9	3,8	1,9	4,9	4,5
11	3,1	16,1	16,2	14,4
13	2,0	11,0	10,5	11,8
15	0,7	1,7	2,2	2,0
17	1,2	3,8	3,6	3,2
19	1,1	2,6	2,6	2,9
21	0,6	0,4	0,7	1,0
23	0,9	1,3	1,5	1,2
25	0,8	1,0	0,9	1,2

Табл.7. Стойности на четните хармоници на фазните токове

Хармоник	Максимална, %	Допустима, %
2	0,5	4,0
4	0,6	2,0
6	0,8	1,3
8	0,7	1,0
10	0,8	0,6
12	0,9	0,6
14	0,7	0,6
16	0,5	0,6
18	0,4	0,6
20	0,1	0,6
22	0,2	0,6

- ***Фактор на мощността***

Достигнатите максимални стойности на фактора на мощността са съответно за фаза L_1 – 0,843, за фаза L_2 – 0,837, за фаза L_3 – 0,834. Средните стойности за целия измервателен период са: за фаза L_1 – 0,786, за фаза L_2 – 0,781, за фаза L_3 – 0,771.

Максималните стойности на фактора на мощността при несинусоидален режим са: за фаза L_1 – 0,918, за фаза L_2 – 0,914, за фаза L_3 – 0,910. Средните стойности са: за фаза L_1 – 0,817, за фаза L_2 – 0,811, за фаза L_3 – 0,801.

- ***Активна, реактивна и пълна мощност***

В табл.8 са дадени минималната, средната и максималната стойност на измерените активна, реактивна и пълна мощност, за периода на измерването.

Таблица 8. Активна, реактивна и пълна мощност

Величина	Фаза	Стойност		
		минимална	средна	максимална
P, kW	L_1	2,94	3,84	6,54
	L_2	2,82	3,75	6,38
	L_3	2,81	3,77	6,45
	сумарна	8,73	11,38	19,39
Q, kVAr	L_1	2,1	2,52	3,43
	L_2	2,22	2,51	3,42
	L_3	2,28	2,62	3,56
	сумарна	6,66	7,66	10,43
S, kVA	L_1	3,84	4,85	7,78
	L_2	3,76	4,76	7,64
	L_3	3,79	4,83	7,76
	сумарна	11,53	14,45	23,20

Наблюдава се консумация на реактивна мощност, което се дължи на асинхронните двигатели на помпите. Консумацията на реактивна мощност от асинхронните двигатели зависи от номиналната мощност, честотата на въртене и натоварването им.

- ***Активна, реактивна и пълна енергия***

Консумираната активна енергия за периода на измерването е 1911 kWh, реактивната енергия е 1287 kVArh, а пълната енергия е 2427 kVAh.

4. Заключение

От направения анализ се вижда, че показателите за качество на електрическата енергия са в допустимите норми дадени в БДС EN 50160. Изключение правят високите нива на хармониците на тока, които с изключение на трети хармоник са значително над допустимите норми дадени в IEC 61000-3-4. Тези високи стойности на хармониците на тока водят до допълнителни загуби и влошаване на изолационните свойства на експлоатираното електрообзавеждане в помпената станция.

Литература

[1] Цанев Ц., С. Цветкова, ***Качество на електрическата енергия***, Авангард Прима, София, 2011.

[2] БДС EN 50160 ***Характеристика на напрежението на електрическата енергия доставяна от обществените разпределителни електрически системи***, 2006.

[3] 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.

Автори: Светлана Цветкова, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *stzvet@tu-sofia.bg*; Ангел Петлешков, гл. ас., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *apetl@tu-sofia.bg*; Николай Стоманярски, маг. инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *nstomaniarski@tu-sofia.bg*.

Постъпила на 02.09.2013 г. **Рецензент** доц. д-р В. Господинов

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ С РАЗРЯДНИ ЛАМПИ

Симона Петракиева, Галя Георгиева-Таскова, Захари Иванов

Резюме: *В настоящата работа са определени активното съпротивление на дросела $R_{др}$ и неговата индуктивност $L_{др}$ чрез поредица от симулации с програмния продукт OrCAD Capture. Получените стойности за $R_{др}$ и $L_{др}$ гарантират предварително измерена ефективна стойност на тока през всяка от изследваните лампи. Анализирани са луминесцентни лампи и натриеви лампи високо налягане с нелинейни волт-амперни характеристики. При синусоидално захранващо напрежение са измерени чрез осцилограф съответните несинусоидални характеристики на $U_л = U_л(t)$, които впоследствие са апроксимирани в OrCAD Capture. Получените резултати от симулациите са сравнени с аналитично определени на базата на метода на непосредствено интегриране на моментните стойности за изчисляване на електрически вериги с разрядни лампи. По същество те са по-близки до действителните, тъй като апроксимацията на $U_л = U_л(t)$ за всяка от лампите е по-точна поради факта, че използва по-голям брой опорни точки от тази, предложена в литературата.*

Ключови думи: *разрядни лампи, пускорегулиращи апарати, активно съпротивление и индуктивност на електромагнитен дросел*

CALCULATION OF CIRCUITS WITH DISCHARGE LAMPS

Simona Petrakieva, Galia Georgieva-Taskova, Zahari Ivanov

Abstract: *In this paper the values of the active resistor $R_{др}$ and the inductance $L_{др}$ of the ballast are determined by series of simulations with program OrCAD Capture. The final results for $R_{др}$ and $L_{др}$ guarantee the measurement RMS value of the current through each of the investigated lamps.Different types of fluorescent lamps and high pressure Na lamps with nonlinear volt-amper characteristics are analyzed. The expressions $U_л = U_л(t)$ are measured experimentally and are approximated in OrCAD Capture. The simulations' results are compared with the analytical ones, calculated by direct integration of the instantaneous values for calculation the electrical circuits with discharge lamps. In essence they are closely to the actual, because the approximation of $U_л = U_л(t)$ for each lamp is more accurate because of the fact that it user bigger number of basic points than the existing approximation.*

Keywords: *discharge lamps, control gear, active resistant and inductivity of the ballast*

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. Въведение

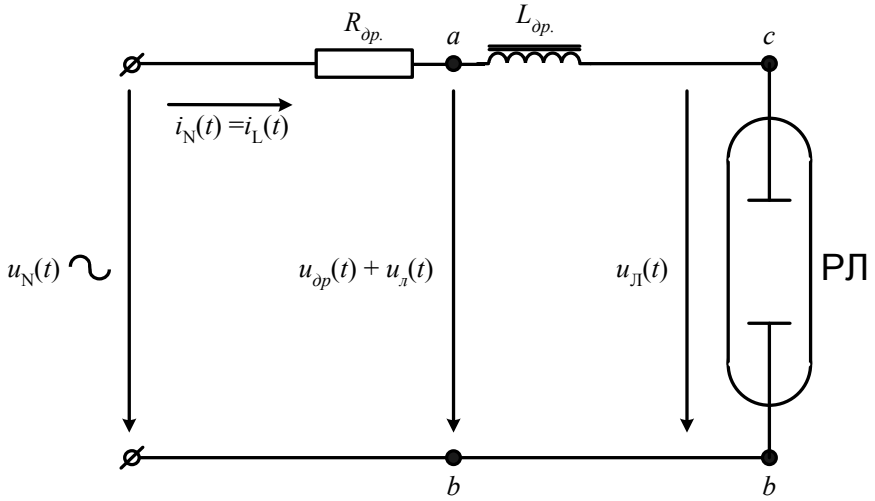
Разрядните лампи са нелинейни елементи и тяхната волт-амперна характеристика има нелинеен характер. По тази причина при включването им към синусоидално захранващо напрежение съответният пад на напрежение върху лампата е с несинусоидална форма.

Волт-амперните характеристики на разрядните лампи (РЛ) имат падащ характер. Затова при променлив ток РЛ работи само чрез последователно включено баластно устройство, ограничаващо тока в нормални граници. В качество на стабилизиращ елемент се използват основно индуктивни съпротивления - дросели.

Настоящата статия е организирана по следния начин. В точка 2 е дефинирана задачата за намиране на активното съпротивление и индуктивността на електромагнитния дросел, свързан последователно на лампата. В точка 3 е приложена съществуваща в литературата методология за аналитично изчисляване на тези параметри. Последните са определени и моделирани посредством програмен продукт OrCAD Capture CIS v. 16.3 в точка 4. Предимствата на метода са изложени като заключителни бележки в последната точка 5, където са потвърдени чрез симулации.

2. Дефиниране на проблема

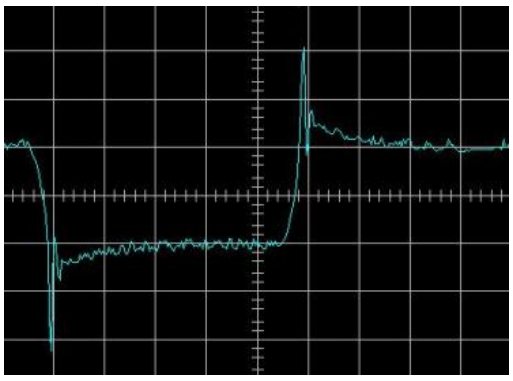
Нека разгледаме показаната на фиг.1 електрическа верига, в която последователно на анализираната лампа е включен електромагнитен дросел (бобина с индуктивност $L_{др}$ и активно съпротивление $R_{др}$) с цел стабилизация на режима на работа на лампата.



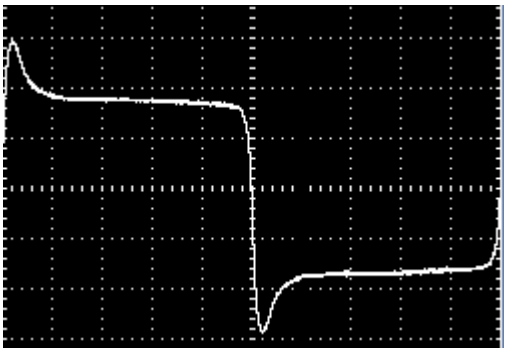
Фиг.1. Схема на системата разрядна лампа с дросел

Несинусоидалната форма на напрежението върху разрядните лампи е показана на фиг.2.а и фиг.2.б, съответно за луминесцентна лампа (ЛЛ) и натриева лампа високо налягане (НЛВН).

Забележка: Характеристиките $U_л = U_л(t)$ са измерени чрез осцилограф.



Фиг.2.а



Фиг.2.б

В този случай, за да протече през лампата ток със зададена ефективна стойност $I_л$, последователно на нея, се включва електромагнитен дросел с индуктивност $L_{др}$ и активно съпротивление $R_{др}$. Стойността на последното се определя по формулата:

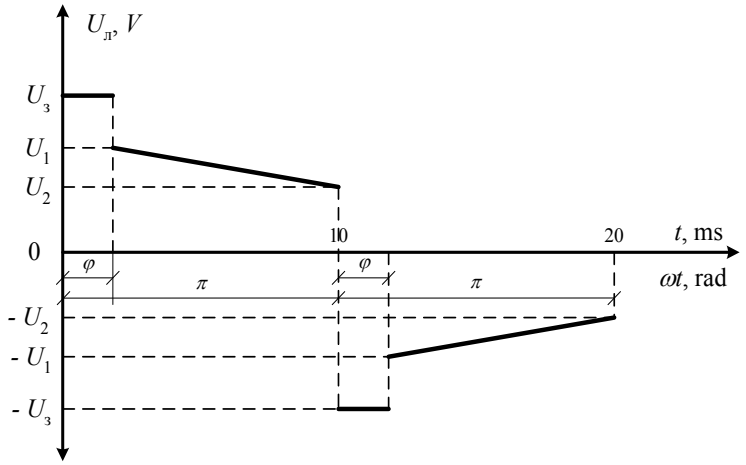
$$R_{др} = \frac{P_{др}}{I_л^2}, \qquad (1)$$

където $P_{др}$ и $I_л$ са каталожни данни.

Стойността на индуктивността на бобината $L_{др}$ е толкова по-близка до действителната, колкото съответната апроксимация на нелинейната характеристика на напрежението върху лампата $U_л = U_л(t)$ е по-близка до определената по експериментален път.

3. Изчисляване на индуктивността на електромагнитния дросел $L_{др}$ при апроксимация на $U_л = U_л(t)$ чрез трапецовидна функция

Полученото чрез експеримента изменение на напрежението върху изследваната разрядна лампа $U_л = U_л(t)$ е периодична функция с несинусоидална форма (вж. фиг.2.а и фиг.2.б). За улеснение на процеса на определяне на индуктивността на дросела тя може да се апроксимира с по части линейна функция в рамките на всеки неин период [1, 2, 3, 4] – фиг.3.



Фиг.3. Акпроксимация на $U_л = U_л(t)$ с почасти линейни функции

Падът на напрежение върху светещи разрядни лампи за един полупериод е относително стабилен за различни видове и модели. Обикновено той се означава с:

$$\delta = \frac{U_1 - U_2}{2.U_{л\,ср.}}, \tag{2}$$

където:

$$U_{л\,ср.} = \frac{U_1 + U_2}{2} \tag{2a}$$

Забележка: При ЛЛ $\delta = 0,08 \div 0,25$, а при НЛВН - $\delta = 0,1 \div 0,22$.

Отношението $m = \frac{U_{cb}}{U_{ab}} = \frac{U_{л}}{U_{др+л}}$ отчита доколко напрежението върху разрядната лампа е по-малко от сумарното върху лампата и дросела, свързани последователно. По данните за всяка лампа то се определя по формулата:

$$m = \frac{U_{л\,ср}}{U_N}.\left(1 + 0,8.\frac{P_{др}}{P_{л}}\right) = \frac{U_1 + U_2}{2U_N}.\left(1 + 0,8.\frac{P_{др}}{P_{л}}\right). \tag{3}$$

Продължителността на първоначалния пик на графиката е равен на ъгъла на дефазиране на захранващото напрежение и тока през лампата φ, който се определя от коефициента на мощността във веригата ($cos\ \varphi$). Последният се изчислява като се заместят съответните стойности на δ и m във формулата:

$$\cos\varphi = 0,9m.\frac{\sqrt{1 - 1,23m^2} - 0,64m\delta}{\sqrt{1 - 1,18m^2 - 1,14m\delta\sqrt{1 - 1,23m^2}}}. \tag{4}$$

Отчитайки факта, че $0 < \varphi < 90^o$ се определя

$$tg\varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{\cos\varphi}, \tag{5}$$

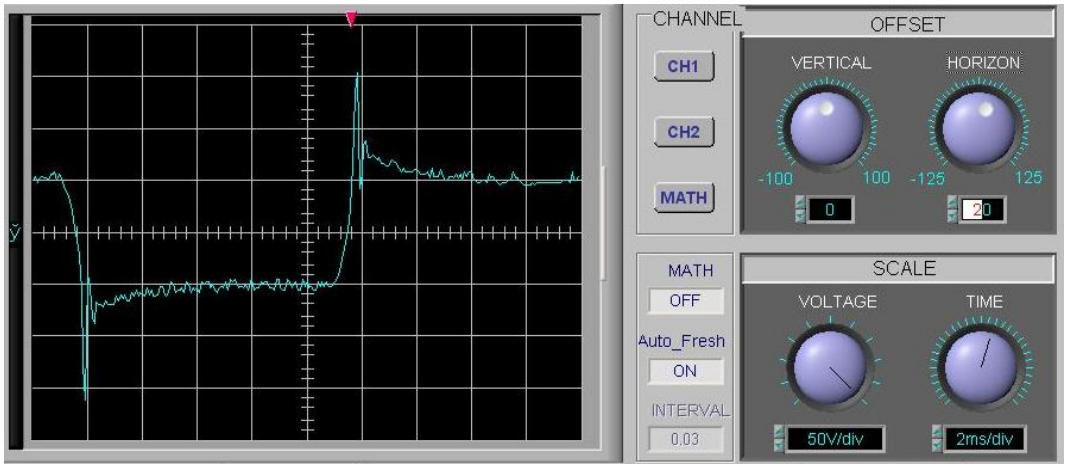
но $$tg\varphi = \frac{Q_{др}}{P} = \frac{\omega L_{др}.I_{л}^2}{\left(R_{др} + R_{л}\right).I_{л}^2} = \frac{\omega L_{др}}{\left(R_{др} + R_{л}\right)},$$

откъдето следва, че:

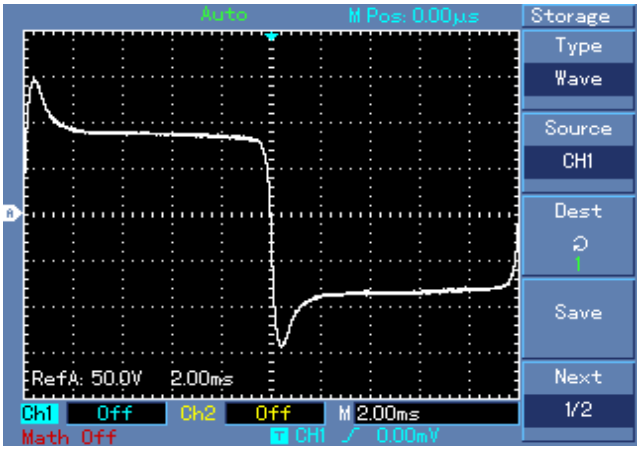
$$L_{др} = \frac{tg\varphi.\left(R_{др} + R_{л}\right)}{\omega}. \tag{6}$$

Изследвани са две разрядни лампи – ЛЛ (с $P_{л} = 18\ W$) и НЛВН (с $P_{л} = 250\ W$). По каталожни данни ($P_{Г}$, $P_{л}$, $I_{л}$, където $P_{Г}$ е генерираната мощност) и по експе-

рименталнu данни (фиг.4.а и фиг.4.б) за всяка от тях са определени съответно $P_{др}$ и U_1 и U_2.



Фиг.4.а. Напрежение $U_л = U_л(t)$ върху ЛЛ с активна мощност 18 W



Фиг.4.б. Напрежение $U_л = U_л(t)$ върху НЛВН с мощност 250 W

На тази основа са изчислени:

$$P_{др} = P_Г - P_л \tag{7а}$$

и

$$R_{др} = \frac{P_{др}}{I_л^2}, \tag{7б}$$

$$R_л = \frac{P_л}{I_л^2}, \tag{7в}$$

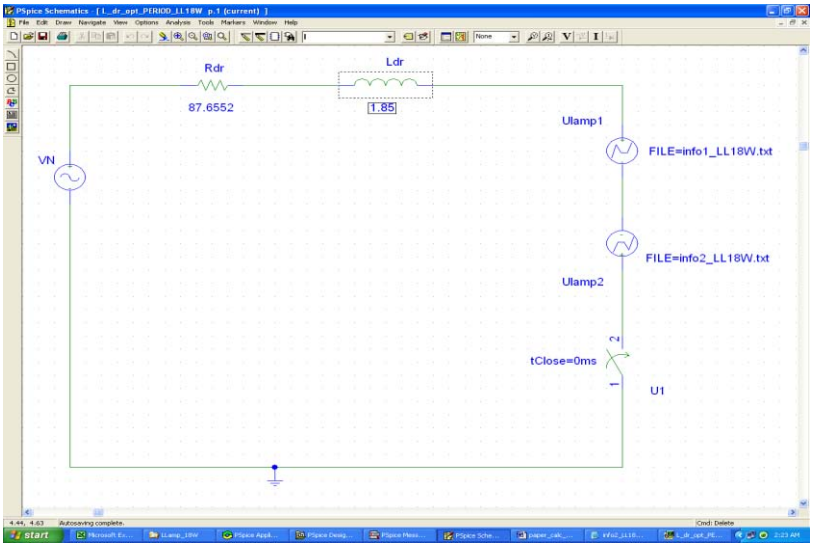
откъдето след прилагане на формули (2) и (3) са определени стойностите на коефициентите δ и m за всяка от изследваните лампи. Замествайки в (6) получените резултати, са определени стойностите на индуктивностите $L_{др}$ (респ. индуктивните съпротивления на $\omega L_{др}$) за всяка от анализираните разрядни лампи. Получените резултати са обобщени в табл.1.

Табл.1. Изследване на ЛЛ 18 W, НЛВН 250 W

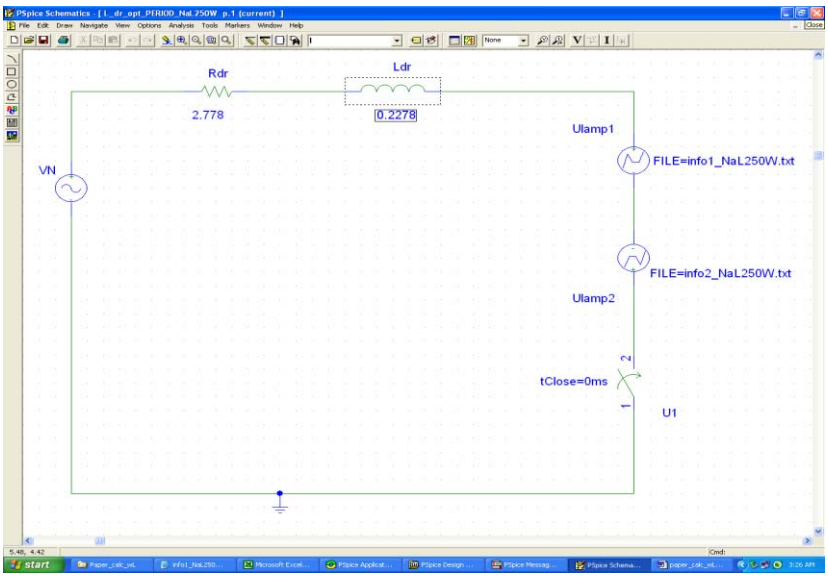
Вид лампа	$P_Г$, W	$P_Л$, W	$I_Л$, A	U_1, V	U_2, V	δ, -	m, -	$R_{др}$, Ω	$R_л$, Ω	$L_{др}^{изч}$, H	$\omega L_{др}^{изч}$, Ω
ЛЛ	30	18	0,37	70	45	0,2174	0,3833	87,6552	131,4828	1,9192	603,1679
НЛВН	275	250	3	140	90	0,2174	0,54	2,778	27,778	0,1796	56,4361

4. Определяне на индуктивността на електромагнитния дросел $L_{др}$ чрез симулации с OrCAD Capture

Поведението на всяка от анализираните разрядни лампи – ЛЛ (с $P_л = 18\ W$) и НЛВН (с $P_л = 250\ W$) е моделирано с помощта на програмния продукт OrCAD Capture CIS v. 16.3. Съответните схеми на изследваните електрически вериги са показани на фиг.5.а и фиг.5.б.



Фиг.5.а. Симулационен модел на ЛЛ с $P_л = 18\ W$



Фиг.5.б. Симулационен модел на НЛВН с $P_л = 250\ W$

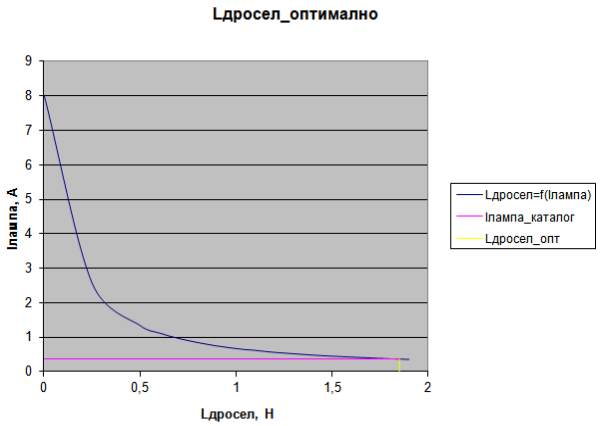
Измерените несинусоидални характеристики на напреженията $U_л = U_л(t)$ върху всяка от лампите (съгласно фиг.4.а и фиг.4.б) са апроксимирани с почасти линейни характеристики, както следва:

Табл.2. Апроксимация на $U_л = U_л(t)$ за един полупериод с почасти линейни функции

Вид лампа										
ЛЛ $P_л = 18\ W$	***t, ms***	2.4	3	3.4	3.7	4	6	8	9.5	10
	$U_Л$, V	70	60	55	52.5	50	45	42.5	40	0
НЛВН $P_л = 250\ W$	***t, ms***	0,5	1	1,5	2	4	5	7	9	10
	$U_Л$, V	140	110	105	100	97	95	92	90	0

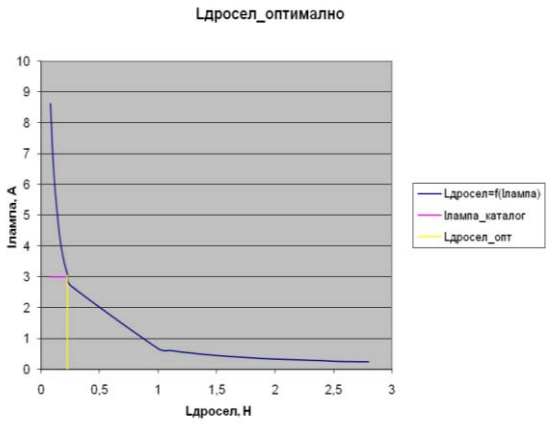
На базата на тези апроксимации са извършени симулации, при които за всяка от анализираните лампи е определена индуктивността на дросела $L_{др}$, която осигурява съответен ток през лампата 0,37 A (за ЛЛ с $P_л = 18\ W$) и 3 A (за НЛВН с $P_л = 250\ W$). Резултатите от тези симулации са показани съответно на фиг.6.а и фиг.6.б)

$L_{др}^{сим} = 1,85\ H$



Фиг.6.а. Индуктивност на дросела получена чрез симулация при ЛЛ с $P_л = 18\ W$

$L_{др}^{сим} = 0,2278\ H$



Фиг.6.б. Индуктивност на дросела получена чрез симулация при НЛВН с $P_л = 250\ W$

5. Сравнителен анализ на стойностите за индуктивността на електромагнитния дросел $L_{др}$, получени чрез аналитични изчисления и посредством симулации с OrCAD Capture CIS v. 16.3

Изчислените аналитично стойности на индуктивностите на дроселите $L_{др}^{изч}$ (респ. индуктивното им съпротивление $\omega L_{др}^{изч}$), както и съответните им еквивалентни (получени при симулация) - $L_{др}^{сим}$ с (респ. $\omega L_{др}^{сим}$) са обобщени в табл.3. Там е посочена и относителната разлика (в проценти) между резултатите от симулацията и

аналитично изчислените за всяка от анализираните лампи, която се изчислява съгласно формулата:

$$\delta = \frac{\left| L_{др}^{сим} - L_{др}^{изч} \right|}{L_{др}^{сим}}.100,\ \% \qquad (8)$$

Табл.3. Сравнение на получените стойности за $L_{др}$ при симулация, аналитично изчисление и от каталог за ЛЛ 18 *W*, НЛВН 250 *W*

Вид лампа	$L_{др}^{сим}$, *H*	$\omega L_{др}^{сим}$, *Ω*	$L_{др}^{изч}$, *H*	$\omega L_{др}^{изч}$, *Ω*	δ, %
ЛЛ	**1,85**	581,4286	**1,9192**	603,1679	3,74
НЛВН	**0,2278**	71,5943	**0,1796**	56,4361	21,17

Получените чрез симулация стойности на $L_{др}^{сим}$ за изследваните разрядни лампи са по-близки до реалните стойности на индуктивността, гарантиращи съответния ток през лампата (0,37 *A* – за ЛЛ и 3 *A* – за НЛВН) – взет от каталожни данни. Това се дължи на по-голямата точност при апроксимиране на $U_л = U_л(t)$, която в този случай е с почасти линейна функция (вж. табл. 2), отчитаща наличния пик в началото на всеки полупериод и вдлъбнатия характер на функцията до края на полупериода. Докато при аналитичните изчисления $U_л = U_л(t)$ при апроксимацията се отчита само трапецовидната функция (от фиг.3) и началният пик се пренебрегва.

5. Заключение

Промяната на захранващото напрежение, както и понастоящем увеличаване на номиналното напрежение в страната от 220 V на 230 V изисква преизчисляване на стойностите на параметрите на индуктивното баластно съпротивление така, че да се осигури зададен ток, напрежение и мощност на разрядната лампа.

Работните характеристики на метал - халогенните и натриевите лампи високо налягане се определят от съответните характеристики на дроселите. Индуктивното съпротивление е точно настроено за съответната лампа. Докато при другите разрядни лампи се допуска отклонение и над 10%, то при МХЛ и НЛВН изискват точност на импеданса от ± 2%.

Получените стойности на индуктивността $L_{др}$ на електромагнитен дросел чрез симулацията посредством програмния продукт OrCAD Capture са по-точни (в смисъл, че осигуряват ефективна стойност на тока през лампата по-близка до дадената в каталозите), тъй като апроксимираната функция на напрежението върху лампите $U_л = U_л(t)$ е по-близка до експериментално измерената такава. Това се дължи на факта, че се използва почасти линейна функция, която притежава следните предимства. Първо, отчита пика в началото на всеки полупериод на функцията и второ, взема предвид нейния вдлъбнат характер за разлика от съществуващите в литературата методи, които я апроксимират с трапецовидна функция.

Литература

[1] Sturm C.H., E. Klein Betriebsgeräte und Shaltungen fűr elektrische Lampen. Műnchen, Siemens AG. 1992.

[2] Рохлин Г.Н. Разрядные источники света М., Энергоатомиздат, 1991.

[3] Афанасьева Е.И., Скобелев В.М., Источники света и пускорегулирующая апаратура. М., Энергоатмоиздат, 1986.

[4] Краснопольский А. Е., Соколов В. Б., Троицкий А.М., Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп М., Энергоатомиздат, 1988.

Автори: Симона Петракиева, доц. д-р, катедра Теоретична Електротехника, Факултет Автоматика, Технически Университет - София, E-mail address: *petrakievas-te@tu-sofia.bg*; Галя Георгиева-Таскова, ас. катедра Теоретична Електротехника, Факултет Автоматика, Технически Университет - София, E-mail address: *gvgt@tu-sofia.bg*; Захари Иванов, доц. д-р катедра ЕСЕО, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на: 02.09.2013 **Рецензент:** гл. ас. д-р Камелия Николова

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВХОДЕН ТРАНСФОРМАТОР ОТ ЗАЩИТНИ ПРЕКЪСВАЧИ ЗА НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ ПРИ РАЗЛИЧНА ФОРМАНА ЗАХРАНВАЩОТО НАПРЕЖЕНИЕ

Станимир Вичев, Анна Иванова

Резюме: *В доклада са показани резултати от изследване на работата на входен (сумиращ) трансформатор от защитен прекъсвач за напрежение 230/400V при различна форма на захранващото напрежение. Изпитването се провежда със синусоидално напрежение, еднопътно и двупътно изправяне, схема Ларионов и непълнофазни режими. На базата на регистрираните токове и напрежения с цифров осцилоскоп се определят ефективните стойности на входящия ток и изходното напрежение от трансформатора. Построяват се характеристики „вход-изход“ и се провежда хармоничен анализ. Обработването на резултатите се провежда в MATLAB.*

Ключови думи: *защитен прекъсвач, входен трансформатор, захранващо напрежение, характеристика „вход-изход”, хармоничен анализ.*

STUDY OF THE INPUT TRANSFORMER OF SAFETY CIRCUIT-BREAKERS FOR LOW VOLTAGE UNDER DIFFERENT FORMS OF SUPPLY VOLTAGE

Stanimir Vichev, Anna Ivanova

Abstract: *The report presents the results of a study of the performance of the input (residual) transformer of safety circuit-breaker (RCD) for voltage 230/400V under different forms of supply voltages. The study was performed with sinusoidal voltage, one-way and two-way rectification, scheme ”Lorionov” and regimes without one phase. Based on the registered currents and voltages using the digital oscilloscope, effective values on the input current and the output voltage from the transformer have been determined. Characteristics “input-output” have been built and a harmonic analysis was performed. The processing of the results was conducted by MATLAB.*

Keywords: *safety circuit-breaker, input transformer, supply voltage, characteristic „input-output”, harmonic analysis*

1. Въведение

С приемането на Наредба №3/ 9.06.2004 г. се въвежда изискването за използване на защитни прекъсвачи в мрежите ниско напрежение за защита срещу поражения от електрически ток. Тези прекъсвачи са предназначени да изключват захранващото напрежение, максимално бързо, при възникнала опасност за поражение от електрически ток в резултат на дефект на изолацията. Монтирането

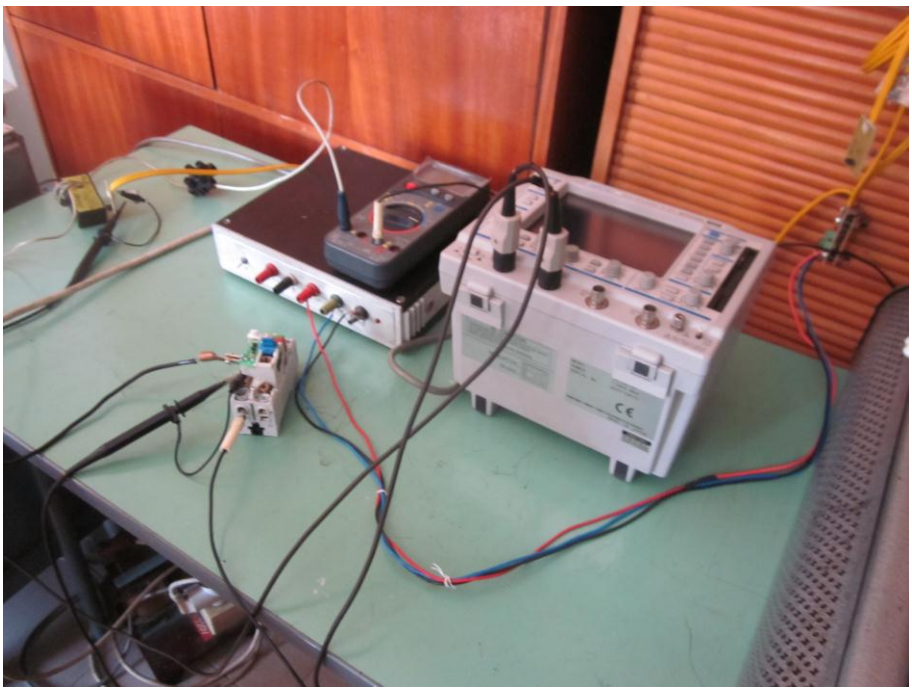
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

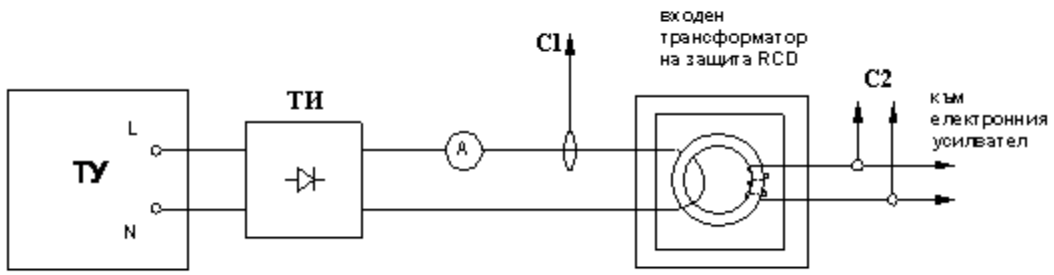
на защитни прекъсвачи е задължително за защита на всички токови кръгове, захранващи контактни излази за преносими електрически уреди. В офисите и жилищните сгради, както и в производствените помещения, регулиране и управление, съдържат електронни елементи, които внасят смущения във вид на пулсации и постояннотокова съставка на захранващото напрежение. Във връзка с това, има голямо значение какъв тип защитен прекъсвач се монтира в електрическите инсталации на различните помещения. Фирмите предлагат различни по тип защитни прекъсвачи, в зависимост от вида на консуматорите, но в много случаи инсталацията се изпълнява с определен тип защитни прекъсвачи, без да е съобразено какъв вид консуматори ще се включват към съответните контактни излази. Поради тази причина е необходимо да се изследва работата на защитни прекъсвачи от определен тип при различни видове захранващо напрежение.

2. Цели на изследването

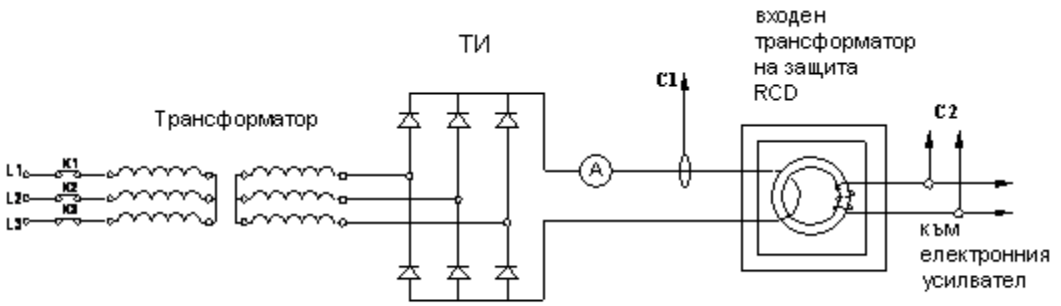
Задачата на изследването е да се провери действието на входния сумиращ трансформатор от защитен прекъсвач, предназначен за работа при синусоидално напрежение, когато работи при различни по вид захранващи напрежения. Изследването сравнява работата на защитния прекъсвач при различни варианти - синусоидално напрежение, еднополупериодно и двуполупериодно изправяне, изправяне чрез схема „Ларионов” и непълнофазни режими на работа. За целта се осцилографират входния ток на защитния прекъсвач и вторичното изходно напрежение на сумиращия трансформатор. Изпитваният защитен прекъсвач (RCD, дефектнотокова защита), показан на фиг.1, е изпълнен с вграден токов трансформатор за сумиране на токовете (тип Феранти) с тороидален магнитопровод. През неговата първична намотка се подава входния ток, а вторичната намотка на трансформатора е свързана към електронен усилвател, който подава сигнал на изходното помощно реле на устройството.



Фиг.1. Опитна постановка



Фиг.2. Схема с еднополупериодно и двуполупериодно изправено входно напрежение



Фиг.3. Схема „Ларионов” и непълнофазни режими

На фиг.2 е показана схемата за изпитване на защитата при режимите със синусоидално напрежение, еднополупериодно и двуполупериодно изправено напрежение. Захранването на схемата става от товарно устройство с възможности за подаване на много ниски стойности на входящия ток. Към товарното устройство е включен изправителен блок, който има възможност за подаване на еднополупериодно изправено напрежение или изход от схема „Грец”. На фиг.3 е показана схема за изпитване на защитата при режими на трифазно изправяне със схема „Ларионов”. Схемата има също възможност за формиране на непълнофазни режими на работа чрез прекъсване на захранването на една или две фази. Протичащият ток в първичната верига, както и напрежението във вторичната верига на сумиращия трансформатор се осцилографират с помощта на четириканален цифров осцилоскоп IWATSU тип DS 8814P, 100MHz; 400Ms/s.

Сондата C1 отчита първичния ток на входния трансформатор. Поради ниските стойностите на токовете, в границите от 5 до 300mA, се използва допълнителна чувствителна сонда. За информация е включен и чувствителен амперметър. Сондата C2 отчита стойностите на напрежението във вторичната верига на сумиращия трансформатор.

В табл.1 са представени получените резултати от снетите осцилограми при синусоидално напрежение, еднополупериодно и двуполупериодно изправено напрежение. Изчислени са ефективните стойности на токовете и вторичните напреженията. Направен е хармоничен анализ на протичащия ток през трансформатора и е изчислен коефициента на несинусоидалност THCD (total harmonic current distortion).

$$THCD = \frac{1}{I_1}\sqrt{\sum_{h=2}^{n} I_h^2}$$

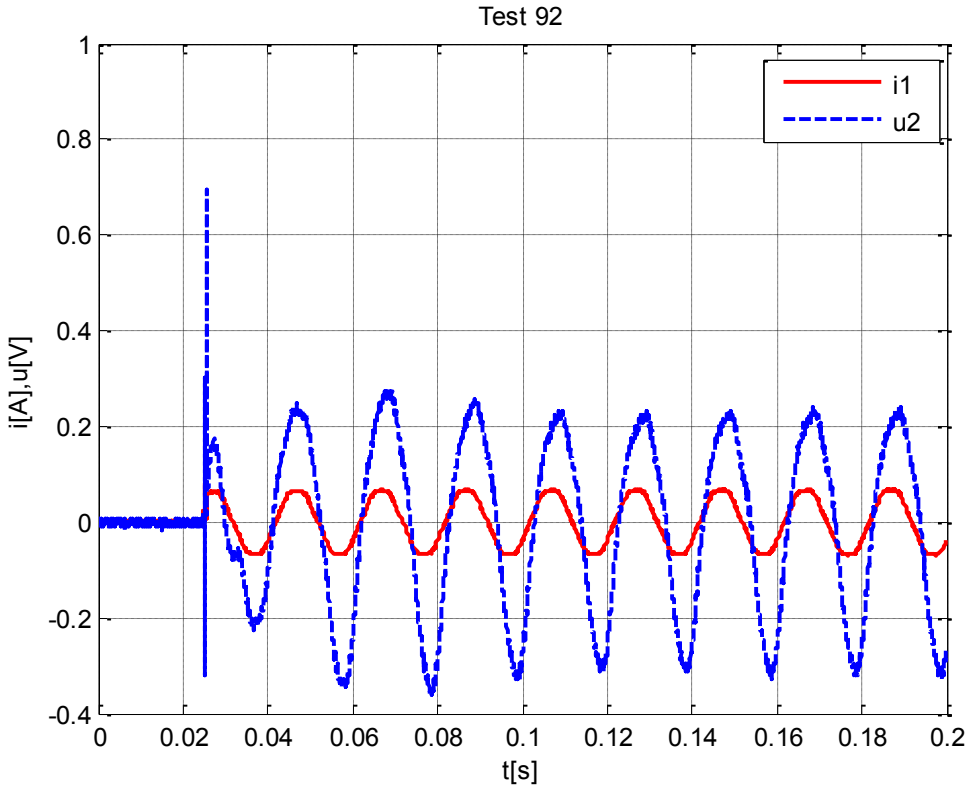
Табл.1

синусоидално напрежение			схема с еднополупериодно изправяне			схема „Грец“		
Опит №	Ieff [mA]	Ueff [mV]	Опит №	Ieff [mA]	Ueff [mV]	Опит №	Ieff [mA]	Ueff [mV]
1	6.8	36.2	1	10.02	39.25	1	12.91	14.89
2	26.9	112.2	2	13.85	51.09	2	23.95	17.36
3	47.2	183.9	3	25.33	83.15	3	29.84	34.97
4	48.8	187.8	4	33.14	106.48	4	35.75	41.56
5	101.1	371	5	42.17	127.69	5	60.41	72.29
6	255.7	435	6	68.14	198.21	6	113.68	139.04
7	276.9	433.7	7	136.57	321.62	7	220.99	242.33
8	321.6	438.7	8	280.34	345.35	8	341.88	230.47
9	502.5	446.7	9	427.38	350.51	9	570.05	202.35
10	965.2	457.7	10	700.76	356.09	10	1105.79	163.43

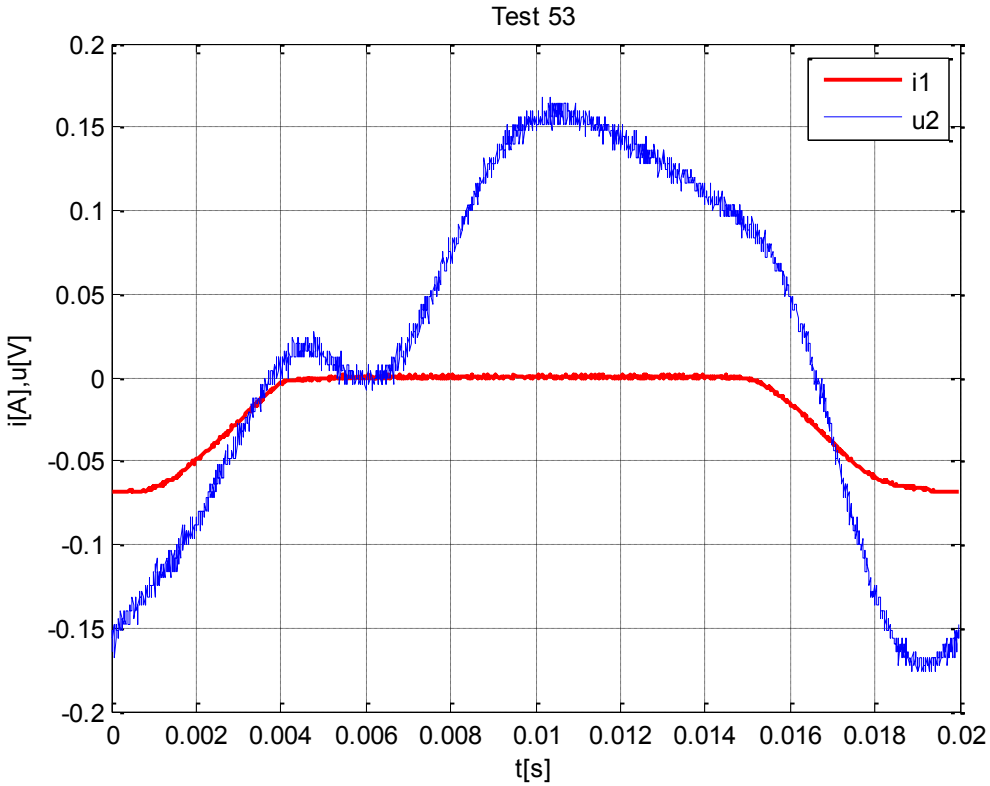
На фиг.4, фиг.5 и фиг.6 са показани примерни осцилограми на работата на входния сумиращ трансформатор при различнте видове захранващо напрежение.

Табл.2

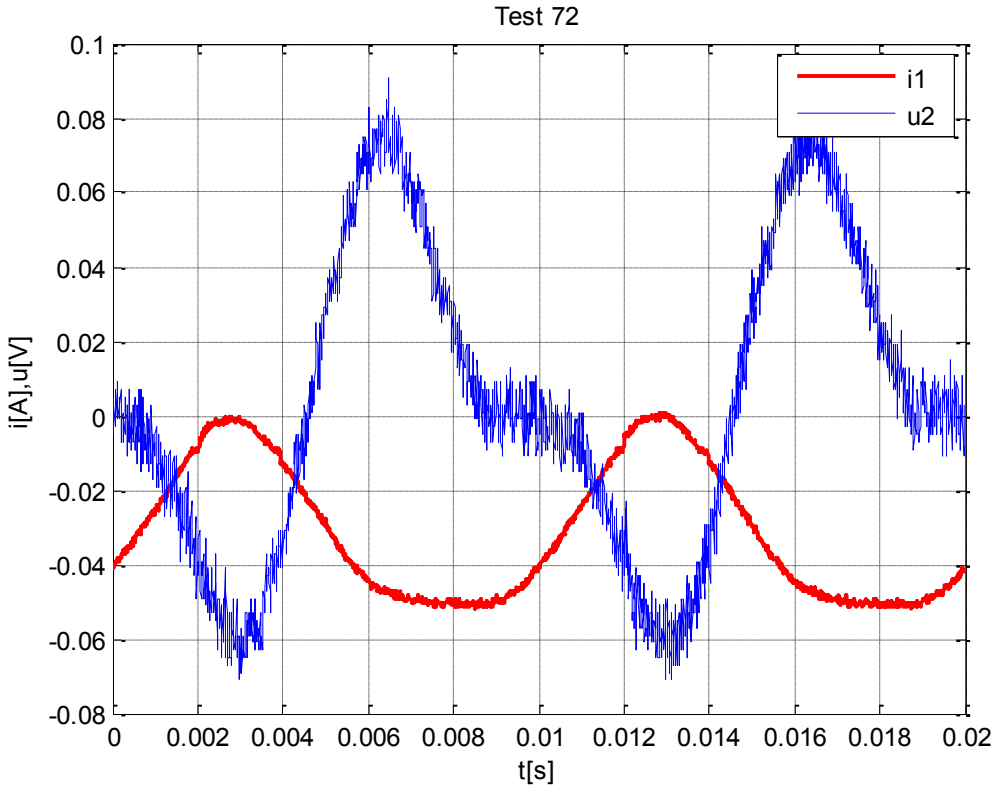
Схема „Ларионов“			Непълнофазен режим		
Опит №	Ieff [mA]	Ueff [mV]	Опит №	Ieff [mA]	Ueff [mV]
1	20.78	11.16	1	14.94	14.91
2	35.98	12.56	2	25.22	24.2
3	59.63	14.48	3	42.06	41.88
4	93.18	11.63	4	65.39	56.55
5	213.24	14.76	5	162.29	174.04
6	265.02	15.17	6	208.34	239.28
7	376.58	14.48	7	277.32	198.42
8	493.31	10.62	8	356.68	154.89
9	835.33	8.21	9	598.79	128.3



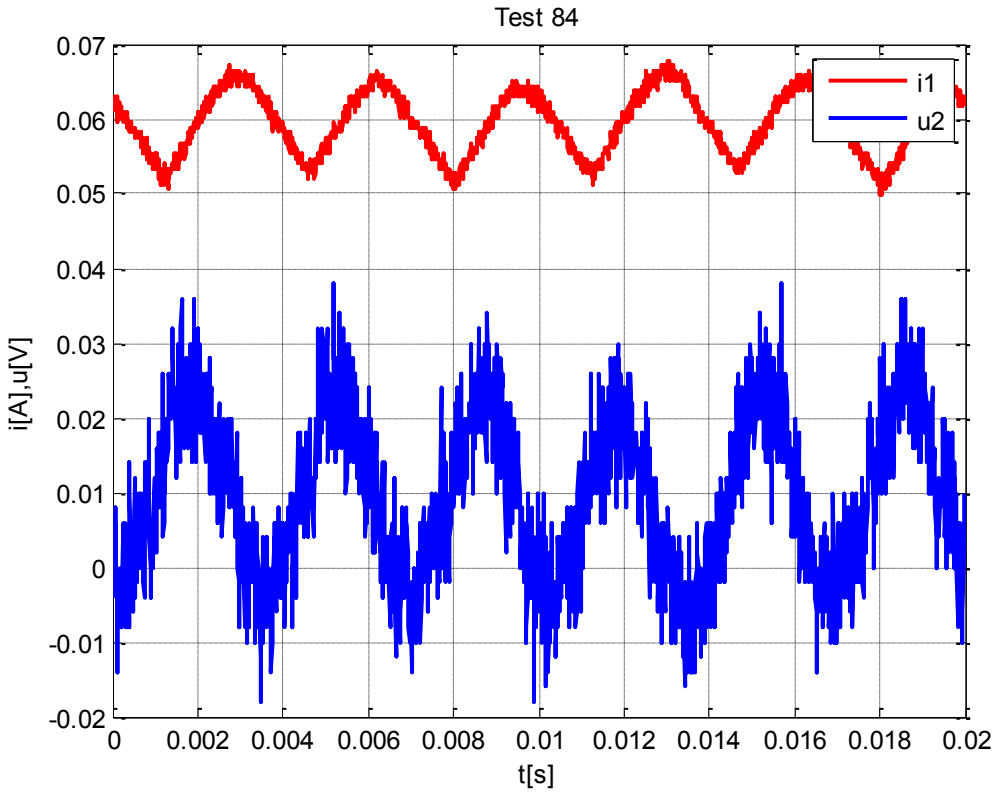
Фиг.4. Осцилограма при синусоидално напрежение
Ieff = 48.8 mA, Ueff = 187.8 mV, THCD = 0.0411



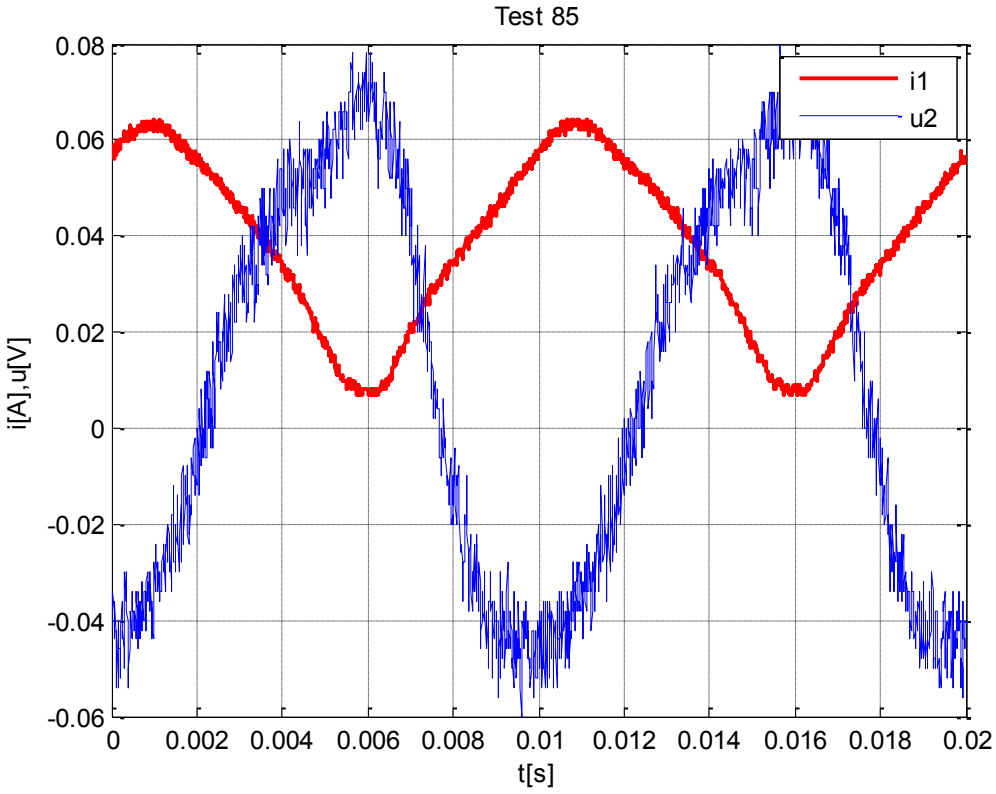
Фиг.5. Осцилограма при еднополупериодно изправяне
Ieff = 33.14 mA, Ueff = 106.48 mV, THCD= 0.5493



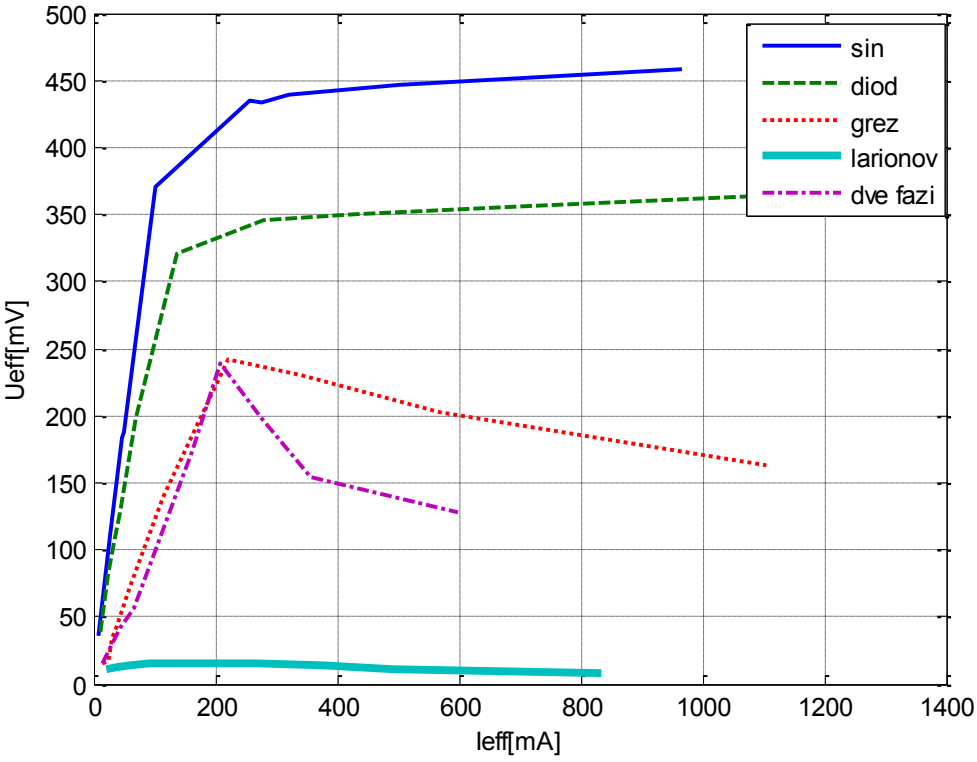
Фиг.6. Осцилограма при двуполупериодно изправяне
Ieff = 33.14 mA, Ueff = 41.56 mV, THCD = 59.904



Фиг.7. Осцилограма при схема" Ларионов"
Ieff = 59.63 mA, Ueff = 14.48 mV, THCD = 20.549



Фиг.8. Осцилограма при непълнофазен режим в схема „Ларионов”
Ieff = 42.06 mA, Ueff = 41.88 mV, THCD = 89.067



Фиг.9. Зависимости на изходното напрежение от ефективната стойност на протичащия през трансформатора ток

На базата на получените резултати от проведените изследвания са получени зависимостите „вход-изход” на входния сумиращ трансформатор от защититен прекъсвач за различните режими на работа (фиг.9).

3. Заключение

1. Включването на различни по тип потребителите в мрежата ниско напрежение води до деформиране на напрежението и усложнява работата на защитните прекъсвачи. Отчитайки резултатите от направените изследвания е направена количествена оценка на това влияние.
2. Изследването на различните деформации на напрежението показва като най-неблагоприятен вариант схемата „Ларионов”, поради наличието на значителна постояннотокова съставка.
3. При стойности на входния ток до 200mA има линейна зависимост между ефективните стойности на изходното напрежение и входния ток. При схемите с двупътно изправен ток и непълнофазен режим, при токовете над 200mA, характеристиката е намаляваща.
4. На базата на направените измервания следва, че изследваните защитните прекъсвачи намаляват значително чувствителността си при токове, съдържащи пулсации и постояннотокови съставки и заработват при много по-високи стойности на входния ток.

Литература

[1] Наредба №3. Устройство на електричеките уредби и електропроводните линии. ДВ, бр 90/13.10.2004г. и бр.91/14.10.2004
[2] IEC 60364-5-53. Testing of Residual circuit devices
[3] IEC/EN 61008-1. Residual current operated circuit - breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RSSB’s)
[4] Иванова А., Влияние на формата на тока върху работата на защитни прекъсвачи за ниско напрежение, IV Научна конференция, ЕФ 2012

Автори: Станимир Вичев, доц. дтн. инж., “Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *svichev@tu-sofia.bg*; маг. инж. Анна Иванова, гл. ас. КЕЕ- Технически Университет - София, докторант в катедра “Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *anna_ivanova@gbg.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р К. Малчев

ИЗЛИШНО ЗАРАБОТВАНЕ НА РЕЛЕЙНИТЕ ЗАЩИТИ НА СИНХРОННИ ГЕНЕРАТОРИ ПРИ ПОВРЕДИ В НАПРЕЖЕНОВИТЕ ИМ ТРАНСФОРМАТОРИ

Станимир Вичев, Пламен Ризов

Резюме: *В доклада се изследва опасността от излишно заработване на земната статорна защита на големи синхронни генератори при повреда в първичните намотки на напреженовите трансформатори на изводите им. Използват се записи от регистраторът на повреди на конкретен генератор. Доказва се възможността от появата на напрежение с нулева последователност на входа на цифровите защити при късо съединение в първичните намотки на напреженовите трансформатори на изводите на синхронен генератор. Анализира се развитието на процеса и се доказва, че причина за аварията е влошената изолация на напреженов трансформатор.*

Ключови думи*: генераторни защити, напреженови трансформатори, късо съединени навивки, напрежение на нулева последователност*

SYNCHRONOUS GENERATOR RELAY PROTECTION REDUNDANT TRIP BY VOLTAGE TRANSFORMER FAULT

Stanimir Vichev, Plamen Risov

Abstract*: In the paper the danger of redundant trip of stator earth fault protection of synchronous generators was investigated during fault on the output primary winding of voltage transformers. Records from the fault registrar of the specific generator were used. There is a proof of the possibility for appearance of zero sequence voltage on the digital protection input while there is a primary winding fault in the voltage transformer on the output of the synchronous generator. The process development was analyzed and was proven, that the reason for the fault is the reduced quality of the isolation of the voltage transformer.*

Keywords: *generator protection, voltage transformer, short circuit on the primary windings, neutral voltage, zero sequence voltage*

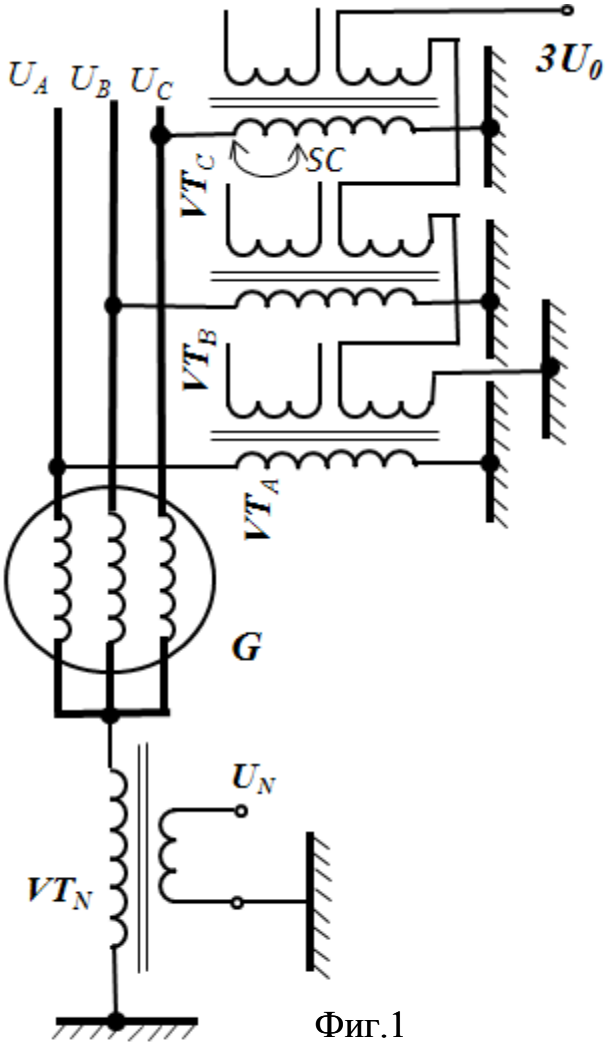
1. Въведение

В доклада се анализира действието на земната защита на статора на голям синхронен генератор при повреда в напреженов трансформатор (НТ) на изводите му. Използват се данни от конкретен случай и записите на цифровите релейни защити. Оценява се динамиката на процеса и се сравняват резултатите при късо

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

съединение с тези от пробив поради феморезонанс. Отчита се като „излишно“ заработването на защитата на генератора при повреда извън него. Препоръчват се оперативни мероприятия за намаляване на вероятността от повреди в намотките на НТ.



Фиг.1

В настоящата разработка се анализира действието на земната защита на статора на голям синхронен генератор при повреда в напреженов трансформатор (НТ) на изводите му. Използват се данни от конкретен случай и записите на цифровите релейни защити. Оценява се динамиката на процеса и се сравняват резултатите при късо съединение с тези от пробив поради феморезонанс. Отчита се като „излишно“ заработването на защитата на генератора при повреда извън него. Препоръчват се оперативни мероприятия за намаляване на вероятността от повреди в намотките на НТ.

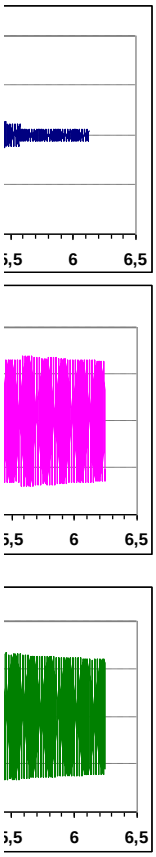
На фиг.1 е показано разположението на НТ, които участват в земните статорни защити. Изолираната неутрала на генератора (трансформаторът $\boldsymbol{VT_N}$ има много голямо съпротивление) и заземените неутрали на НТ ($\boldsymbol{VT_A}$, $\boldsymbol{VT_B}$ и $\boldsymbol{VT_C}$) създават условия за пренапрежения при земно съединение. Показано е също и късото съединение (***SC***) на част от първичната намотка на НТ $\boldsymbol{VT_C}$ във фаза ***C***. Аварията се разраства. Започва преди началото на записа. Защитата има напрежение на пускане, съответстващо на 8 V във вторичните намотки на измервателните НТ. То се достига в момента, отбелязан като нулев ($\boldsymbol{t}$ = 0s). След това напрежението $3U_0$ продължава да расте и защитата подава импулс за изключване на генераторния прекъсвач след настроеното забавяне от 0.5 s.

2. Анализ на записи от цифровите релейни защити

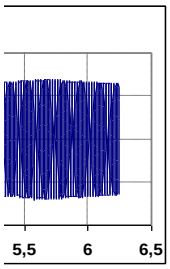
Големите генератори разполагат с две групи релейни защити [1], наричани А и В. Те са равностойни, с малки разлики в приложените функции и не е правдоподобно да се наричат „основна“ и „резервна“.

На фиг.2 и фиг.3 са показани осцилограми на напреженията по време на разглежданата авария. Защитите от група А регистрират напрежението $3U_0$ на схемата „отворен триъгълник“, а втората група - напрежението на неутралата на генератора U_N (фиг.3).

Фиг.2. Осцилограми на фазните напрежения



Фиг.2. Осцилограми на фазните напрежения



Фиг.3. Осцилограма на напрежението на неутралата En при същата повреда

и същата

От осцилограмите могат да се направят следните изводи за хода и причините на събитието:

2.1. Несиметрията във фазните напрежения на генератора спрямо земя се е проявила доста преди началото на записите в двете защити. Установено е непосредствено след изключването на блока, че има междунавивково късо съединение в първичната намотка на НТ на фаза ***C.*** Стъпаловидното нарастване на напрежението с нулева последователност се дължи на факта, че броят на късосъединените навивки непрекъснато се увеличава, тъй като през тях протича голям ток и ги загрява;

2.2. Напрежението в отворения триъгълник достига до зададената настройка от $3U_0$ = 8 V и защитната функция ”90% земна защита на статора” на единия от комплектите се пуска и след 0.5 s подава сигнал за изключване на генераторния прекъсвач;

2.3. Горните факти дават основание да се направи изводът, че защитите са заработили правилно и в съответствие с информацията от вторичните намотки на НТ;

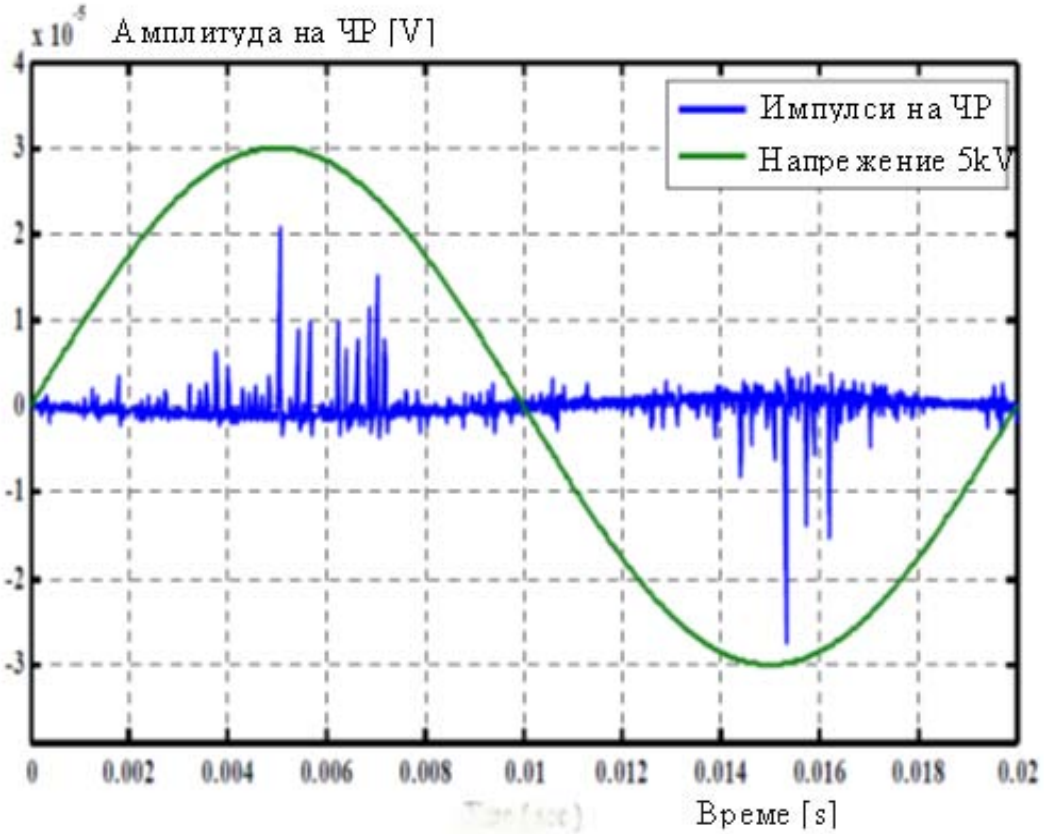
2.4. Не са заработили функциите, които използват като информация фазния ток – диференциални, токови и др., т.е. няма основание за безпокойство относно изолацията на статорните намотки на генератора.

2.5. Максимално напреженовите защитни функции на двата комплекта защити не са заработили. Този факт отхвърля предположението за наличие на трайно пренапрежение.

Счита се за най-правдоподобна причина за изключване на генератора - влошената изолация в НТ на фаза ***C*** и лъжливо, спрямо състоянието на генератора, наличие на напрежение с нулева последователност. Обсъжда се още наличието на частични разряди и появата на ферорезонанас.

3. Наличие на частични разряди

Частични разряди в изолацията на НТ са възможни [2, 3]. Те имат сравнително висока честота и записите в релейните защити не могат да ги отразят. Възможно е наблюдаваното явление да започва с частични разряди. Пример за частични разряди е публикуван в [3] и показани на фиг.4 заедно с един период от захранващото напрежение.



Фиг.4. Частични разряди, наблюдавани при приложено напрежение 5 kV [3]

Фиг.4. Частични разряди, наблюдавани при приложено напрежение 5 kV [3]

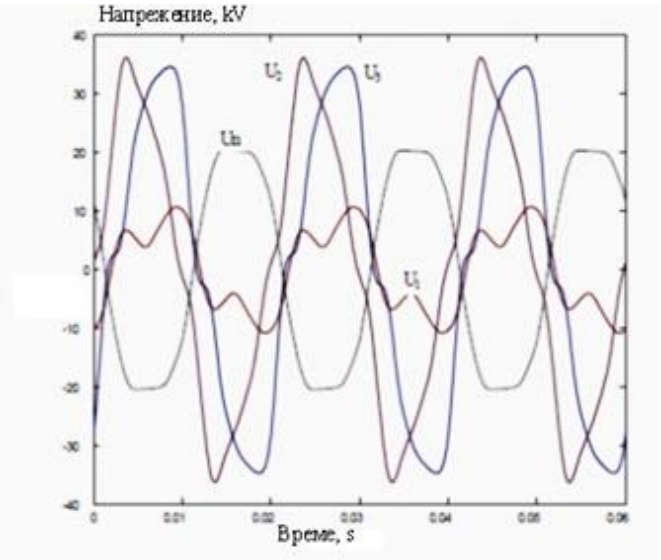
4. Наличие на феморезонанс

Максимално напреженовите функции на двата комплекта защити не са заработили и се отхвърля предположението за наличие на феморезонансен процес в електрическата схема на статорните фази.

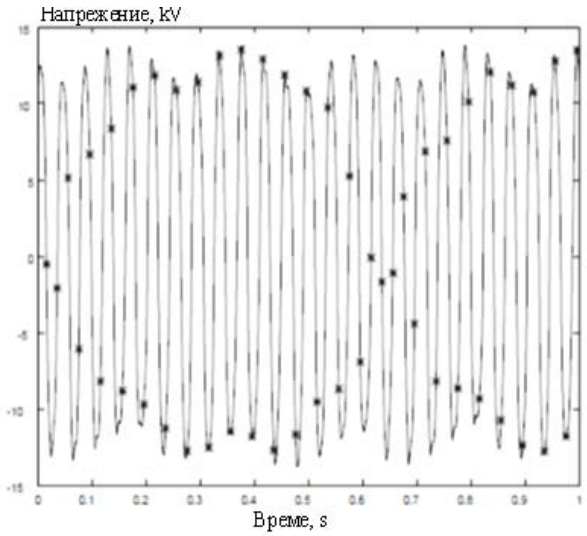
В литературата има споменати не малко наблюдения и изследвания на феморезонансни процеси с пренапрежения и дадени начини за борба с тях. Има и конкретни разглеждания на НТ до синхронни генератори [4, 5].

Показаните на фиг.5 записи на напрежения с промишлена честота и с честоти, различни от нея дават основание да се счита, че ако те са били налични при разглеждания случай, регистраторите на цифровите защити биха ги отразили.

Сравнението с фиг.2 и фиг.3 не показва никакво сходство.



a) 50 Hz



b) 25 Hz

Фиг.5. Напрежения с честота 50Hz (a) и 25Hz (b) при феморезонанс [5]

5. Заключение

1. Макар и рядко явление, к.с. в намотките на НТ води до излишно заработване на релейните защити и непроизведена енергия от генераторите.
2. Регистрирането на частични разряди и поставянето на устройства против явлението феморезонанс дават възможност за подобряване на условията за експлоатация на НТ.
3. В разглеждания случай релейната защита е реагирала правилно при повреда в НТ, въпреки че синхронният генератор е в изправност.

Литература

[1] Siemens. **Защити при земно съединение в статорните намотки на големи синхронни генератори**. *www.gobookee.net/siemens-numerical-relays/*

[2] Soon-Yong Kim, Sung-min Park, Sang-Youn Byun and Soo-Hwan Chin. **Partial Discharge Diagnosis for a Generator Potential Transformer Based on Epoxy Insulators Including Voids.** Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 3, No. 2, pp.174÷178, 2013

[3] Asima Sabat, S. Karmakar. **Simulation of Partial Discharge in High Voltage Power Equipment**. Department of Electrical Engineering National institute of Technology. Rourkela-769008. International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 3, Number 2, 2011

[4] Valverde1 V., A.J. Mazón, I. Zamora, G. Buigues. **Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations.** Electrical Engineering Department. E.T.S.I.I., University of Basque Country Alda. Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain

[5] Stuckens C., P.A. Monfils, N. Janssens, Th. Van Craenenbroeck, D. Van Dommelen-Laborelec Balteau CPTE, K.U.Leuven, K.U.Leuven. **Risk of ferroresonance in isolated neutral networks and remedies.** Belgium, *www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/ pub_908.p*

Автори: инж. Станимир Вичев, доц. дтн. инж., "Електроенергетика", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *svichev@tu-sofia.bg*; инж. Пламен Миланов Ризов, доц. д-р, катедра „Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Д. К. Сотиров

ОСВЕТЯВАНЕ НА КОНФЛИКТНИ ЗОНИ В УЛИЧНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ

Станимир Стефанов, Николай Бърдарски, Ива Драганова, Ради Пипев

Резюме: *В доклада са разгледани някои от особеностите на конфликтните зони в уличното осветление. Представени са резултати от научни изследвания, мнения и препоръки на изследователи, на национални и международни браншови и научни организации, имащи отношение към уличното и външното осветление. Разгледани са въпроси, свързани с определянето на заслепяването и подобряването на зрителните възприятия в тези зони, и въпроси относно повишаването на безопасността с чисто технически мерки по отношение разположението на стълбовете от уличното осветление.*

Ключови думи: *конфликтна зона, осветление, улица, пешеходци, МПС*

ILLUMINATION OF CONFLICT AREAS IN STREET LIGHTING

Stanimir Stefanov, Nikolay Bardarski, Iva Draganova, Radi Pipev

Abstract: *The research investigates some of the characteristics of conflict areas in street lighting. Apart from the results of the research presented, there are also opinions and recommendations of researchers, national, and international industrial organizations involved in street and outdoor lighting. Problems concerning the determination of disability glare and ways of improving the visual perception in these areas are discussed, as well as questions about increasing the safety by using technical measures for the location of the poles of street lights*

Keywords: *conflict area, lighting, street, pedestrians, vehicles*

1. Въведение

Едни от основните приоритети, с които трябва да е съобразено уличното осветление, освен с техническите аспекти и икономическите, е осигуряване на условия за добри зрителни възприятия в така наречените конфликтни зони и създаване на условия, позволяващи да се постигнат високи нива на сигурност и лична безопасност, както за участниците в пътното движение, така и за хората придвижващи се в тъмните часове на деня в открити зони и обществени съоръжения – паркинги, подлези, надлези, площади, тротоари, алеи и т.н.

Като конфликтни зони могат да се разглеждат местата, в които съществува вероятност за настъпване на пътно-транспортни произшествия (*ПТП*) поради недобра видимост нощем, поради пресичане на пътните потоци между пътни превозни средства (*ППС*) и между *ППС* и пешеходци. Такива зони са кръстовища,

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

сложни пътни съоръжения, включвания, зоните в които става промяна в броя на лентите за движение, завои, регламентираните пешеходни преходи, отбивки, велоалеи и др. [1].

Уличното осветление, освен осигуряване на осветяването на улици и конфликтни зони, се използва и за осветяване и съседни на тях зони – тротоари, алеи, дворове, открити площи и др., като по този начин се създава допълнителна сигурност за пешеходци, велосипедисти и деца. С осветеността на тези зони, водачите на пътни превозни средства могат по-рано да забележат наличие на хора в тях и съответно да имат възможността да избегнат фатален сблъсък.

2. Изложение

Най-висок принос за завършващите с тежки последствия за пешеходците, а не рядко и за самите водачи на пътните превозни средства, имат сблъсъците между *ППС* и пешеходци. Пешеходните конфликтни зони се определят от местата, където е най-вероятно да настъпи сблъсъка между *ППС* и пешеходци нощем. Големината на пешеходния поток определя както степента на риска за възникване на конфликт, така и широчината и гъстотата на преходните пешеходни зони, а от там и количествените и качествените показатели, които трябва да осигуряват осветителните уредби в конфликтните зони. Количествено пешеходния поток в стандартите за улично и външно осветление е класифициран в три групи – „нисък“, „среден“ и „висок“ пешеходен поток. В райони, където имаме малки потоци или рядко и единично придвижващи се пешеходци нощем, се класифицират като райони с нисък пешеходен поток. Такива например са крайградски населени места с улици с фамилни къщи, райони с много ниска плътност на жилищни сгради, както и селските и полу-селски райони, с плътност на пешеходците под 11 човека на час, преминаващи от двете страни на улиците или пресичащи ги не в местата предвидени за пресичане в една зона с големина от 200 метра [8]. Райони, в които броят на пешеходците е сравнително малък през нощта, но често се наблюдават преминаващи и пребиваващи нощем пешеходци, се класифицират като зони със среден пешеходен поток 11-100 човека на час. Такива са улици с търговски зони, офиси, някой градски алеи, промишлени зони, жилищни зони и др. Райони, за които се очаква значителен брой пешеходци да използват тротоарите и пешеходните пътеки нощем в тях, се класифицират като зони с висок пешеходен поток. Такива са зоните с централни търговски площи, близо до театри, концертни зали, стадиони, терминали и други с пешеходен поток над 100 човека на час. Подобна квалификация, съществува и за плътността на движение на пътните превозни средства и тя едновременно с квалификациите за пешеходния поток, скоростите на движение на *ППС* и необходимите минимални зрителни нива формират основните показатели, нормиращи уличните осветителни уредби. Необходимото ниво на осветеност или яркост на уличните платна и конфликтните зони е от първостепенно значение за безопасността нощем. Те се постигат с правилното позициониране на осветителите и разпределението на светлината по уличните платна, като подходящите височина и отстояние позволяват постигане на последователност и равномер-

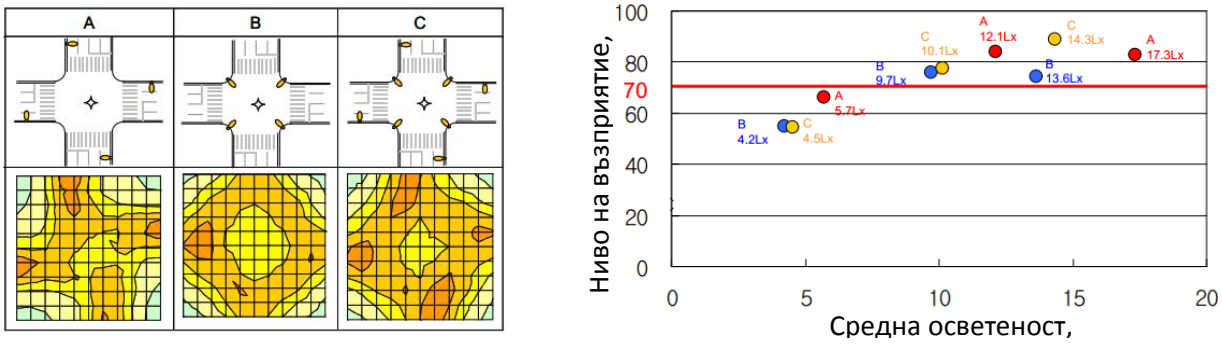
ност в осветяването, а от там и подобряване на предвидимостта на ситуациите в уличното движение в нощните часове.

Един от основните въпроси е, какви трябва да бъдат светлините нива на кръстовищата, доколко тези светлини нива имат отношение към повишаването или понижаването на риска от настъпването на пътни инциденти и до колко начина на разположението на осветителите около кръстовищата завишава или понижава този риск. В Япония са направени изследвания на база статистическите данни от японското Министерство на земята, инфраструктурата, транспорта и туризма за 18 кръстовища на пътни артерии с цел, установяване на влиянието на нивата на осветеност върху промените в количеството пътни инциденти преди и след инсталация на осветителните им уредби – табл. 1 [4]. От приложените данни се вижда, че в кръстовищата, където средната осветеност е ≥ 20 lx (нива, кореспондиращи с препоръчителните в *CIE 115:2010* нива за средна осветеност на конфликтни зони в кръстовища със светлинни класове *C2, C1* и *C0*), количеството инциденти намалява. Изненадващото в тези данни е, че е отчетено повишаването на пътните инциденти за осветености под 20 lx (светлини класове *C3*, *C4*) като не е ясно, дали това се дължи на неправилно определяне на светлините класове при нормирането на осветлението или на други фактори, нямащи отношение към нивата на осветеност, тъй като авторите на [4] не прилагат данни за ситуациите при които са възникнали пътно-транспортните произшествия (*ПТП*).

Табл.1. Ниво на инцидентите в зависимост от осветеността на кръстовища

Средна осветеност	Инциденти, приведени към 100 милиона преминали автомобили			Анализирани кръстовища
	Преди инсталация на УОУ	След инсталация на УОУ	Разлика	
под 20 lx	12,071	15,797	3,726	5
20 ÷ 30 lx	15,602	9,485	-6,117	7
над 30 lx	20,180	5,098	-15,082	6

Друг тест (проведен също в Япония) относно условията на видимост на пешеходци от водачи на *МПС* в кръстовища, при три конфигурации на разположение на осветителите и за нива на средна осветеност от между 5 lx и 20 lx, показал [5], че при осветеност ≥ 10 lx в 70% от случаите отговорите са били, че условията са достатъчно добри и за трите вида конфигурации на разположение. Този факт за 70% разпознаваемост, независимо, че е в противоречие с повишаването на инцидентността в горното изследване, е позволил в националният стандарт на Япония да се въведе ниво от 10 lx за осветеност на кръстовища с ниски автомобилен трафик и пешеходен поток, в слабо или добре осветена околна среда при равномерност на осветеността 0,4.



Фиг.1. Конфигурация на разпределение на осветителите, разпределение на светлините нива в кръстовищата и нива на възприятие на пешеходци

Втори немаловажен въпрос по отношение на правилното нормиране на осветлението в конфликтни зони е как да се определи степента на заслепяване в тях, тъй като те се характеризират със значително скъсяване на зрителната дистанция за водачите спрямо обектите в кръстовището, като посоката на зрението не е фиксирана в определена зона.

Съгласно *CIE 115:1995*, много често, използването на *TI* при определяне на заслепяването в уличните осветителни уредби в конфликтните зони е непрактично поради значителните трудности свързани с нестандартните разпределения на осветителите и обектите, които се получават в тези зони, като и заради промяната в посоката на зрение на водачите и яркостните адаптационни нива. В тези обстоятелства основно се препоръчваше интензитета на осветителите да бъде ограничена до 30 cd/klm на 80^{o} и на 10 cd/klm на 90^{o} спрямо азимута, под който се виждат от водачите осветителите (*G-класове*), но от гледна точка на адаптивното зрение този подход не е особено приложим.

Съгласно по-новата редакция – *CIE 115:2010* и [10] е препоръчително да се изчислява показателя на заслепяването *TI* и само в определени случаи, когато това е невъзможно, да се използват *G-класовете* ограничения за интензитета на осветителите.

Определянето на заслепяването изисква познаване на воалиращата яркост и яркостта на адаптация за всяка отделна позиция на наблюдателя, както и посоката на погледа му. Процедура за преместващ се наблюдател е разгледана в *CIE 140:2000*, без ограничения по отношение на позицията на наблюдателя и посоката на погледа му в конфликтната зона. Формулата за изчисляване на воалиращата яркост е валидна за всяка позиция на наблюдателя и всяка посока на погледа (*CIE 31:1796*). Яркостта на адаптация (при сравнително висока равномерност на яркостта на уличното платно) може да се приеме за равна на средната яркост на уличното платно. Самата средна яркост на уличното платно (както е известно) се изчислява на база яркостите на всички изчислителни точки от изчислителното поле. При нормиране на уличните осветителни уредби, адаптационната яркост се приема равна на средната яркост за светлинните класове *M* (*ME*). Между тези класове и класовете *C* (*CE*), за които уличното осветление се нормира по осветеност съществува съответствие, определено в таблици от *CIE 115:2010* (и *EN 13201*), като на база светлините класове *C* се определят и

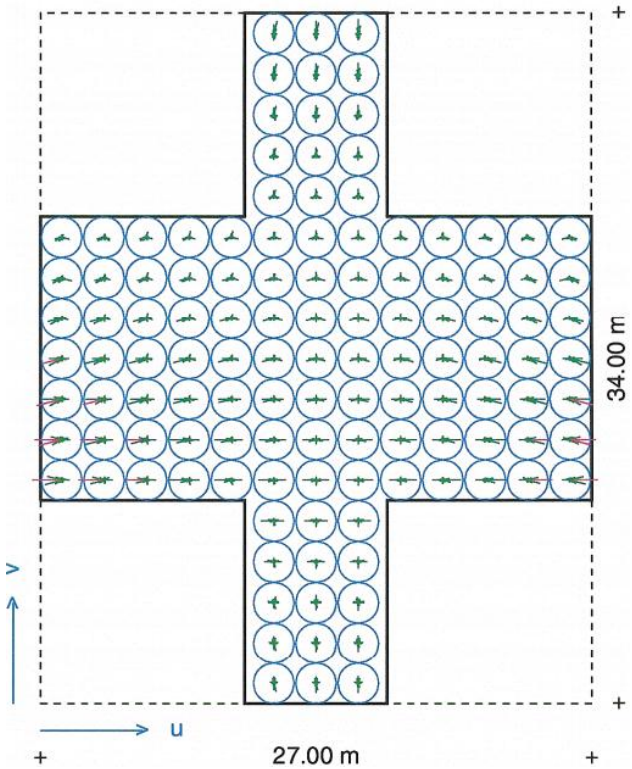
нормите за осветяване на конфликтните зони при улиците с моторизиран трафик - табл.2.
За конфликтните зони средната яркост на адаптация L би могла да се определи от средната осветеност E при познат среден якостен фактор q_0 на отразяващата повърхност, като

$$L = q_0 \,.\, E \text{ , cd/m}^2; \tag{1}$$

а при дифузно отразяващи повърхности това може да стане на база средната осветеност E и интегралния коефициент на дифузно отражение ρ:

$$L = \rho . E / \pi \text{ , cd/m}^2. \tag{2}$$

Използвайки стойностите на адаптивната яркост, можем да изчислим и показателя на заслепяването TI за всяка позиция на наблюдател в конфликтна зона и за всяка посока на неговия поглед с достатъчно висока степен на адекватност. Като се приема, че TI не трябва да надхвърля стойностите от табл.2.



Фиг.2. Разположение на водачите на *ППС* в кръстовище и възможни основни посоки на погледа им за които би следвало да се изчислява заслепяването [10]

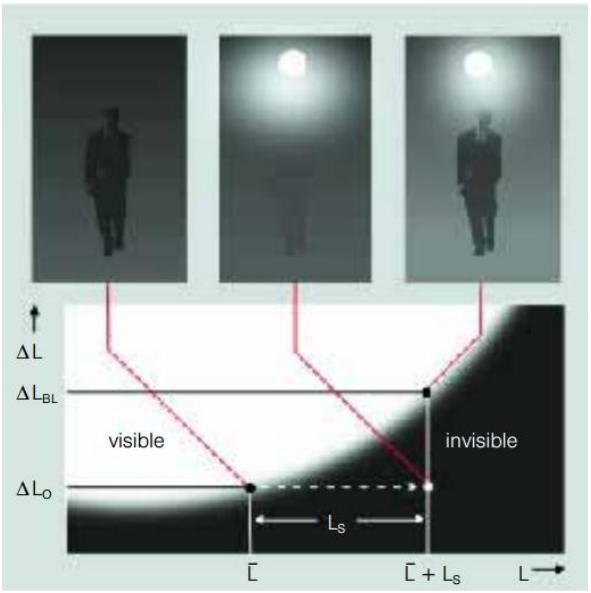
Съгласно [1], светлините нива в кръстовището следва да бъдат с една степен повисоки от нивата на основната артерия, а заслепяването да се изчислява за позиции на наблюдателя съответстващи на основната изчислителна мрежа от уличното платно. Дължината на зоните, осветявани като конфликтни, ако няма други

изисквания към тях, се определя от време 5 секунди, за което със съответната скорост те се преминават надлъжно от водачите на *МПС*.

Табл.2. Светлинни класове за конфликтни зони

Светлинен клас	Средна осветеност върху цялата използвана повърхност – E, lx	Равномерност на осветеността – $U_0(E)$	Показател на заслепяването *TI*, %	
			Висока и умерена скорост	Ниска и много ниска скорост
C0	50	0,40	10	15
C1	30	0,40	10	15
C2	20	0,40	10	15
C3	15	0,40	15	20
C4	10	0,40	15	20
C5	7,5	0,40	15	25

Друг подход, който може да се приложи за преодоляване на заслепяването от светлини източници и отразяващи обекти по отношение видимостта на пешеходци е за съответните зони с повишено заслепяващо действие да се вземат мерки, с които допълнително да се увеличи контрастът на пешеходците, като например за целта могат да се използват допълнителни осветители, включващи се само при наличие на придвижващи се в съответната зона хора или пък допълнителни отражателни съоръжение. За да бъде видим един обект при някаква яркост на адаптация, е необходимо да съществува минимален контраст над праговия - ΔL_o. Когато присъства заслепяване, воалиращата яркост кара окото да се адаптира към по-високо яркостно ниво и се променя яркостният контраст. За да бъде видим в новата ситуация обекта, е необходимо да се осигури ново, по-високо ниво на яркостта на фона, и съответно ново, по-високо ниво на яркостния контраст - ΔL_{BL}.



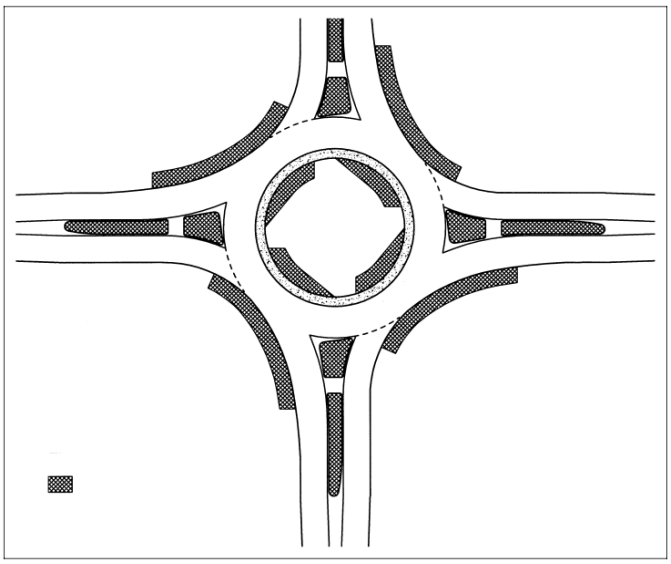
Фиг.3. Яркостен контраст [2]

В общодостъпната литература се твърди, че наличието на фиксирани осветителни улични системи редуцира риска от катастрофи с 30%.

От *Lighting Research Centre of Rensselaer Polytechnic Institute* с подкрепата на *National Cooperative Highway Research Program*, част от Националната академия на науките в САЩ е направено и публикувано изследване [11] за това, доколко фиксираното улично осветление редуцира риска от инциденти и тяхната тежест, като са ползвали статистически данни от щатите Минесота и Калифорния. Оказва се, че фиксираните осветителни уредби са асоциирани с повишаване на

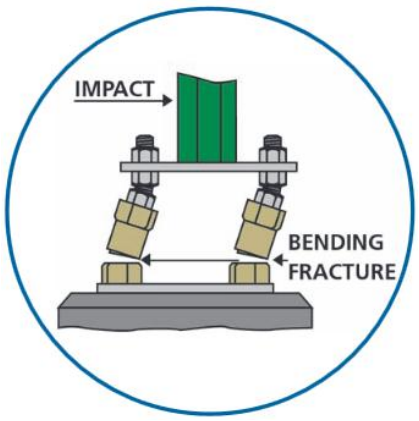
риска от катастрофи на кръстовища и пресечки през деня на нива, като тези от през тъмната част на деня. Установено било, че нивото на катастрофите през тъмната част на деня е станало малко по-ниско, като техния брой през нощта показал, че риска се е редуцирал с 12% ÷ 14%. Тези стойности от своя страна значително отстъпват на общо-приетото ниво от 30% на редуциране на риска и споменавано в литературните източници.

От друга страна, увеличението на риска през деня, поради наличие на улична осветителна уредба, показва, че осветителните уредби не трябва да се разглеждат сами по себе си и само в контекста на осветлението. В тази връзка, в някои ръководства за проектиране на осветлението в конфликтни зони [3] [6] се разглеждат и въпроси свързани с така наречените потенциални конфликтни зони, свързани с разположението на осветителните стълбове и начина на монтирането им. Такива зони за кръгово движение са показани на фиг.4.



Фиг.4. Потенциални конфликтни зони в кръгово движение [6]

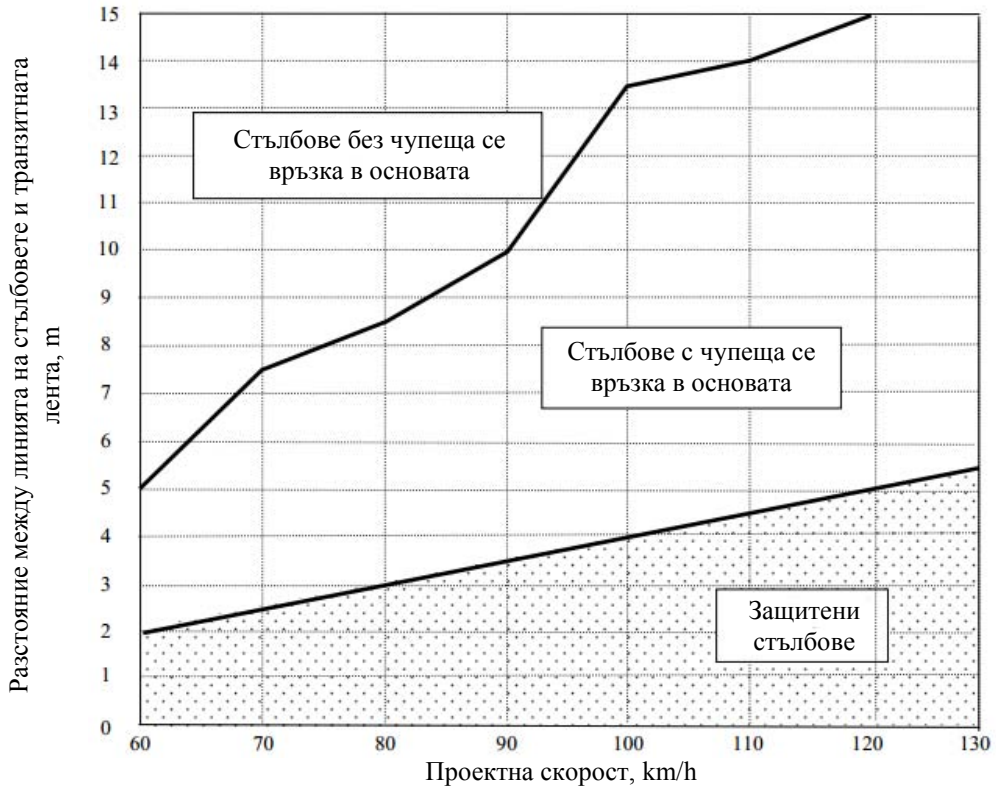
В зависимост от проектната скорост на улиците в тези ръководства са регламентирани отстоянията на стълбовете от уличното платно. Съгласно [3] стандартното разстояние от края на транзитната лента до стълбовете на осветителите в градски условия при високи скорости трябва да е 5 метра, като при скорости над 120 km/h се препоръчва използване на чупеща се свръзка за основата на стълба към постамента. Тази връзка е позволено да се използва само в случаи, където има достатъчно пространство стълбът да падне, без да причини щети.



Фиг.5. Чупеща се свръзка

При наличие на подходяща бариера – деформираща се „W образна“ мантинела, бетонна преграда или др., стълба може да се постави непосредствено зад деформационната зона на бариерата, но това не бива да насърчава поставянето на такива бариери там, където това не е наложи-

телно, тъй като те са допълнително съоръжение, което би участвало в сблъсък с превозно средство. Ускоряващите или забавящите ленти, или водещите към, както и идващите от рампи ленти трябва да бъдат разглеждани като транзитни ленти до точката на входните и изходните за тях терминали.
Минималното разстояние за незащитени високи стълбове следва да е 15 метра от края на транзитната лента. В случаите когато стълбовете са на ниво над нивото на улицата, тази дистанция може да бъде съкратена и тези стълбове да се разглеждат като защитени.
Стандартното отстояние на стълбовете в градовете се препоръчва [3] да е 3 метра от бордюра до средната линия на стълбовете, като това предоставя възможност за поставяне на тротоар или озеленяване на пространството между пътя и стълбовете. Разстоянието може да бъде намалено до 0,5 метра при скорости под 60km/h когато пътните ленти са ограничен от страни с висок бордюр или канавки.



Фиг.6. Отстояние на стълбовете в зависимост от проектната скорост на шосето

Табл.3. Деформация на мантинели

Тип бариера	Вид на системата	Изкривяване, m
3 кабелна	Гъвкава	3,0
W-образна мантинела със слаби пилони	Гъвкава	2,5
W-образна мантинела със силни пилони	Полутвърда	1,5
Квадратна мантинела	Полутвърда	1,5
Бетонна бариера	Твърда	0

Някои автори разглеждат като потенциални конфликтни и зоните с съществуващ риск от катастрофи и пътни инциденти, формиращи се от широк радиус около зоните с непосредствени конфликтни зони [11].

Един въпрос, който в последно време се разглежда от много организации и изследователи е влиянието на спектралният състав и типа на светлините източници източниците използвани в осветителите върху повишаването на безопасността на хората и на движението по пътищата вследствие подобряване на зрителните възприятия. На следната фигура [9] е показано едно сравнение между светодиоден източник и газоразряден светлинен източник високо налягане с висок индекс на цвета.

Фиг.7. Сравнение между *LED* и *HID*

Както се вижда от приложените снимки, а и от изследвания, свързани със спектралния състав и повишаване на сигурността, направени по поръчка от *Association of Chief Police Officers* (*ACPO*) във Великобритания [7], при една и съща геометрична конфигурация на осветителните уредби, светодиодният източник обуславя по-добри зрителни възприятия.

3. Заключение

Във връзка с части от изложената материя, дефиницията за конфликтни зони би могла да се разшири и да се формира и дефиниция за потенциални конфликтни зони. Като такива биха могли да бъдат фиксирани местата, където съществува завишен риск от сблъсък между *ППС* с различни съоръжения (стълбове от уличното осветление, дървета, архитектурни елементи и др.), нерегламентираните места, в които съществува постоянно придвижване на пешеходци през и по платната за движение на *ППС*, преходните зони към кръстовища, включвания, отклонения, „джобове“ и пр.

При проектирането на уличното осветление трябва да се отчитат отрицателните въздействия и те да бъдат максимално ограничени. Не бива да се забравя, че при „Светлинното“ престъпление е важно отрицателното въздействие, което трябва да бъде избягнато. То може да бъде сведено до минимум чрез удовлетворяване на минималните нива на осветление и осигуряване на адекватна с конкретните условия осветеност на потенциални и непосредствени конфликтни зони чрез избор на подходящи светлини източници, осветителни тела и системи за управление. Също така е очевидно, че е необходимо да се отчитат наличието на заслепяване от осветителите, отблясъци и въздействието върху и от съседни зони, и

да се прилагат технически мерки за подобряване на видимостта в условия на заслепяване.

Благодарности

Авторите изказват благодарност на проекта ДУНК 01/3 за подкрепата при проведените проучвания.

Литература

[1] ***CIE 115:2010***

[2] ***Good Lighting for Safety on Roads, Paths and Squares 3***, Fördergemeinschaft-Gutes Licht (FGL), Berlin, German

[3] ***Highway Lighting Guide, Alberta Transportation***, USA, August, 2003

[4] Ohya H, Ando K., Kanoshima H., ***A study of Road Lighting Measures that Reduce Nighttime Traffic Accidents***, Proceedings of 2000 Annual Conference of the Illuminating Engineering Institute of Japan, 2000, pp.119

[5] Oka K, Ikehara K., Minoshima O., Kawai T., Inukai N., ***Study on Requirements of Intersection Lighting***, Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, 2006

[6] Kansas Roundabout Guide, USA, Octobre, 2003

[7] ***Lighting against crime, A guide for crime***, Reduction rofessionals, ACPO Secured by Design, UK, January, 2011

[8] ***Street Lighting Best Practices,*** HiLine engineering LTD for American Municipal Power- Ohio, USA, 08, 2005

[9] ***Sustainable lighting LED Area Lighter*****,** GE Lighting, May, 2009

[10] Stockmar A, ***„Adaptive Road Lighting“ according to CIE Publication 115:200X „Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic“***, E-street workshop + forum, Almada (13-15/05/2008)]
http://www.e-streetlight.com/Documents/Lisbon/6%20Adaptive%20road%20lighting%202008-05.pdf, 28.07.2013, 10h25min

[11] *http://www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/pdf/2007/StreetLightingSafety8511.pdf*, 28.07.2013, 11h05min

Автори: Станимир Благоев Стефанов, гл. ас., д-р, инж., Технически Университет - София, филиал Пловдив, E-mail address: *glasst@abv.bg;* Николай Цветков Бърдарски, маг. инж., „ЕЛКО” ООД, Плевен, E-mail address: *elkopl@abv.bg,* маг. инж. Ива Димитрова Драганова, докторант, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivadraganova@tu-sofia.bg;* маг. инж. Ради Димов Пипев, докторант , катедра „Електрификация на минното производство“, МГУ „Св. Иван Рилски“, E-mail address: *radi.pipev@mail.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** проф. д-р инж. А. Пачаманов

КАК СЕ ОПРЕДЕЛЯ ЕКСПЛОАТАЦИОННИЯ ФАКТОР MF ПРИ ПРОЕКТИРАНЕТО НА УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ СЪС СВЕТОДИОДНИ ОСВЕТИТЕЛИ

Станимир Стефанов, Христо Василев, Ива Драганова, Пламен Цанков

Резюме: *В доклада са разгледани методики (процедури) за определяне на експлоатационния фактор MF на светодиодни осветители в уличните осветителни уредби с отчитане на особеностите на светодиода като светлинен източник. Представени са факторите и тест-процедурите, определящи стойността на MF и влияещи върху определянето на изменението на светлинния поток на осветителите в зависимост от поведението на светодиодните модули като светлинни източници. Разгледано е и влиянието на начина, по който се определя срока на живот на светодиодите върху стойностите на MF.*
Ключови думи: *експлоатационен фактор, светодиод, светодиоден осветител, термичен мениджмънт*

HOW TO DEFINE THE MAINTENANCE FACTOR MF IN THE DESIGN OF STREET LIGHTING SYSTEMS OF LED LUMINAIRES

Stanimir Stefanov, Hristo Vasilev, Iva Draganova, Plamen Tsankov

Abstract: *The report discusses the methods (procedures) for determination of the MF – factor of maintenance of LED luminaries in street lighting systems, taking into account the characteristics of the LEDs as a light source. Factors and test-procedures that determine the value of MF and affecting to the determination on degradation of the luminous flux of the LEDs according to impact on the functions of the LEDs as light sources are presented. The impact of the way of determination of the life of the LEDs on the values of MF has also been examined.*
Keywords: *maintenance factor, LED, LED luminary, thermal management*

1. Въведение

В зависимост от правилността на определяне на стойността на експлоатационният фактор една улична осветителна уредба може да бъде повече или по-малко ефективна по отношение на разходите свързани с нея по поддръжката, разходите за електроенергия и реализираните светлините нива в периода на експлоатация. Експлоатационният фактор *MF* в уредбите за външно осветление съгласно класическия метод зависи основно от три компоненти

$$MF = LLMF.\ LSF.\ LMF \tag{1}$$

където:

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

MF - експлоатационният фактор за който следва да бъде изчислена осветителната уредба;

LLMF – фактор, отчитащ изменението на светлинния поток на светлинните източници във времето за дадена осветителна уредба;

LSF – фактор, отчитащ намаляването на светлинния поток на осветителната уредба по отношение на броя на функциониращите светлини източници (1 или 0,98 при LED-осветители);

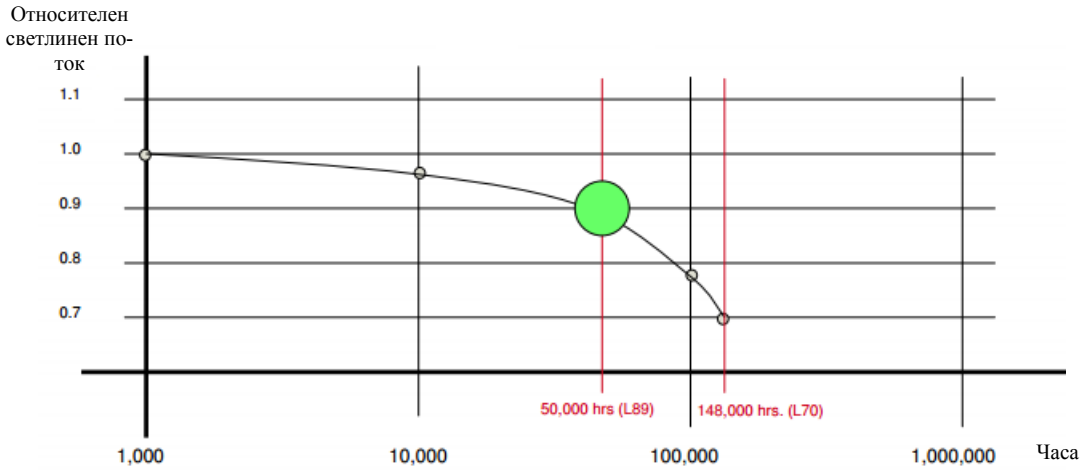
LMF – фактор, отчитащ намаляването на светлинния поток на осветителите в следствие замърсяването на оптичната система.

Появата на светодиодните източници допринесе основно до промяна в начина по който се определя експлоатационният им фактор поради многократно по-дългия живот на светодиодните източници, чиято предполагаема продължителност е десетки години и се определя на база апроксимации, екстраполационни и вероятностни показатели.

2. Изложение

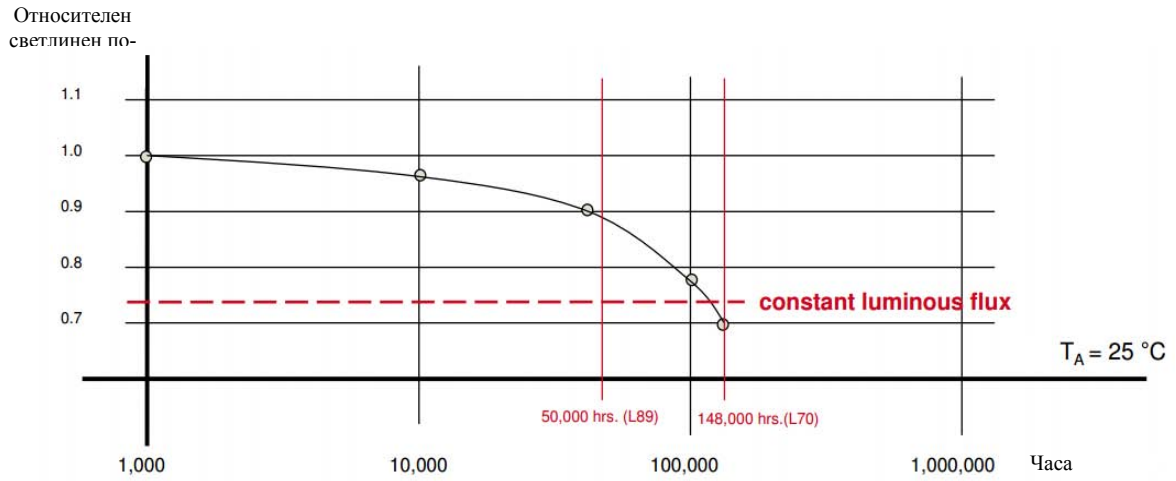
До появата на светодиодните осветители, производителите на осветители имаха отношение само към коефициента *LMF*, но с появата и навлизането на тези осветители в осветителните уредби, производителите са съпричастни и към трите посочени фактора във формула (1) - *LLMF, LSF* и *LMF*.

С фактора *LLMF(LedLMF)* при светодиодните осветители се отчита намаляването (деградацията) на светлинния поток по време на тяхната експлоатация за даден период и той обикновено следва да се отчита в съответствие с „$L_{(x)}$“-характеристиките на светодиодите – фиг.1 [2].



Фиг.1. Изменение на относителния светлинен поток на светодиод с деклариран живот 148 000 h и с понижение на светлинния поток с 70% спрямо първоначалния – L_{70} за $T_A = 25^oC$

Ако посредством регулиране на захранването на светодиодите чрез драйверите може да се компенсира намаляването на светлинния им поток и той се поддържа постоянен за целия експлоатационен срок (*Constant luminous flux*), ще имаме *LLMF* = 1 – фиг.2.



Фиг.2. *LLMF* = 1 [2]

Стойността на фактора *LLMF* зависи от декларирания живот който се отчита за съответното намаляване (деградация) на светлинния поток – L_{90}, L_{80}, L_{70}, L_{50} и всеки производител сам избира какъв светодиод, с каква деградация на светлинния поток и при какъв експлоатационен срок да използва в своите осветители. Стандартите и терминологията по отношение на светодиодните характеристики все още еволюират и не са завършени, поради което декларирания живот и деградацията на светлинния поток се дефинира различно, но като цяло система „$L_{(x)}$“ е най-общо приета [4]. Източниците, на база на които към момента е прието да се определя стойността на фактора *LedLMF* са тест-данните за изделията на производителите от независими лаборатории - данните от тест-процедурите *IES LM-79-08*, *LM-80-08*, и *TM-21-11* [5].

За определяне на деградацията на светлинния поток и живота на светодиодите в САЩ се предлага екстраполация в съответствие с *IES TM-21-11* на базата на тестови данни, получени съгласно *IES LM-80-08* тест-процедурите за ограничено тестово време на група светодиодни модули при съответни температура на околната среда и качество на електрозахранването. Деградацията на светлинния поток се определя въз основа на експоненциална функция, получена по метода на „най-малките квадрати“ от тест-данните за минимум 6000 часа, като предпочитанието е за 10000 часови тестов период [5]:

$$\Phi(t) = B.\exp(-\alpha t) \qquad (2)$$

където:

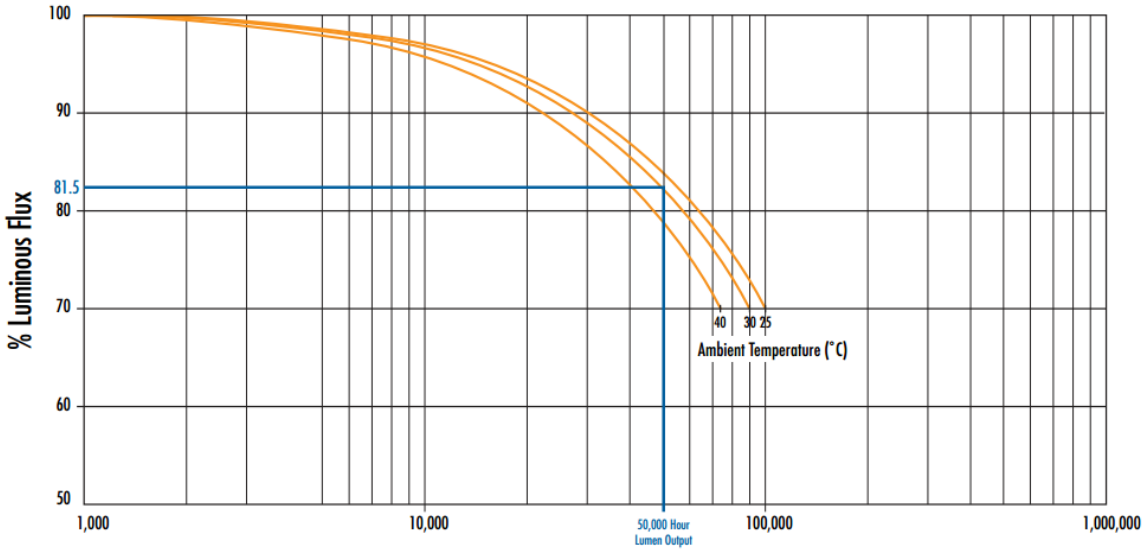
- t - времето на функциониране в часове;
- $\Phi(t)$ – средната нормализирана стойност за времето t;
- B – първоначалната константа, получена при апроксимацията по метода на „най-малките квадрати“;
- α – константата на затихване, получена при апроксимацията по метода на „най-малките квадрати“.

Животът на светодиодите съгласно *IES TM-21-11* се определя с израза:

$$L_p = \ln\left(100.\frac{B}{p}\right)/\alpha \qquad (3)$$

където L_p е експлоатационният живот на светодиодите по отношение на светлинния им поток в часове, а p процента от началният им светлинен поток, като е прието, че проектният им експлоатационен живот не може да надхвърля повече от 4 до 6 пъти тестовия период в зависимост от броя на изследваните светодиодни модули. Прието е означението на светодиода да е $L_p(DK)$, където с D е означен тестовия период в хиляди часа – например L_{70}(6K).

Един основен въпрос, свързан с фактора *LLMF* е, че обикновено производителите дават данни за изменението на светлинния поток на светодиодните модули във времето за температура на околната среда $T_A = 25^oC$. Някой от производителите дават данни за температурна корекция на *LLMF* в зависимост от температурата на околната среда в графичен (фиг.3) [7] или табличен (фиг. 4 [6]) вид, но понякога липсват пояснения за това, как следва да се извърши коригирането. Възниква въпроса как се определя *LLMF* фактора при температура на околната среда, различна от температурата $T_A = 25^oC$?



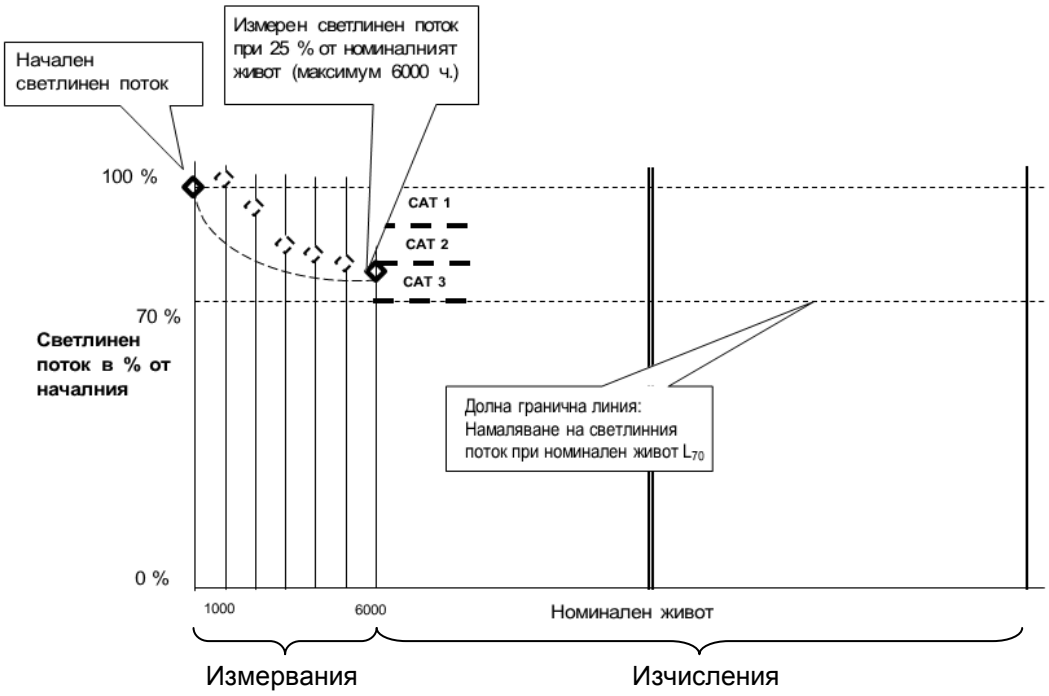
Фиг.3. Зависимост на светлинния поток на светодиодните модули от температурата на околната среда T_A [7]

Обикновено повечето светодиодни модули дават „прираст“ в светлинния поток от 0,25% за всеки градус на околната среда под $T_A = 25^oC$, или „загуба“ с 0,25% за всеки градус над $T_A = 25^oC$. Така например, за температура $T_A = 30^oC$ се получава с 1,25% по-нисък първоначален светлинен поток, отколкото при $T_A = 25^oC$, измерен по тест-процедура съгласно *IES LM-80-08* [7][6]. От тук първоначалната стойност на фактора *LLMF* ще е $LLMF_{0Kh} = 1\text{-}0{,}0125 = 0{,}9875 \approx 0{,}99$. Съгласно данните от фиг.3, получени в съответствие с тест-процедурите *IES LM-80-08* и *TM-21-11*, при $T_A = 30^oC$ и непроменен ток на светодиода, фактора $LLMF_{50Kh} = 0{,}815$. Но тъй като първоначалният $LLMF_{0Kh} = 0{,}9875$, то следва $LLMF_{50Kh}$ да бъде коригиран и това става със следната процедура - $LLMF_{50Kh} = 0{,}815.0{,}9875 = 0{,}80$.

PRODUCTS INCLUDE: XSP1™ and XSP2™ Luminaires[1]					
Zone*	Input Power Designator[2]	Initial LMF	25K hr LMF (Projected[3])	50K hr LMF (Calculated[4])	100K hr LMF (Calculated[4])
5°C (41°F)	A (100%)	1.05	0.99	0.94	0.83
	F (55%)	1.05	1.01	0.96	0.87
10°C (50°F)	A (100%)	1.04	0.98	0.92	0.81
	F (55%)	1.04	0.99	0.95	0.86
15°C (59°F)	A (100%)	1.03	0.97	0.91	0.79
	F (55%)	1.03	0.98	0.93	0.84
20°C (68°F)	A (100%)	1.01	0.95	0.89	0.77
	F (55%)	1.01	0.97	0.92	0.83
25°C (77°F)	A (100%)	1.00	0.94	0.88	0.75
	F (55%)	1.00	0.95	0.91	0.81

Фиг.4. Табличен вид на корекцията за *LLMF* в зависимост от температурата на околната среда T_A в съответствие с тест-процедурите *IES LM-80-08* и *IES TM-21-11* [6]. ($LLMF_{CIE} = LMF_{CREE} \neq LMF_{CIE}$).

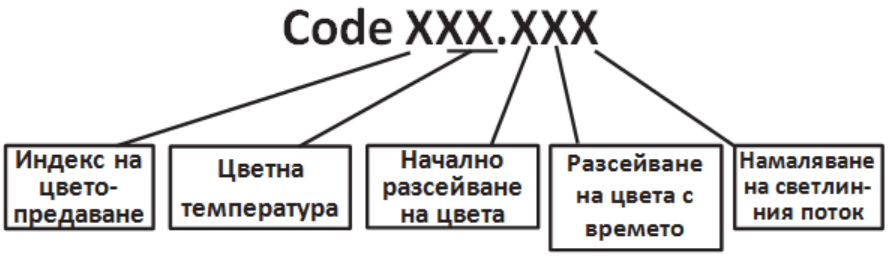
В *IEC/PAS 62717* [1] се разглежда друг общ метод за определяне на живота и показателите на светодиодите. Вместо изчисляване на живота, *IEC/PAS* предлага кодове за определяне на светлинния поток, като даден код не означава прогнозиране на постижим живот. Светлинният поток се измерва при 25% от номиналния живот до максимум от 6 000 часа (фиг.5) и се изразява като процент от първоначалната стойност. Поддържаната в края на периода процентна стойност определя кода за поддръжка на светлинния поток: >90% - „9“, >80% - „8“, >70% - „7“.



Фиг.5

Въвежда се шестцифрен фотометричен код, който показва важни параметри - индекс на цветопредаване *Ra*, цветна температура *Тцв*, цветови координати и светлинен поток. Първата група от 3 цифри е аналогична на известното прието

цветово кодиране при луминесцентните лампи, докато втората група от 3 цифри съдържа обозначения за специфични експлоатационните показатели за оценка на стабилността на цвета и светлинния поток на светодиода – фиг.6.



Фиг.6. Шестцифрен фотометричен код за *LED*

Пример за шестцифрен фотометричен код на светодиод:

- начална стойност на индекса на цветопредаване *R*a = 84 – *code* 8;
- начална стойност на цветната температура *Tцв* = 3000K – *code* 30;
- начално разсейване на цветовите координати в елипса 3-степен от системата на МакАдам – *code* 3;
- експлоатационно разсейване на цветовите координати в елипса 5-степен от системата на МакАдам – *code* 5;
- експлоатационно намаляване на светлинния поток = 91% – *code* 9;

се обозначава с *Code* = 830/359.

Животът на светодиода *Lx*, представляващ времето в часове, за което група *LED*-модули осигурява повече от заявения процент (X) от първоначалния светлинен поток, трябва да се публикува в комбинация с частта повредени светодиоди *Fy* от групата за този период. Препоръчителната серия от стойности за (x) е 70, 80, 90.

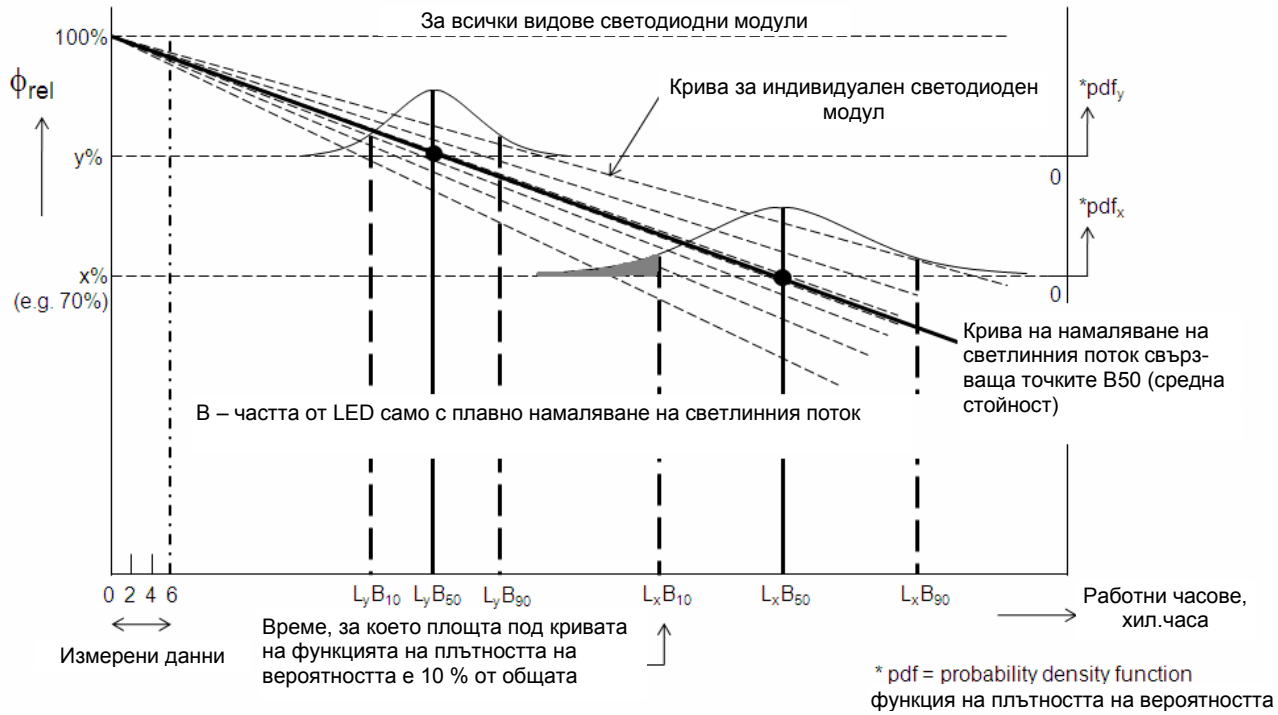
Частта повредени светодиоди *Fy* е отговаряща за номиналния живот на *LED*-модулите в осветителното тяло. Процентът (Y) е частта от определен брой светодиодни модули от един тип, които при номиналния си живот са се повредили. Този показател изразява комбинираният ефект от всички компоненти на модула включително и механични, които имат отношение към светлинния поток. Препоръчителната серия от стойности за (Y) е 10, 50.

IEC/PAS 62717 Ed. 1 [1] препоръчва за светодиодните модули разделяне на показателя за плавно експлоатационно намаляване на светлинния поток *By* от този за рязко намаляване *Cy* и повреди по стандартизиран причини, с което дава подобра представа за поведението на светодиодите при експлоатация.

By изразява като процент *Y* броя на светодиодните модули от даден тип, чийто светлинен поток е спаднал под дадено ниво при постепенната деградация на светлинния поток. Случаите на рязко намаляване на светлинния поток или изгаряне не участват в *By*. Нивото на светлинния поток *Lx* и частта *By* се избират от производителя. Препоръчителните стойности на *By* са дадени в табл.1.

На фиг.7 е представен графично начинът за намиране на *By* чрез вероятностно статистическа обработка на данни от измервания. Формата на функцията на плътността на вероятността (*pdf - probability density function*) и формата на проекционните криви на намаляване на светлинния поток на фиг.7 са само с цел

илюстрация. Функцията на плътността на вероятностите може да бъде Вейбул, логаритмична, експоненциална или нормално разпределение, в зависимост от измерените данни и използвания проекционен метод.



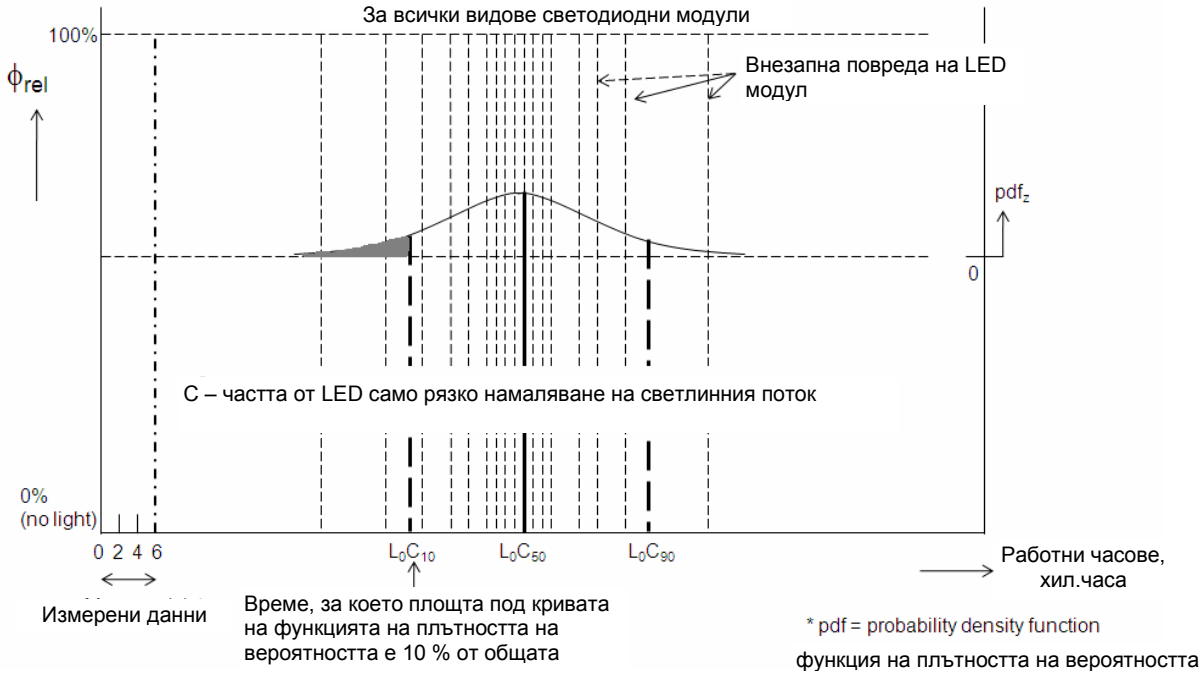
Фиг.7. Специфициране на живота на *LED* при плавно намаляване на светлинния поток

Частта *F(t)* или кумулативната функция на разпределение (*CDF(t)* - *Cumulative Distribution Function*) е процентното разпределение като функция от времето. То се изразява математически като $F(t) = CDF(t) = \int pdf(t)dt$. По дефиниция $F(t =$ безкрайност) е 1 (100%), т.е. общата площ под кривата *pdf* от време нула до безкрайност е единица, което означава, че са отпаднали цялата група светодиоди. За намиране на частта *By* на фиг.7 е показан следния пример: разглежда се ниво на светлинния поток от 70%, за което 10% от изследваните светодиоди са отпаднали за време $L_{70}\ B_{10}$ - посочен от сивата зона на фигурата. Математически изразена както следва:

$$F(L_{70}B_{10}) = CDF(L_{70}B_{10}) = \int_0^{(L_{70}B_{10})} pdf_{70}(t)dt = 0{,}1 \rightarrow 10\% \,, \qquad (4)$$

като функцията на надеждността е $R(t) = 1 - F(t)$.

Cy изразява като процент *Y* броя на светодиодните модули от даден тип, чийто светлинен поток е спаднал рязко или са се повредили. Стойността на частта *Cy* се избират от производителя. Препоръчителните стойности на *C*y са дадени в табл.1. Пример: $L_0\ C_{10}$ представлява времето, за което светлинния поток става 0% за 10% от изследваните светодиоди – фиг.8.



Фиг.8. Специфициране на живота на LED при рязко намаляване на светлинния поток

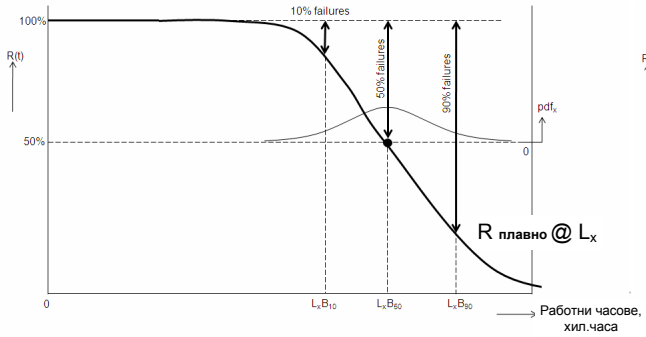
Табл.1. Препоръчителните комбинации от стойности на *Lx*, *By*, *Cy* и *Fy*

	Lx By						*Lx Cy*		*Lx Fy*					
x	70		80		90		0		70		80		90	
y	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50

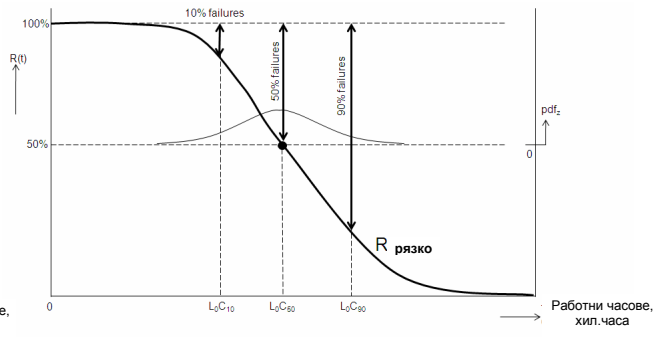
Комбинирано плавно и рязко намаляване на светлинния поток се обозначава с *Fy*. Например: L_{70} F_{50} показва времето, за което светлинния поток е ≤ 70% при 50% от изследваните *LED*, едновременно поради плавно и рязко намаляване на светлинния поток. Общото плавно *B* и рязко *C* намаляване на светлинния поток може да бъде конструирано от характеристиките на фиг.7 и фиг.8 чрез криви на надеждност в три етапа:

- етап 1: крива на надеждност $R(t)$ за плавно намаляване на светлинния поток – фиг.9;
- етап 2: крива на надеждност $R(t)$ за рязко намаляване на светлинния поток – фиг.10;
- етап 3: крива на надеждност $R(t)$ за комбинирано плавно и рязко намаляване на светлинния поток – фиг.11.

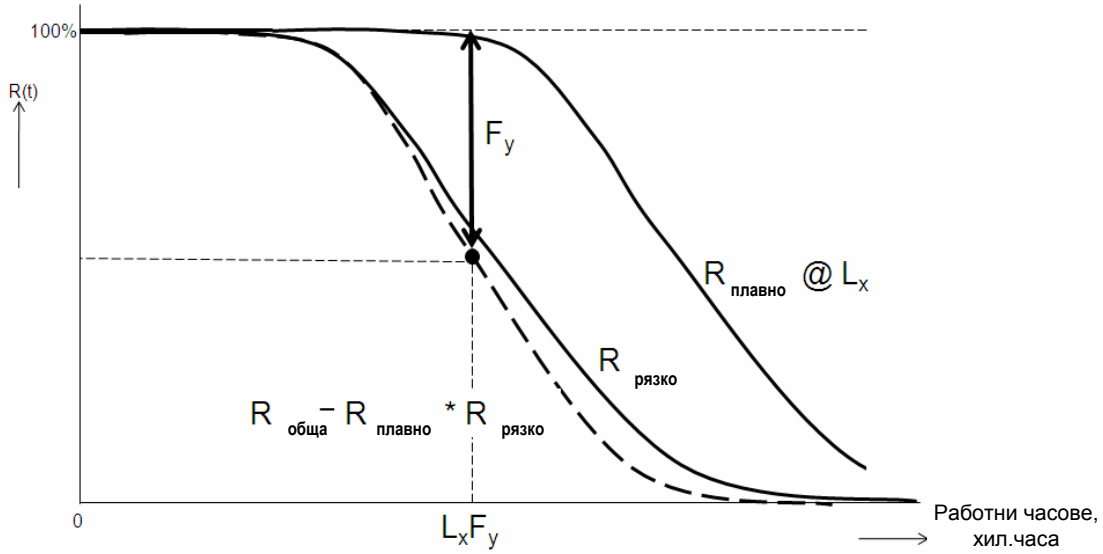
В табл.2 са показани сравнителни изследвания на експлоатационния фактор по представената методика на „TRILUX-Akademie“ [3] при улични осветителни уредби със светодиодни осветители с живот 80 000 часа и осветители с натриеви лампи с високо налягане (НЛВН) с живот 16 000 часа показва следните резултати – табл.2.



Фиг.9



Фиг.10



Фиг.11. Крива на надеждност $R(t)$ за комбинирано плавно и рязко намаляване на светлинния поток

Табл.2.

Lx / By	L_{70} B$_{50}$	L_{70} B_{10}	L_{80} B_{50}	L_{80} B_{10}	НЛВН
LedLMF	0,65	0,71	0,75	0,82	0,82
LMF осветител	0,85 IP66, умерено замърсяване, 4-годишен цикъл на почистване				
MF = LedLMF. LMF	0,55	0,60	0,64	0,70	0,70
Коефициент на запаса	1,82	1,67	1,56	1,43	(1,43)
Увеличение на коеф. на запаса	127 %	117 %	109 %	100 %	(100 %)

3. Заключение

При проектирането на осветителните уредби не бива да се забравя, че фактора *LLMF(LedLMF)*, който отчита намаляването на светлинния поток на светодиодите, зависи от методиката по която се определя и всеки производител сам избира и предоставя съответни данни за това, каква би следвала да е неговата стойност. Освен с методиката за определяне на експлоатационния фактор на светодиодните модули, производителите и проектантите трябва да се съобразя-

ват и с качествени фактори, описани в кодовете на светодиодите съгласно *IES LM-79-08*, *IEC/PAS 62717 Ed. 1* или [4], като не бива да се пропускат и електрическите характеристики на осветителя, общата консумирана мощност, фактора на мощността в началото и при 25% от номиналния живот на светодиодите (максимум до 6000 часа) [4].

Благодарности

Авторите изказват благодарност на проекта ДУНК 01/3 за подкрепата при проведените проучвания.

Литература

[1] ***IEC/PAS 62717 Ed. 1: Led modules for general lighting, performance requirements***

[2] ***Maintenance Factor for Siteco LED Outdoor Luminaries***, Street and urban luminaries, Siteco, Februari, 2011

[3] Minnerup J., ***Wartungsfaktor-Betrachtung LED***, „Quelle: TRILUX-Akademie“

[4] ***Position Statement, LED/SSL Light Sources and LED/SSL Luminaires Lifetime and Lumen Maintenance***, Illuminating Engineering Society of Australia and New Zealand, July, 2012

[5] Richman E., ***Understanding LED tests: IES LM-79, LM-80, and TM-21***, DOE SSL Workshop, USA, July, 2011

[6] ***Series D/E - Recommended Cree Outdoor Luminaire Lumen Maintenance Factors (LMF)***, CREE, Rev.N, Expires: 03/2013

[7] *http://www.betaled.com/RuudBetaLed/media/RuudBetaLedMediaLibrary/PDF%20Files/TD-14_BetaLED-ESA_LMF.pdf*, 2.07.2013, 14h 55min

[8] *http://www.osram.com*

[9] *http://www.philips.com*

[10] *http://www.ssl.energy.gov*

Автори: Станимир Благоев Стефанов, гл. ас. д-р инж., Технически Университет - София, филиал Пловдив, E-mail address: *glasst@abv.bg*; маг. инж. Ива Димитрова Драганова, докторант, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivadraganova@tu-sofia.bg*; Христо Николов Василев, проф. д-р, инж., катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *hristo.vasilev@denima2001.com;* Пламен Ценков Цанков, гл. ас. д-р инж., Технически Университет - Габрово, E-mail address: *plamen@tugab.bg*

Постъпила на 25.11.2013г **Рецензент** доц. д-р инж. Р. Кючуков

ОПТИМАЛНА СПЕКТРАЛНА КРИВА НА ИЗЛЪЧВАНЕ НА СВЕТОДИОДИ И НИСКИ РАЗХОДИТЕ ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ

Станимир Стефанов, Ива Петринска, Ива Драганова, Христо Василев

Резюме: *Представена е идея за потенциално повишаване на енергийната ефективност в уличното осветление чрез използване на източник на светлина, при който екстремална ефективност се постига за сметка на цветовите показатели. Областта на приложение – уличното осветление и достижимия светлинен добив са основание за такъв компромис. Извършено е чисто теоретично оптимизиране на спектралната крива на излъчване на хипотетичен източник, при което се постига максимален светлинен добив, при Ra по-голямо или равно на 20. Такъв източник или негово приближение може да бъде създаден на база светодиод, с подходящ луминофор.*

Ключови думи: *Светодиоди, спектрален състав.*

OPTIMAL SPECTRAL CURVE OF EMISSION OF LEDs AND LOW COST FOR LIGHTING

Stanimir Stefanov, Iva Petrinska, Iva Draganova, Hristo Vasilev

Abstract: *For lighting on outdoor publics areas and streets, that have low requirements concerning the color rendering index, with a purpose decreasing the electrical consumption and the expense of electricity, it could be to create light sources based on LEDs whit high light yield. As is known, the maximum light output is dependent on the shape of the spectral curve and the color rendering index Ra - i.e. when increasing the Ra, the maximum possible light output decreases and vice versa. In view of said far, light sources designed to be of high light output would radiate light predominantly in one or two parts of the spectrum, low color index and correlated color temperature in the range of 5000 K - 6000 K. On the basis of these conditions, by a mathematical optimization, are created the spectral curves, for which it is sought maximum possible luminous yield, under conditions, that all the power consumed by the LEDs, is transmitted as a luminous flux in the visible part of the spectrum. Also examined is the possibility to create a low-cost lighting based on these LEDs.*

Keywords: *LED spectra*

1. Въведение

Светодиодите, използвани в осветителните уредби за вътрешно и външно осветление, са най-често светодиоди с бяла светлина, с широк непрекъснат спектрален състава от почти всички дължини на вълните и с висок индекс на цветопредаване – Ra > 70 ÷ 80.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Високият индекс на цветопредаване е търсена характеристика на светлинните източници, а в много приложения, стандартите налагат ограничения отдолу за цветовите характеристики на използваните лампи. В уличното осветление обаче, има места, където могат успешно да се прилагат източници с влошени цветови характеристики – това са предимно малки, ненатоварени с движение улици. В това отношение е натрупан дори опит, тъй като в края на 20 век са построени много улични осветителни уредби с натриеви лампи ниско налягане, които имат нисък индекс на цветопредаване. Единствената причина за използване на източници с ниско Ra е високата ефективност, която те могат да предложат. Както е известно, максималният светлинен добив и индекса на цветопредаването Ra зависят от разпределението на спектралната плътност на излъчването, като с повишаване на Ra, максимално възможният светлинен добив намалява и обратно. Поради тази причина, светлинните източници, имащи за цел да бъдат с висок светлинен добив, биха притежавали преобладаващо излъчване в една или две части от спектъра и нисък цветови индекс. На базата на тези условия, в първата част на настоящия доклад, са представени, създадени чрез математическо оптимизиране теоретични криви на спектрално излъчване, за които е търсен максималния възможен светлинен добиви, при условие, че цялата мощност, консумирана от светодиода, се излъчва като лъчист поток във видимата част на спектъра. В съвременните бели светодиоди се използва източник на синя светлина (в диапазона 420-460 nm), която се преобразува в бяла светлина посредством луминофор. В целия процес на генериране на светлина са налице много компоненти на енергийните загуби, повечето от които имат квантов характер и са свързани с механизма на генериране на фотони, тяхното поглъщане в обема на полупроводниковия кристал, процесите в луминофора, където става преобразуване на излъчването към по-ниска дължина на вълната. Общата оценка за всички тези загуби, взети заедно, е светлинният добив (lm/W), който представлява отношение на светлинния (подчертаваме светлинния, а не лъчистия) поток на източника към консумираната от него електрическа мощност. Наскоро фирмата Cree пусна прес-съобщение, че с помощта на технологията SiC³ са получили светодиод със светлинен добив от 276 lm/W[4]. Тази стойност е по-висока от някои теоретични оценки за максималния възможен светлинен добив при светодиодите, давани в близкото минало. Тук е изследвана теоретичната възможност за получаване на още по-висок светлинен добив, който може да се получи при тесен спектър на излъчване на светодиодите. Изследването е изцяло теоретично, като са синтезирани криви на спектралната интензивност на хипотетичен източник и е оценен максималният възможен светлинен добив, който може да се получи от хипотетичния източник. При това е поставено ограничението индексът на цветопредаване във всички случаи да остава $Ra \geq 20$. Това е напълно достатъчно за приложения като улично осветление. Представените оптимални криви на спектрална интензивност могат да бъдат получени на практика чрез използване на подходящи луминофори. Необходимо е да се обърне внимание на евентуалната полза от една такава разработка.

2. Основни теоретични дефиниции

За количествено представяне на спектралното разпределение на лъчистия поток на светлинен източник се използва спектралната интензивност на лъчистия поток:

$$\psi_\lambda = \frac{dP_\lambda}{d\lambda}, \quad \frac{W}{nm}, \tag{1}$$

където dP_λ е лъчистият поток на източника (във W), излъчван при дължина на вълната $d\lambda$, nm. Лъчистият поток на източника се получава след интегриране на спектралната интензивност по целия спектър на излъчване:

$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi_\lambda d\lambda \approx \sum_{i=1}^{n} \psi_{\lambda_i} \Delta\lambda_i, \quad \text{W} \tag{2}$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + n\Delta\lambda$$

Връзката между електрическата мощност P_e, консумирана от светлинния източник и лъчистият поток, който той излъчва, може да се даде с интегрален коефициент на полезно действие:

$$\eta_\Sigma = \frac{P}{P_e} \tag{3}$$

Светлинният поток на източника може да се определи, като се знае неговата спектрална интензивност ψ_λ и спектралната чувствителност на човешкото око V_λ:

$$\Phi = 683 \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} \psi_\lambda V_\lambda d\lambda, \quad lm \tag{4}$$

Светлинният добив на източника, който определя неговата ефективност, се дефинира с израза:

$$\kappa = \frac{\Phi}{P_e} = \frac{683 \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} \psi_\lambda V_\lambda d\lambda}{\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi_\lambda d\lambda}{\eta_\Sigma}}, \quad \frac{lm}{W} \tag{5}$$

Често е по - удобно да се работи с относителната спектрална интензивност на източника - φ_λ вместо с абсолютната такава ψ_λ. Относителната спектрална интензивност се получава от абсолютната, като се раздели на максималната й стойност:

$$\varphi_\lambda = \frac{\psi_\lambda}{\psi_{\max}}, \quad oe \tag{6}$$

Както лъчистият, така и светлинният потоци не могат да се определят от относителната спектрална интензивност на източника, но светлинният добив може, при условие, че е известен интегралния кпд η_Σ:

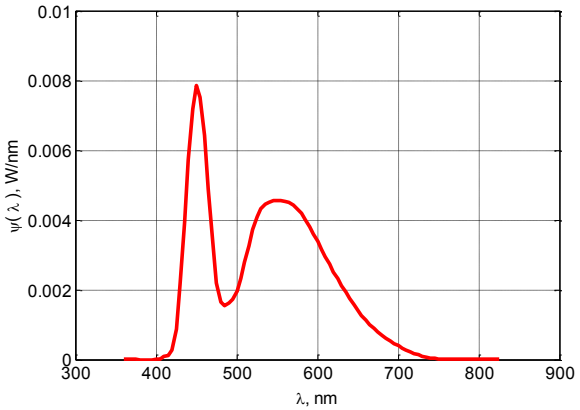
$$\kappa = \eta_\Sigma \frac{683 \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} \psi_\lambda V_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi_\lambda d\lambda} = \eta_\Sigma \frac{\psi_{\max} 683 \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} \varphi_\lambda V_\lambda d\lambda}{\psi_{\max} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_\lambda d\lambda} = \eta_\Sigma \frac{683 \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} \varphi_\lambda V_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_\lambda d\lambda}, \quad \frac{lm}{W} \tag{7}$$

От приведените по-горе дефиниционни изрази следва, че светлинния добив на даден източник може да се определи от негова относителна спектрална интензивност, като интегралите се апроксимират с крайни суми:

$$\kappa = \eta_{\Sigma} \frac{683 \int\limits_{\lambda=380}^{\lambda=760} \varphi_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda}{\int\limits_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{\lambda} d\lambda} \approx \eta_{\Sigma} \frac{683 \sum\limits_{i=1}^{n} \varphi_{\lambda_i} V_{\lambda_i} \Delta\lambda_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} \varphi_{\lambda_i} \Delta\lambda_i}, \quad \frac{lm}{W} \tag{8}$$

3. Ефективност на преобразуване на електрическата енергия до лъчение във видимата част на спектъра

На фиг.1. е дадена спектралната интензивност на светодиод тип MK-Rна Cree [5]. Данните са в именовани единици за 1 W електрическа мощност (ако към тези данни се приложи формула (4) се получава точно 276 lm светлинен поток).



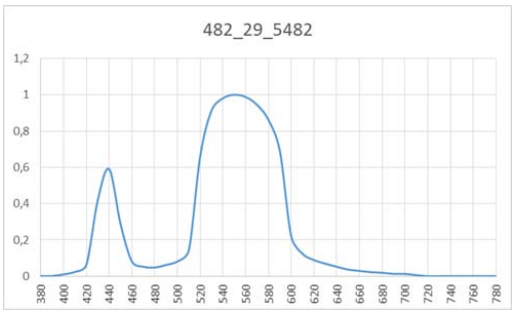
Фиг.1. Спектрална интензивност на излъчване на светодиод, тип MK-R, в именовани единици, за 1 W електрическа мощност.

Ако дадената спектрална интензивност се интегрира според (2), ще се получи лъчистия поток (или лъчистата мощност) във W. Тъй като данните са за 1 W електрическа мощност, то лъчистият поток ще е равен на интегралния коефициент на полезно действие, показващ ефективността на целия процес на преобразуване на електрическата енергия до лъчиста, включително загубите в луминофора. Интегралният коефициент на полезно действие е $\eta_{\Sigma} = 0.86$. Понеже това е моментния връх на ефективността в осветителната техника, тази стойност е използвана за оценка на ефективността на преобразуване на електрическата енергия до лъчиста и при разглеждания фиктивен светодиод, чиято спектрална плътност на излъчване се оптимизира.

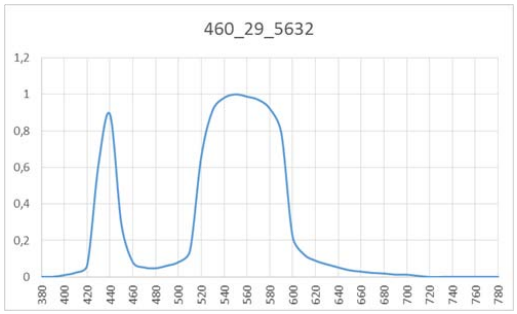
4. Оптимални спектрални криви на излъчване

Представените по долу оптимални теоретични криви на относителна спектрална плътност са част от серия криви, за която е заложено излъчване на светодиоди с непрекъснат спектър основно в зелено-жълтата област с дължини на вълните $520 \div 580$ nm с и без засилено излъчване в областта $420 \div 460$ nm. При създаването на кривите е прието, че електрическа мощност ще се преобразува в лъчение във видимата част от спектъра с кпд $\eta_{\Sigma} = 0.86$. Сериите криви на относителната спектрална плътност на излъчванията са формирани с разделяне на корелираните им цветни температури *CCT* в следните диапазони – 3000 K до 4500 K и от 4500 K до 6500 K, индекси на цветопредаването *Ra* са в диапазона $23 \div 43$ (оценени съгласно [3, 6]). Някой от получените резултати са представени на следващите фигури в относителни стойности на спектралната плътност за

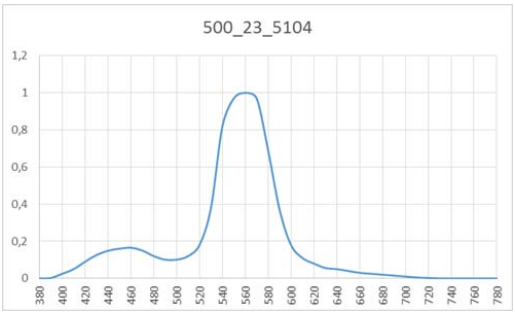
$\Delta\lambda = 10$ nm. При използване на представените тук криви на спектрална интензивност на излъчване се получава светлинен добив на хипотетичния светодиод над 400 lm/W. Тази стойност следва да се разглежда като теоретичен максимум, който може да се достигне при посочените по-горе условия. Естествено е да се очаква, че синтезираните тук криви на спектрална плътност на излъчване ще могат да бъдат само апроксимирани на практика, а не точно повторени.



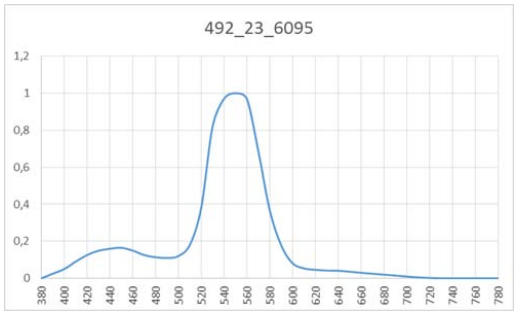
Фиг.1. Спектрален състав. x=0,334, y=0,450; светлинен добив 415 lm/W; *Ra*=29,*CCT*=5482 K



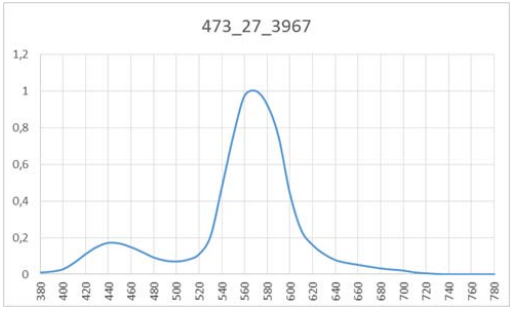
Фиг.2. Спектрален състав. x=0,328, y=0,480;светлинен добив 396 lm/W; *Ra*=29, *CCT*=5632 K.



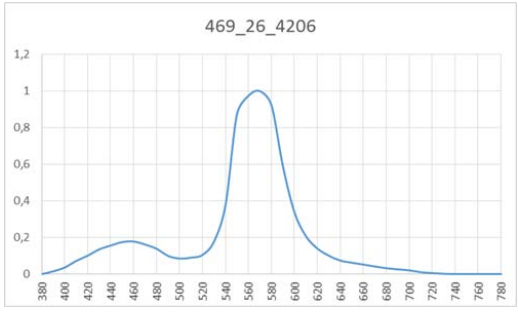
Фиг.3. Спектрален състав. x=0,353, y=0,505; светлинен добив 430 lm/W; *Ra*=23, *CCT*=6095 K.



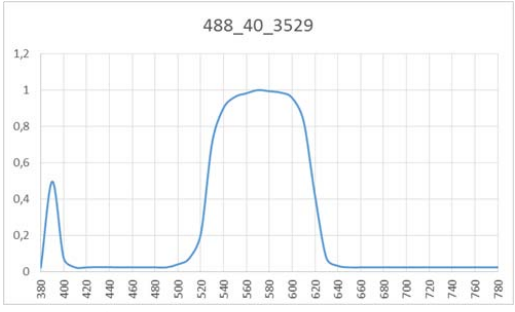
Фиг.4. Спектрален състав x=0,328, y=0,450; светлинен добив 423 lm/W; *Ra*=23, *CCT*=6095 K.



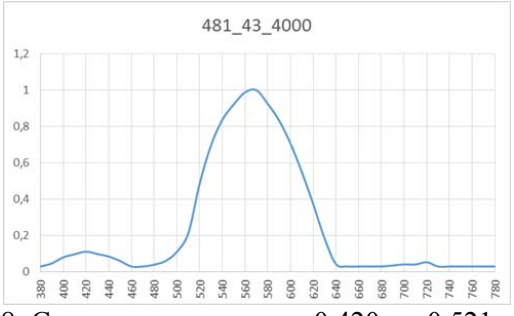
Фиг.5. Спектрален състав. x=0,406, y=0, 466;светлинен добив 411 lm/W; *Ra*=27, *CCT*=3967 K.



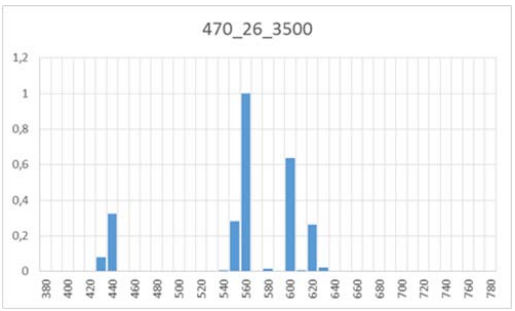
Фиг.6. Спектрален състав. x=0,393, y=0,464;светлинен добив 396 lm/W; *Ra*=26, *CCT*=4204 K.



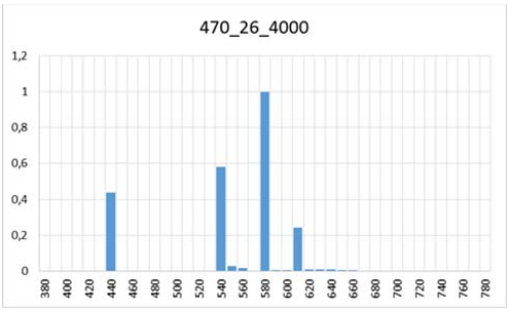
Фиг.7. Спектрален състав. x=0,452, y=0,522; светлинен добив 420 lm/W;*Ra*=40, *CCT*=3529 K.



Фиг.8. Спектрален състав. x=0,420, y=0,521; светлинен добив 414 lm/W; *Ra*=43, *CCT*=4000 K.



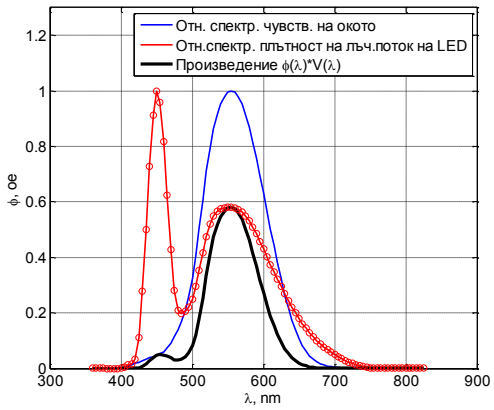
Фиг.9. Спектрален състав. x=0,424, y=0,441; светлинен добив 413 lm/W; *Ra*=26, *CCT*=3500 K.



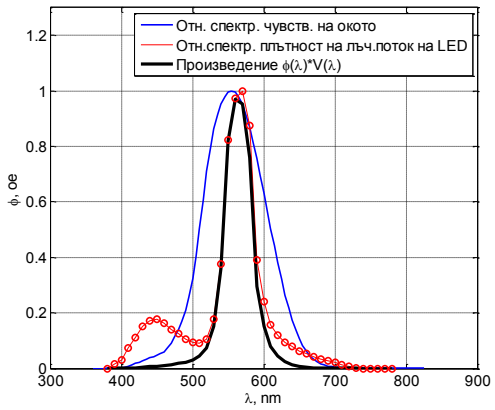
Фиг.10. Спектрален състав. x=0,420,y=0,521; светлинен добив 414 lm/W; *Ra*=43, *CCT*=4000 K.

Поради възникнали коментари, при предварителното представяне на доклада, тук ще бъде изложен подробно алгоритъма за изчисление на упоменатият светлинен добив, като данните и формулите ще бъдат представени в такъв вид, който да позволява проверочни изчисления. Нека разгледаме относителната спектрална интензивност на източник, представена на фиг.5. Кривата от фигурата е представена в табличен вид в табл.1 (втора и трета колони). В четвърта колона на таблицата е дадено произведението от знаменателя на (8), а в шеста колона е дадено произведението $\varphi_{\lambda_i} V_{\lambda_i} \Delta\lambda_i$ от числителя на (8). Пета колона представлява относителната спектрална чувствителност на човешкото око за фотопично виждане (CIE 1978). В последния ред на таблицата е извършено сумиране. Сумирането на данните от шеста колона, последвано от умножение по константата 683 дава светлинния поток на хипотетичния светодиод. Сумирането на данните от четвърта колона представлява лъчистият поток на източника (според (1)). За да се получи електрическата мощност на светодиода, лъчистият поток трябва да се раздели на сумарния коефициент на полезно действие $\eta_\Sigma = 0.86$. Светлинният добив на източника, представен в табл.1 ще е:

$$\kappa \approx \frac{683\sum_{i=1}^{n} \varphi_{\lambda_i} V_{\lambda_i} \Delta\lambda_i}{\frac{\sum_{i=1}^{n} \varphi_{\lambda_i} \Delta\lambda_i}{\eta_\Sigma}} = \frac{1.87\times10^6}{\frac{3913}{0.86}} \approx 411 \quad \frac{lm}{W} \tag{9}$$



Преход „лъчение-светлина“ при стандартен бял светодод



Преход „лъчение-светлина“ при фиктивния светодиод.

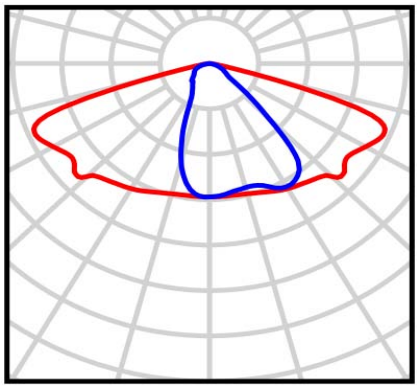
Фиг.11. „Претегляне“ на спектралната интензивност на излъчване с V_λ при стандартен бял светодиод и предлагания фиктивен светодиод.

Табл.1. Таблично представяне на относителната спектрална интензивност на източника от фиг.1 и определяне на величините в числителя и знаменателя на (8).

i	λ , nm	φ_λ , oe		$\varphi_{\lambda_i}\Delta\lambda$, nm		V_λ ,oe	$\varphi_{\lambda_i}V_{\lambda_i}\Delta\lambda$, nm
1	380	0		0		2.00E-04	0.00E+00
2	390	0.015		0.15		8.00E-04	1.20E-04
3	400	0.03		0.3		2.80E-03	8.40E-04
4	410	0.07375		0.7375		7.40E-03	5.46E-03
5	420	0.110625		1.10625		1.75E-02	1.94E-02
6	430	0.15		1.5		2.73E-02	4.10E-02
7	440	0.171875		1.71875		3.79E-02	6.51E-02
8	450	0.178229		1.782292		4.68E-02	8.34E-02
9	460	0.161458		1.614583		6.00E-02	9.69E-02
10	470	0.140625		1.40625		9.10E-02	1.28E-01
11	480	0.125		1.25		0.13902	1.74E-01
12	490	0.105		1.05		0.20802	2.18E-01
13	500	0.095		0.95		0.323	3.07E-01
14	510	0.09		0.9		0.503	4.53E-01
15	520	0.105		1.05		0.71	7.46E-01
16	530	0.177083		1.770833		0.862	1.53E+00
17	540	0.375		3.75		0.954	3.58E+00
18	550	0.822917		8.229167		0.99495	8.19E+00
19	560	0.973958		9.739583		0.995	9.69E+00
20	570	1		10		0.952	9.52E+00
21	580	0.873958		8.739583		0.87	7.60E+00
22	590	0.390417		3.904167		0.757	2.96E+00
23	600	0.239833		2.398333		0.631	1.51E+00
24	610	0.158042		1.580417		0.503	7.95E-01
25	620	0.120021		1.200208		0.381	4.57E-01
26	630	0.09375		0.9375		0.265	2.48E-01
27	640	0.078033		0.780333		0.175	1.37E-01
28	650	0.0625		0.625		0.107	6.69E-02
29	660	0.052083		0.520833		6.10E-02	3.18E-02
30	670	0.041667		0.416667		3.20E-02	1.33E-02
31	680	0.032417		0.324167		1.70E-02	5.51E-03
32	690	0.026042		0.260417		8.21E-03	2.14E-03
33	700	0.020833		0.208333		4.10E-03	8.54E-04
34	710	0.013625		0.13625		2.09E-03	2.85E-04
35	720	0.006		0.06		1.05E-03	6.30E-05
36	730	0.002		0.02		5.20E-04	1.04E-05
37	740	0		0		2.49E-04	0.00E+00
38	750	0		0		1.20E-04	0.00E+00
39	760	0		0		6.00E-05	0.00E+00
40	770	0		0		3.00E-05	0.00E+00
41	780	0		0		1.50E-05	0.00E+00
	$\sum_{i=1}^{41}\varphi_{\lambda_i}\lambda_i =$			71.12 nm		$683\sum_{i=1}^{41}\varphi_{\lambda_i}V_{\lambda_i}\lambda_i =$	33241 nm

5. Виртуален „нискоразходен“ осветител

При положение, че бъдат реализирани светодиоди с представените по-горе спектрални състави, биха могли да бъдат създадени LED - осветители с капсуловани оптични системи, обуславящи ниски разходи за електроенергия и поддръжка. Експлоатационният фактор MF на един такъв осветител може да се определи на основата на следните стойности:



Фиг.5

1. При използване на светодиоди с постоянен по стойност (за целият им експлоатационен срок) светлинен поток, фактора LLMFLED ще бъде равен на 1 (ConstantLightOut);
2. Фактора LSF =1, тъй като по закон, за 24 часа изгорелият източник трябва да се подмени;
3. При използване на капсулована оптична система със стъклен разсейвател и индивидуални лещи, напълнена с газ, имащ антиоокисно действие и притежаващ налягане, равно на това на околната среда, няма да имаме влошаване на оптичните характеристики от стареене вследствие на окисляване и на проникване на замърсители. Замърсяване на оптичната система в случая ще имаме само от външната страна на осветителите, като при средни нива на запрашване може да се приеме, че фактора LMF60Kh ще е със стойност 0,85 за експлоатационен срок от 15 години;
4. При използване на индивидуални лещи и изпъкнало защитно стъкло, в оптичната система ще имаме загуби на светлинен поток с по 4% в лещата и стъклото, като общата им стойност ще е 8%.

За определяне на необходимия светлинен поток на светодиодите (за описания до тук осветител) е изчислена яркостта на улична настилка клас R3 на платното с широчина 7m, при използване на светлоразпределението (фигура 5 [6]) на реален уличен LED осветител. Изчисленията са при: височина на окачване на осветителя 6m; междустълбие 30m със стълбове разположени на бордюра; дължината на рогатката 0,8m с наклон 3o; светлинен поток на лампата 1800 lm (1530 lm на осветителя) и MF = 0,85. Получената средна яркост е 0,32 cd/m2, с U0 =0,43; Ul =0,41; TI[%] =12; SR =0,38, като тези показатели удовлетворяват изцяло светлинния клас ME6[5]. Вижда се, че с използване на съществуващи оптични системи и с 1530 lm поток на осветителя могат да се удовлетворят изискванията в ниските светлини класове.

В съответствие с получените теоретични добиви от 410 lm/W- 430 lm/W (фиг.1 ÷ фиг.4), допускаме, че възможният реален светлинен добив на светодиодите би бил 400 lm/W. Отчитайки 2% загуби от термичния мениджмънт и 8% загуби в оптиката, светлия добив на светодиодите, приведен към осветителя ще бъде 361 lm/W, а мощността на всички светодиоди в осветителя ще е 4,2 W. Като прибавим към тази мощност и 0,8 W за електрическите загуби отделени в драйвера за управление на светодиодите, получаваме 5 W електрическа мощност на осветител.

Тази стойност подсказва, че с използването на светодиоди с висок светлинен добив, може да се създаде компактно осветително тяло, което ще осигурява достатъчно добро охлаждане на P-N прехода на светодиодите, така че температурата на прехода и на радиатора (тялото) като цяло да не надвишават с повече от градус – два 85oC през нощта. В съответствие, ще се реализира добър топлинен мениджмънт, от където пък ще имаме постоянен по стойност и достатъчен по количество светлинен поток. Освен това, по-ниските температури (от порядъка на 35 ÷ 45°C) в оптичната система, ще са предпоставка за удължаване живота на силиконовите и полимерните ѝ елементите, и за по-слабо замърсяване на разсейвателя от полепване на инсекти по него в сравнение с при по-мощните осветители.

6. Заключение

Малката електрическа мощност на един такъв осветител значително би намалила разходите за осветление в по-бедни райони и региони, както в България, така и по света. Освен енергийните разходи, с използването на един такъв осветител (поради характеристиките на оптичната му система) биха могли и значително да се съкратят разходите за неговата поддръжка. Наличните към момента технологии и материали позволяват създаването на конструкции, подобни на по-горе описаната по отношение на оптичната система. Основните проблеми в случая са създаването на светодиоди с висок светлинен добив и техният нисък цветови индекс – Ra < 30. Проблемът по отношение на ниските стойности на Ra е избора между недобро и добро цветопредаване. Но в ситуации на недостиг на средства, този проблем е лесно преодолим за уличното осветление. Същата е и ситуацията при липса на възможности за реализиране на външно осветление поради липса на енергиен източник – при осветители с мощност от 5 W лесно могат да бъдат реализирани евтини индивидуални фотоволтаични системи или такива, с механично задвижвани маломощни генератори (примери за последните напоследък са нерядко срещани).

Високата цветна температура (>5000 K), съчетана с ниския Ra и в съответствие със получените стойности на координатите на цветността x и y, предполага излъчване в зелената и зелено-жълтата част на спектъра. Това в енергийно отношение благоприятства преобразуването на спектралния състав на синята светлина на светодиоден чип посредством луминофор, поради близостта на дължините на вълните. Също така, при това цветово излъчване имаме и добри яркостни показатели в условия на мезопично зрение, като за фотопични яркостни нива от 0,3 cd/m2, се реализират мезопични яркости с 19 ÷ 24% по-високи от фотопичните [2]. Този факт от своя страна пък предоставя възможност за намаляване на необходимия светлинен поток и съответно на електрическата мощност с 15 - 20%.

Друга възможност за намаляване на необходимия светлинен поток е оптимизиране на светлоразпределението на осветителите за конкретен тип и геометрия улици, от където необходимия светлинен поток би могъл да се редуцира с 10 ÷ 15% в сравнение с този, на разгледания по-горе реален осветител, тъй като

една немалка част от неговия светлинен поток остава извън изчислителното поле.

Най-тежък и трудно решим е въпроса свързан със създаването на фото излъчващи вещества с полупроводникова проводимост или на луминофори, които да обезпечат в удовлетворяващ степен реализацията на получените теоретични криви на относителната спектрална плътност.

Признателност

Работата по настоящия доклад е част от договор ДУНК-01/3/2009 – „Създаване на университетски научно-изследователски комплекс (УНИК) за иновации, трансфер на знания в областта на микро/нано технологии и материали, енергийната ефективност и виртуалното инженерство“, финансиран от Фонд „Научни изследвания“.

Литература

[1] Василев Хр., Г. Ганчев, Нови хоризонти пред светодиоднотоулично осветление, XVI Национална конференция с международно участие BulLight 2010, 10 – 12 Юни 2010, Варна, Сборник доклади, НКО, 2010, стр. III-41 – III-49.

[2] CIE 191:2010.

[3] Recommendations for Specifying Color Properties of Light Sources for Retail Merchandising, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Volume 8, Issue 2, March, 2010, NY, USA.

[4] CreeSetsNew R&D PerformanceRecordwith 276 Lumen-Per-WattPower LED - Seemoreat: *http://www.cree.com/news-and-events/cree-news/press-releases/2013/february/276-lpw#sthash.Mu2GCADR.dpuf*

[5] CreeInc, Xlamp® MK-R LEDs, Product family data sheet.

[6] CIE, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE 013.3-1995, ISBN 978 3 900734 57 2.

[7] *http://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature#Approximation*, 10.05.2013, 15h 35 min.

Автори: Станимир Благоев Стефанов, гл. ас. д-р инж., Технически Университет - София, филиал Пловдив, E-mail address: *glasst@abv.bg*; Ива Чавдарова Петринска, гл. ас., д-р, инж., катедра Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ipetrinska@tu-sofia.bg*; маг. инж. Ива Димитрова Драганова, докторант, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivadraganova@tu-sofia.bg;* Христо Николов Василев, проф. д-р, инж., катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *hristo.vasilev@denima2001.com*

Постъпила на 02.09.2013г. **Рецензент** доц. д-р инж. Р. Кючуков

РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ВИХРОВИТЕ ТОКОВЕ В ПРОВОДЯЩИ ПЛОСКИ ОБЕКТИ ПРИ БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН КОНТРОЛ С НЕКЛАСИЧЕСКИ ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ

Стефчо Гунински, Валери Иванов

Резюме: *Изследвани са някои съществени особености в разпределението на вихровите токове, индуктирани в плоски контролирани обекти (КО) при един вид некласически вихровотокови преобразуватели (ВТП) – правоъгълни намотки с ос, успоредна на повърхността на изделието. Резултатите са сравнени със случая на класическите ВТП - правоъгълни намотки с ос, перпендикулярна на повърхността на обекта.*

Ключови думи: *вихрови токове, правоъгълни намотки*

EDDY CURRENT DISTRIBUTION IN PLANE CONDUCTIVE OBJECTS IN NONDESTRUCTIVE TESTING WITH A NEW ELECTROMAGNTIC TRANSDUCERS

Stefcho Guninski, Valeri Ivanov

Abstract: *Some significant features in the distribution of eddy currents induced onto the flat controlled objects in a kind of special eddy current transducers (ECT) - square coils having axis parallel to the surface of the sample. The results are compared with the case of the conventional ECT - rectangular coil with its axis perpendicular to the surface of the object.*

Keywords: *eddy currents, rectangular coils*

1. Въведение

При изследване на влиянието на движението при електромагнитен контрол с използване на некласически вихровотокови преобразуватели (ВТП) с възбудителна намотка, която е ос успоредна на повърхността на плосък контролиран обект (КО) [1,2] бяха установени ефекти, които насочват към предположението, че ефективната стойност на вихровите токове не намалява монотонно във всички посоки. Целта на настоящата работа е да се определи по метода на крайните елементи (МКЕ) разпределението на вихровите токове, възбуждани от тези некласически преобразователи, означени като **type A.** Резултатите са сравнени с картината на вихровите токове при ВТП с класическа възбудителна намотка – също правоъгълна, но с ос перпендикулярна на повърхността на КО [3], които са означени като **type B.**

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Разглежда се стационарен синусоидален режим при захранване от идеален източник на ток. Контролираният обект е проводящ, нефероманитен, линеен и хомогенен.

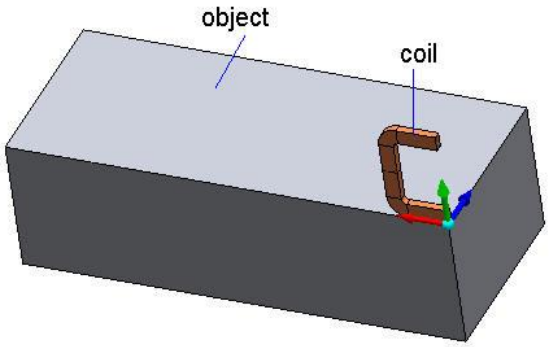
Електродинамичната задача се решава по метода с крайните елементи с помощта на софтуерния продукт MagNet 7.4 [4,5].

2. Изчислителен модел

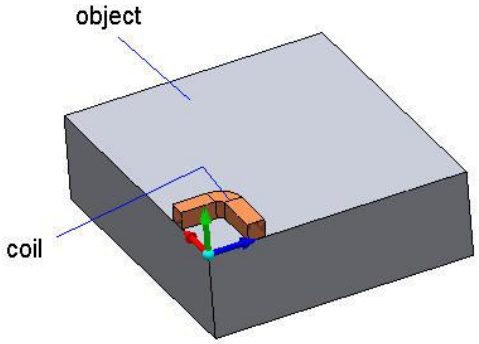
Разглеждат се два случая с еднакъв КО **(object)**. Обектът е с призматична форма и размери, много по-големи от тези на ВТП, така че да се ограничи влиянието на „краевия ефект“ (фиг.1 и фиг.2). Материалът е алуминий 61% IACS със специфичната електрическа проводимост $\gamma = 3{,}53.\ 10^7$ S/m.

Понеже цел на изследването са вихровите токове, а не изходният сигнал, и в двата случая се разглежда параметричен преобразувател с правоъгълна възбудителна намотка **(coil)** и с правоъгълно напречно сечение. ВТП е с еднаква форма и размери, но различно ориентиран спрямо повърхността на обекта – веднъж с ос успоредна на повърхността на КО - **type A** (некласически) [3] (фиг.1) и за сравнение класическия случай, когато оста е перпендикулярна на повърхността на изделието - **type B** [6] (фиг.2). Намотката е от меден проводник със специфичната електрическа проводимост $\gamma = 5{,}77.\ 10^7$ S/m, има 30 навивки и е тип “strand” [7], т. е. счита се, че токовата плътност по напречното сечение е еднаква. Счита се, че се захранва от идеален източник на синусоидален ток с ефективна стойност $I = 0{,}5$ A и честота $f = 5$ kHz.

Поради симетрията при подходящи гранични условия се работи само с една четвърт от геометричния модел.



Фиг.1. ВТП ***type A***

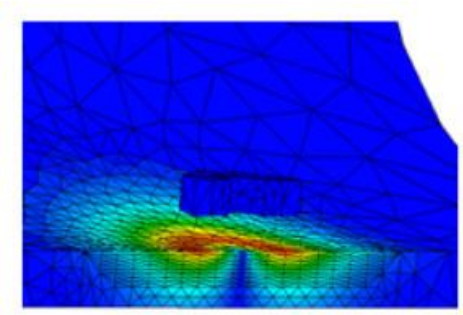


Фиг.2. ВТП ***type B***

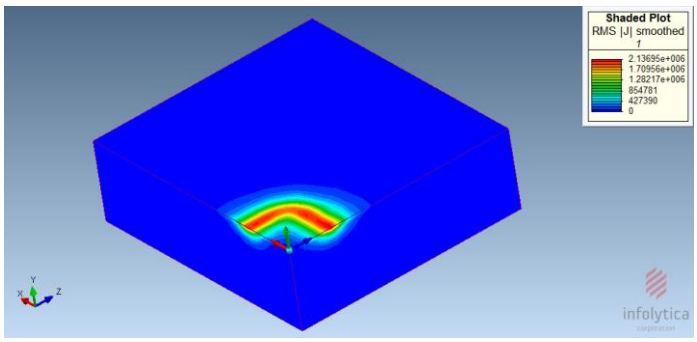
3. Изчислителни резултати

3.1. Преобразувател type B

Този тип възбудителна намотка (coil - фиг.2) е преобладаваща в практиката на безразрушителния контрол и затова в работата са наречени „класически“. Разпределението на вихровите токове в КО при тях е изследвано главно при намотки с кръгла форма (фиг. 3) [8] .

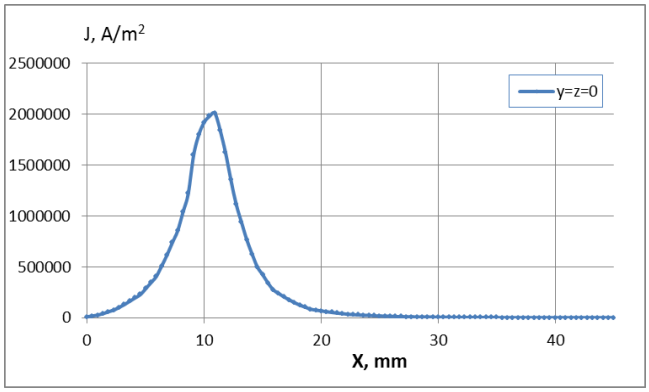


Фиг.3. Картина на вихровите токове при кръгъл ВТП ***type B***

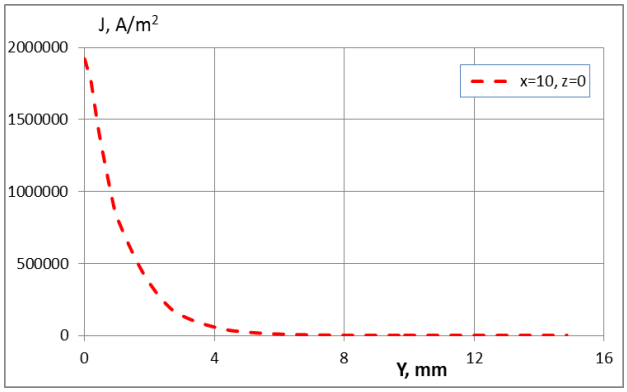


Фиг.4. Картина на вихровите токове при правоъгълен ВТП ***type B***

Получената от авторите аналогична картина за вихровите токове при подобно ориентирана възбудителна намотка, но с правоъгълна форма, е показана на фиг.4. На фиг.5 е показано разпределението на ефективната стойност на плътността на вихровите токове, възбуждани от ВТП **type B** по оста *Ox* (успоредна на повърхността на плоския КО, а на фиг.6 аналогичната зависимост по оста *Oy* (перпендикулярна на граничната повърхност).



Фиг.5. Зависимост на плътността на вихровите токове от координатата ***x*** - ВТП ***type B***



Фиг.6. Зависимост на плътността на вихровите токове от координатата ***y*** - ВТП ***type B***

Общото заключение за разпределението на вихровите токове при класическите преобразуватели с възбудителна намотка от **type B** и при кръгла, и при правоъгълна форма е:

А) траекториите на вихровите токове лежат в равнини, които са успоредни граничната повърхност на КО;

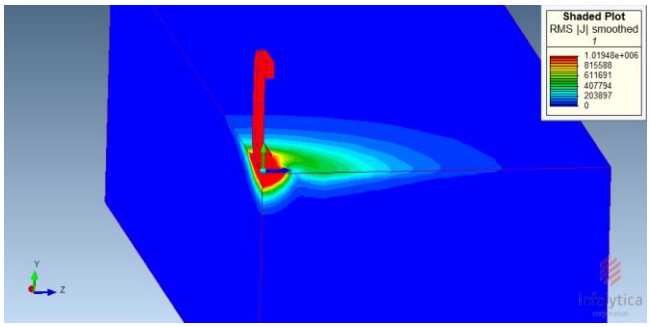
Б) траекториите на вихровите токове повтарят в общи линии формата на възбудителната намотка – те са окръжности при кръгли намотки (фиг. 3) и почти правоъгълни при правоъгълна форма на намотката (фиг.4);

В) в равнините успоредни на повърхността на обекта (*Oxz)* плътността на вихровите токове е максимална в зоните точно под възбудителната намотка и монотонно намалява към оста на ВТП и към краищата на обекта;

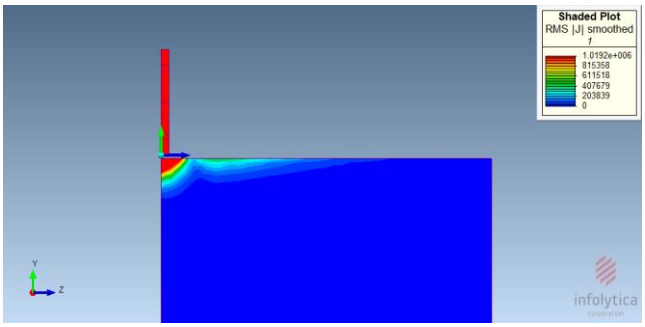
Г) в направлението перпендикулярно на повърхността на КО (оста *Oy*), т. е. по оста на намотката, плътността на вихровите токове монотонно намалява в дълбочина.

3.2. Преобразувател type A

На фиг.7 е показана картината на разпределение на плътността на вихровите токове при некласически преобразувател с възбудителна намотка ***type A*** в 3D план, а на фиг.8 - аналогична картина в равнината *Oyz*.

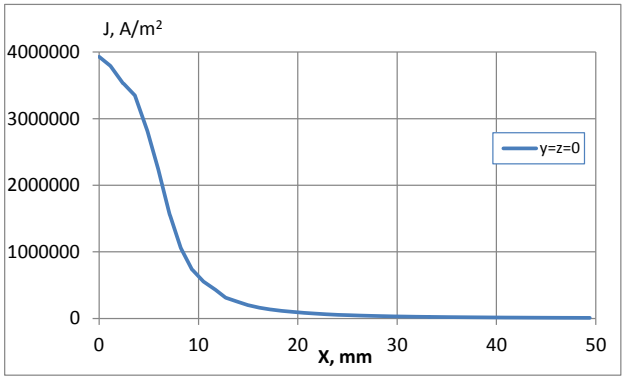


Фиг.7. Картина на вихровите токове при ВТП ***type B***

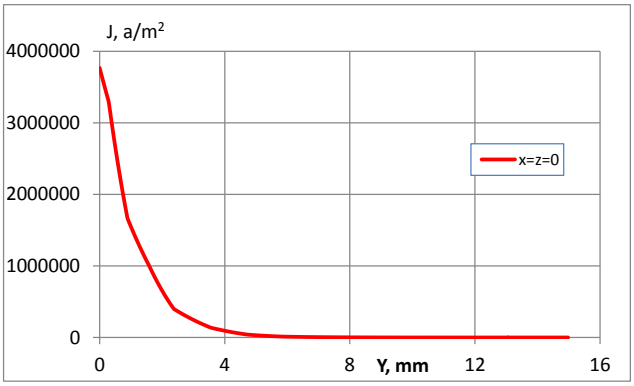


Фиг.8. Картина на вихровите токове ВТП ***type B*** - равнината *Oyz*

На фиг.9 е показано изменението на ефективната стойност на плътността на вихровите токове по оста *Ox*, на фиг.10 – по оста *Oy* и на фиг.11 – по оста *Oz*.



Фиг.9. Зависимост на плътността на вихровите токове от координатата ***x*** - ВТП ***type A***

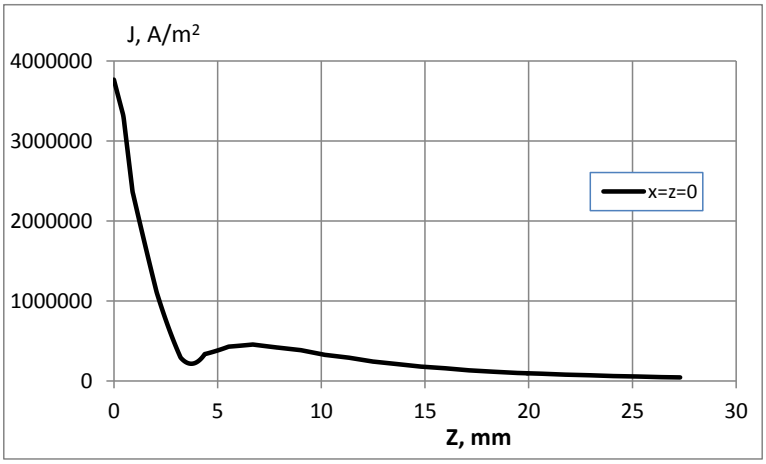


Фиг.10. Зависимост на плътността на вихровите токове от координатата ***y*** - ВТП ***type A***

Завъртането на π/2 rad на оста на възбудителната намотка при преобразувателите от ***type A*** води до съществено изменение на разпределението на вихровите токове в КО. Всъщност само зависимостите на плътността на вихровите токове по оста *Oy* е аналогична за двата типа ВТП.

Фиг.6 и фиг.10 показват,че и в двата случая ефективната стойност на вихровите токове затихва почти експоненцилно в посока перпендикулярна на граничната повърхност на обекта.

Зависимостите на ефективните стойности на плътността на вихровите токове по другите две координатни оси в равнини, успоредни на граничната повърхност, при ***type A*** коренно се различават:



Фиг.11. Зависимост на плътността на вихровите токове
от координатата ***y*** **-** ВТП ***type A***

А) под оста на преобразувателя плътността на вихровите токове има максимум – стойностите при $x = 0$ на фиг. 9 и $z = 0$ на фиг.11;

Б) по оста *Oz* плътността на вихровите токове има минимум при $z \approx 3{,}72$и след него „полегат“ локален максимум при $z \approx 6{,}7$ (фиг.11). Тези локални екстремуми се виждат и на фиг.7 и особено на фиг.8 (върху челните стени).

4. Заключение

Резултатите от направения анализ на разпределението на вихровите токове, възбуждани от некласически електромагнитен преобразувател ***type A*** в плосък проводящ обект водят следните изводи:

А) има съществени различия от случая на класически възбудителни намотки - ***type B***;

Б) по посока на оста на преобразувател от ***type A*** ефективната стойност на плътността на вихровите токове в КО има ясно изразени локални минимум и максимум;

В) ако изследванията се продължат до получаване на точните траектории на вихровите токове при тези преобразуватели, няма да е трудно тези ефекти да намерят своето физическо обяснение;

Г) зоните, в които вихровите токове са с достатъчно голяма плътност са с по-малка площ, когато преобразувателя е от ***type A.*** Това определя по-малка зона на контрол и ги прави особено подходящи за направа на електромагнитни преобразователи за локални измервания и безразрушителен контрол.

Литература

[1]. Гунински С. Г., В. С. Иванов, ***Влияние на посоката на относителното движение върху изходния сигнал на трансформаторен електромагнитен преобразувател с отместени намотки***, Годишник на Техническия университет - София, т. 59, кн. 2, 2009 г., с. 57 - 64

[2] Гунински, Ст., В. Иванов и К. Тодорова, ***Изходен сигнал на трансформаторен електромагнитен преобразувател с диагонално отместени правоъгълни намотки при наличие на движение***. Годишник на Техническия университет – София, т. 60, кн. 2, 2010 г., Юбилеен „65 години ТУ - София" и „60 год. Годишник", Втора научна конференция на Електротехническия факултет, Созопол, 1 – 3 октомври 2010 г., с. 317 - 326

[3] Гунински С., В. Иванов, ***Влияние на скоростта върху изходния сигнал на вихровотокови преобразуватели с различна форма***, Сборник доклади от XVI Национален Научен Симпозиум с международно участие "Метрология и Метрологично Осигуряване 2006" (12-16 Септември 2006 г., Созопол), с. 161-166

[4] 2D Tutorial, Preparing, Solving and Interpreting NDT Problems, Infolytica Corporation, 2005

[5] 3D Tutorial, Preparing, Solving and Interpreting NDT Problems in 3D, Infolytica Corporation, 2006

[6] Цветков Д. и кол., Електромагнитна дефектометрия, С., Техника, 1981

[7] *www.infolytica.com/livedocs/.*

[8] *www.infolytica.com/en/applications/ex0117*

Автори: Стефчо Гунински, доц. д-р, катедра „Обща електротехника", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *sgg@tu-sofia.bg*, маг. инж. Валери Иванов, гл. ас. ЮЗУ „Неофит Рилски" - Благоевград, E-mail address: *val_iv@abv.bg*.

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Живко Даскалов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СЪВМЕСТИМОСТ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ДВИГАТЕЛИ И ТРАНСФОРМАТОРИ

Стойо Платиканов, Петър Цвятков, Цветозар Петков, Милко Йовчев

Резюме: *Изследването на електромагнитната съвместимост на електрически двигатели, генератори, трансформатори и автотрансформатори се оценява чрез измерване със специализиран уред на магнитната индукция на електромагнитното поле, създадено от тях. Измерванията и изчисленията се извършват по предложена фирмена методика. Преценката за електромагнитното въздействие се извършва по международни препоръки за измерената гранична стойност на резултантната индукция.*
Ключови думи: *електромагнитна съвместимост, електромагнитна индукция, магнитно поле, електрически двигатели, трансформатори*

STUDY ON THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ELECTRIC MOTORS AND TRANSFORMERS

Stoyo Platikanov, Petar Tsvyatkov, Tsvetozar Petkov, Milko Yovchev

Abstract: *The study of electromagnetic compatibility of electric motors, generators, transformers and autotransformers by measuring a specialized unit of magnetic flux density of the electromagnetic field produced by them. Measurements and calculations are performed on proposed company methodology. Assessment of electromagnetic effects is carried out in international recommendations for the measurement limit of the resultant induction.*
Key words: *electromagnetic compatibility, electromagnetic induction, magnetic field, electric motors, transformers*

1. Въведение

Електромагнитната съвместимост при електрическите машини и трансформатори се състои в способността им да работят в условията на средата, където са необходими, а така също да не създават електромагнитни влияния над предписани нива, които да смущават работата на електронни устройства [1, 2, 3]. В разработката се изследват със специализирана измервателна апаратура електромагнитните излъчвания, създавани от електрически двигатели, генератори, трансформатори и автотрансформатори.

2. Постановка на измерванията и изчисленията

Изследванията се извършват в катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ и в промишлени условия. Изследват се както отделни двигатели с малка и

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

средна мощност, така и куплирани към постояннотокови генератори, към вихротокови спирачки и в комплект в двигател-генераторни групи. Режимът на електродвигателите е близък до „празен ход“, т.к. куплираните към някои от тях товарни генератори са невъзбудени, за да не се добави допълнително електромагнитно поле и да се гарантира коректност на резултатите. Измереното електромагнитно поле се създава от статора или полюсите, сумирано с потока на разсейването.

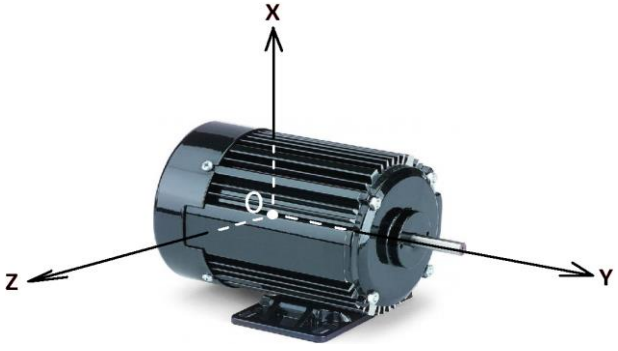
Измерванията се извършват в две направления – напречно и надлъжно спрямо статора. Измерванията в напречна посока са към централната част на статора, а в надлъжна – по оста на вала от страната на вентилатора. Тези приети измервателни точки се фиксират от светлинно петно на лазерен прибор, използван съвместно с цифровия анализатор ME 3851A и са посочени на чертежите в табл.3 и табл.4.

При изследването на трансформаторите и автотрансформаторите е необходимо да се отчита, че намотките на трансформаторите от мантиен тип екранират в известна степен резултантното магнитно поле, поради което измерванията се извършват фронтално в горната централна част на магнитопровода - фиг.2 и странично по дължината на ламелите - фиг.3.

При измервания на изследваните автотрансформатори се отчита екраниращото влияние на предпазната стоманена ламарина, която деформира основното магнитно поле, поради което избраната зона и измервателната точка е под ръкохватката - фиг.4.

Експерименталните измервания са проведени с цифров анализатор ME3851 – Gigahertz Solution [4], посредством вграден цилиндричен сензор за изследване на поле при избран честотен обхват на филтъра от 50 Hz до 100 kHz. Методиката на извършване на измерванията е в съответствие с препоръките на фирмата производител [4], като се приема регламентирано отстояние от изследваните обекти – 1,0 m. При по-малко отстояние приборът показва голяма амплитуда и бързо вариращи стойности на дисплея, като от многобройните изследвания може да се предполага, че това се дължи на допълнителни разсеяни полета. Полето от общия „електромагнитен фон“ в лабораториите, при изключени други електрически машини, апарати и осветление, не надвишава (8 - 10) nT, поради което се пренебрегва.

Измерванията с прибора се извършват по трите координатни оси – X, Y и Z, в съответствие с фирмената методика за измерване и изчисление - фиг.1.



Фиг.1. Ориентация на измервателния уред ME3851

Когато се отчита местоположението на вградения сензор в измервателния прибор, измерването по трите оси се извършва в следната последователност: по оста X – корпусът на уреда е в хоризонтално положение; по оста Y – завъртане в лява посока на „ребро“; по оста Z – вертикално положение на корпуса. Приемат се предложените фирмени практически правила за определяне на общото магнитно поле - табл.1.

Табл.1

Измерени стойности	Резултантно магнитно поле
Една висока, двете най-ниски стойности	Най-висока стойност
Две високи, една ниска стойност	Най-висока стойност + половината от втората по големина стойност
Три подобни стойности	Един път и половина от най-високата стойност

Общото резултантно магнитно поле е сума от единичните стойности на магнитната индукция по осите X, Y, Z – съответно B_x, B_y, B_z, т.е. резултантната измервана стойност. Обобщената стойност на B в [nT] се определя по предложените практически правила (табл.1). Изчислената резултантна магнитна индукция B_{res} е:

$$B_{res} = \sqrt{\left(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2\right)} \qquad (1)$$

В табл.2 са представени препоръки на специализирани институции и организации [1, 2, 4], но те не са конкретизирани за електрически машини и трансформатори.

Табл.2.

Честотна област	Н о р м и		
	MPR II	TCO ’92 – ‘99	TV RHEINLAND
Магнитно променливо поле 5 Hz до 2 kHz 2 kHz до 400 kHz	 200 nT 25 nT	 200 nT 25 nT	 200 nT 25 nT

3. Резултати от измерванията и заключенията

В табл.3 и табл.4 са представени резултати от проведените измервания с измервателния уред ME3851 и стойностите на изчислената резултантна индукция – B_{res} за 23 броя електрически машини.

Табл.3.

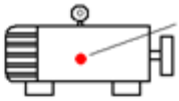
№ по ред	Електродвигатели празен ход		 зона на измерване					зона на измерване				
			Измерени величини				Изчис-лени	Измерени величини				Изчис-лени
			B_x	B_y	B_z	Обоб-щена B	Резултантна B_{res}	B_x	B_y	B_z	Обоб-щена B	Резултантна B_{res}
			[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	АД тип АО252-2 13 kW; 2920 min^{-1}; 220/380V△/Y42,6/24,6A cosφ 0,90	1,0 m	824	125	128,2	824	843	524	45,8	49	524	528
2	АД тип А0251-8/6/4 2/2-5/3-4 kW; n = 738 min^{-1} 380V; △/Y/YY6-5/7-4/ 6-8A; cosφ 0,60/0,67/0,9	1,0 m	22,4	13,2	13,2	22,4	29	10,3	14,9	28,6	28,6	33,8
		0,5 m	66,5	37	34,4	66,5	83	62,5	53,5	15,8	89	84
	n = 989 min^{-1}	1,0 m	138,2	53,6	119	197,8	190,3	88,6	142,6	52,6	143	175
		0,5 m	680	358	482	921	907	356	449	242	627	622
	n = 1470 min^{-1}	1,0 m	137,4	20,4	178,8	247,5	226	99,5	123,8	105,5	177	191
3	АД тип AD 63M2 △/Y220/380V; 1,3/0,75A; 2800 min^{-1}	1,0 m	146,3	328	226	441	424	103	74	18,4	140	128
	INVERTER f = 6,5 Hz; 390 min^{-1}	1,0 m	13,5	4,8	13,8	20,5	19,9	17,5	6,6	8,1	17,5	20,4
		0,5 m	26,9	11,9	14,8	27	33	17,9	9,8	8,6	18	22
	INVERTER f = 30 Hz; 1800 min^{-1}	1,0 m	56,4	26,3	90,2	118	110	55,4	30,7	19,6	55	66
	INVERTER f = 50 Hz; 3000 min^{-1}	1,0 m	153	72	237	313,5	291	84	76	148	190	186
4	Изпълнителен двигател за постоянен ток с постоянни магнити тип D1 8060; Un = 48 V; 6000 min^{-1}; Mn = 0,6 Nm	n_1 = 1000 min^{-1} 1,0 m	64	48	240	240	253	56	43	258	258	267
		n_1 = 1000 min^{-1} 0,5 m	135	70	423	423	449,5	144	80	533	533	558
		n_1 = 2000 min^{-1} 1,0 m	76	83	258	258	281,4	61	83	283	283	301
5	АД тип 7,5kW; △380V; 15,5A; n = 2950 min^{-1}	1,0 m	247	51,2	838	838	875	294	358	248	505	525,4
6	АД ~ 3; 50 Hz; клас F; тип T80A 2 AB5; 0,75 kW; 220/380V; △/Y; 3,5/2A; n=2820 min^{-1}; cosφ 0,82	1,0 m	274	99	132	340	320	238	77	68	238	259
7	АД тип АО-80А-2D; 0,75 kW; 220/380V; △/Y; 3,2/1,85A; n=2850 min^{-1}; cosφ 0,82	1,0 m	509	107	516	770,5	732,6	342	213	167	448,5	436

Табл. (продължение)

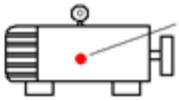
№ по ред	Електродвигатели празен ход		 зона на измерване					зона на измерване				
			Измерени величини				Изчис-лени	Измерени величини				Изчис-лени
			B_x	B_y	B_z	Обоб-щена B	Резултантна B_{res}	B_x	B_y	B_z	Обоб-щена B	Резултантна B_{res}
			[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	Асинхронен електро-двигател 3~ 50 Hz; 1,1 kW; 220/380V; △/Y; 4,9/2,8A; 1410 min^{-1}; cosφ 0,80; клас E	1,0 m	45	9	66	88,5	80,4	40	5	47	67	62
		0,5 m	54	20	399	399	403	34	20	117	117	123,5
9	Бормашина ПН161 АД тип 4АО-100L-8/40 0,7/1,1 kW; △/YY 380V; 2,8/2,5A; 710/1430 min^{-1}; cosφ = 0,61/0,87	1,0 m	6,5	80,2	45,8	103	93	72,9	156,3	104,6	209	202
		0,5 m	62,1	204	116,2	262	243	187,6	68,4	148,4	262	249
10	Леонардова група I; АД тип А02-41/4; 5,5 kW; n=1450 min^{-1}; Y 380 V; 11,2A; η = 86,3%; cosφ = 0,86	1,0 m	104,2	23,2	89,8	149	139,5	33,9	58,7	29,4	75,6	73,9
11	Хидравлична система; АД тип АО2-41; 5,6 kW; 1450 min^{-1}; 220/380V;△/Y; 10,5/7,4 A; cosφ 0,96	1,0 m	184	75	245	337	315,4	156	57	23	156	167,7
12	Струг СТ161; постояннотоков електро-двигател тип МР132М; 1,1 kW; 1000 min^{-1}; режим S1; max 3600 min^{-1}; U_B = 110 V; U_A = 400 V; I_B = 5,8 – 1,2 A I_A = 34 A; клас F	1,0 m	146	96	136	214	221	73	96	54	132,5	132,1
		0,5 m	525	395	582	844,5	878	195	216	225	333	368
13	Струг револверен; АД – 2,2 kW; 380/220 V; △/Y; 5,2/4,1 A; 1450 min^{-1}	1,0 m	46	50	67	92	95,4	5	12	59	59	60,4
		0,5 m	170	120	134	237	247,5	56	44	188	188	60,4

Табл.4.

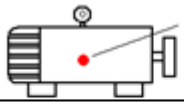
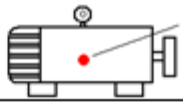
№ по ред	Електродвигатели, генератори празен ход		 зона на измерване				
			Измерени величини				Изчислени
			B_x	B_y	B_z	Обобщена B	Резултан-тна B_{res}
			[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
			1	2	3	4	5
1	Постояннотоков генератор П92; 49/60 kW; 1450 min^{-1}; 220/320 V; 222/188 A	без възбуждане; 1 m	160	188	124	268	276,3
		с възбуждане; 1 m	267	192	141	363	358

Табл.4 (продължение)

№ по ред	Електродвигатели, генератори празен ход		 зона на измерване				
			Измерени величини				Изчислени
			B_x	B_y	B_z	Обобщена B	Резултантна B_{res}
			[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
			1	2	3	4	5
2	Захранващ агрегат на лаборатория „Електрически машини“. АД тип АО2 82-4; 55 kW; 1475 min^{-1}; 380V:△; 98,5A; η = 93%; cosφ = 0,91	1,0 m	325	205	401	563,5	555,4
3	Леонардова група II; АД тип МТ1 12-6; 5 kW; n=930÷2000 min^{-1}; 380/220V; Y/△; 13,3/23A; Мотор 206V; Y 16,5 A	1,0 m	203	127,6	79	266,8	252,4
4	Компресор; АД тип АО100L-4; 2,2 kW; 220/380V; △/Y; 8,6/5,0A; 1420 min-1	1,0 m	109	12	209	263,5	236
		0,5 m	444	60	154	444	474
5	Шмиргел тип ШД 550/200 3~ 380V; 1,28A; 50 Hz; 2750 min^{-1}; S2, 10 min; клас B	1,0 m	84	29	282	282	295,7
6	Затиловъчен струг АД ИП 001-51/6-2 3,3-38 kW; 380V; Y; 8,3-9,1 A; η= 77-72; cosφ 0,78-0,88; n=940÷2800 min^{-1}	1,0 m	132	125	407	407	445
7	Струг С11 М; двигател - шпиндел тип 47МВО-26-М; U_{max} = 135 V; $n_н$ = 750 min^{-1}; n_{max}=1500 min^{-1}; S1; $U_{ТГ}$ = 20V; 1000 min^{-1} при n - номинални	1,0 m	145	164	177	259	281,5
		0,5 m	222	350	252	476	485
8	Машинна ножовка АД тип АО4/2D; 1,7-0,8 kW; 380 V; △/YY	1,0 m	132	64	38	164	151,5
		0,5 m	260	306	274	443	486
9	Бормашина колона ПК-203; АД тип АО-100L-8/4; 3~ 50 Hz; 220/380V; △/Y; 3,2/2,5 A; cosφ 0,57-0,86; 720/1430 min^{-1}	1,0 m	114	54	139	196	188
		0,5 m	180	101	198	288	286
10	Зъбофрезова машина; АД тип 4АМ132/М8 380V; △/Y/YY; 2,6 kW – 7,6 A – 720 min^{-1} 2,8 kW – 7,3 A – 965 min^{-1} 4,6 kW – 9,8 A–1420 min^{-1} на I^{вв} степен скорост	1,0 m	28	35	24	49	50,8

В табл.5 и табл.6 са представени резултати от проведени измервания с цифровия анализатор ME3851 и стойностите на изчислената резултантна индукция – B_{res} за 5 броя трансформатори и автотрансформатори.

На фиг.5 и фиг.6 е показан методът на измерване на магнитното поле с помощта на цифровия анализатор ME3851 на част от електрическите машини – електродвигател (фиг.5.а), трансформатор (фиг.5.б) и автотрансформатор (фиг.6).

Табл.5.

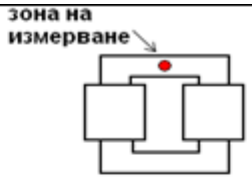
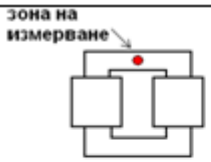
№ по ред	Трансформатори (фиг. 2 и фиг. 3)			 Фиг. 2					Фиг. 3				
				B_x	B_y	B_z	Обобщена B	Изчислена B	B_x	B_y	B_z	Обобщена B	Изчислена B
				[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Разделителен трансформатор „УНИТРАФ“ тип ТрОМЕ 10300-027; 220/220 V; 50-60 Hz; празен ход		1,0 m	301	42	135	301	332	198	20	52	198	206
			0,5 m	1363	206	146	1363	1386	1524	206	58	1524	1539
2	Трансформатор еднофазен 1,5 kW; 380/133 V	Празен ход	1,0 m	41,1	9,5	17,6	41,1	45,7	80,7	9,2	24,8	80,7	84,9
			0,5 m	77,6	36,2	26,4	77,6	89,6	460	46	37,6	460	464
		Товар: I = 4 A	1,0 m	99	150	53	199,5	187,4	101	102	58	152,5	154,8
			0,5 m	344	155	191	439,5	423	371	172	326	534	523

Табл.6.

№ по ред	Трансформатори (фиг. 2) Автотрансформатори (фиг. 4)			 Фиг. 2 Фиг. 4				
				B_x	B_y	B_z	Обобщена B	Изчислена B
				[nT]	[nT]	[nT]	[nT]	[nT]
				1	2	3	4	5
3	Автотрансформатор лабораторен-еднофазен тип P 2; 220/250 V; 2 kVA; max 9 A	Празен ход	1,0 m	70	149	196	270,5	256
			0,5 m	382	171	1869	1869	1915
		Товар: I = 4 A	1,0 m	88	307	1078	1078	1124
4	Автотрансформатор тип TDGC – 1 kVA; празен ход		1,0 m	39,5	2,9	17,7	48,3	43,4
			0,5 m	42,8	6,8	65,0	86	78
5	Многонамотъчен трансформатор 3; 10 kVA; 380/24, 36, 42, 110, 220 V; празен ход		1,0 m	29	228	59	228	237,3
			0,5 m	67	1064	156	1064	1075

4. Анализ на резултатите. Изводи

В съответствие с препоръките в табл.2 [4] граничната стойност на индукцията на полето е 200 nT.

В табл.3, табл.4, табл.5 и табл.6 са представени резултати от 352 единични измервания на B_x, B_y, B_z, B и 88 броя единични измервания на индукцията B_{res}.

Като се анализират резултатите за изследваните двигатели и се сравнят с нормата за индукцията от 200 nT се установява, че проведените измервания от отстояние 1 m на 25 двигатели „напречно на корпуса“: за 7 броя двигатели B_{res} е над 300 nT (т.е. повече от 50 % над нормата); за 8 броя електродвигатели B_{res} е над 200 nT (т.е. под 50 %) и за 8 броя двигатели B_{res} е над нормата 200 nT. При измервания „надлъжно на корпуса“ на 13 броя двигатели: за 3 броя B_{res} е над 300 nT (повече от 50 % над нормата); за 2 броя – B_{res} е над 200 nT (т.е. под 50 %) и за 8 броя B_{res} е под нормата – 200 nT. При сравнения на резултатите от измервания в двете зони „напречно“ и „надлъжно“ спрямо корпуса се установява, че стойността на индукцията при „напречното“ измерване е около два пъти по-голяма. При намаляване на отстоянието от уреда до електродвигателя от 1 m на 0,5 m, стойността на индукцията се увеличава от 2 до 4 пъти. Сравнително малката разлика между измерената обобщена стойност на индукцията B в [nT] и изчислената резултантна индукция B_{res} в [nT], показва приемлива точност на резултатите от изследванията на двигателите.

Резултатите от измерванията на трансформаторите и автотрансформаторите (табл.5 и табл.6) при отстояние 1 m от тях и празен ход, показват, че индукцията както при фронтално, така и при странично измерване е под или малко над препоръката за гранична стойност от 200 nT.

При намаляване на остоянието от 1 m на 0,5 m, магнитната индукция нараства над (3 – 4) пъти, подобно, както при изследване на двигатели. Измерванията на индукцията при наличие на товар не са еднозначни и са необходими допълнителни по-обширни изследвания.

От направения анализ се установява, че като се съобрази препоръката за граничната стойност на индукцията на полето от 200 nT и при отстояние 1 m от електрическите машини, в преобладаващите измервания нивото на индукцията е под и около тази стойност.

При увеличаване на това отстояние, което съответства на практическите условия в лаборатории и фирми, смущаващото въздействие от нивото на полето рязко намалява спрямо хората и околната електронна апаратура.

За да се направят обобщени изводи е необходимо да се завиши броя на изследваните обекти и да се повиши селективността и точността на използваната измервателна апаратура, като се отчитат и други специфични фактори: влиянието от изменение на честотата, отклонение и колебание на захранващото напрежение; влиянието на околните активни консуматори и близко разположени метални предмети; точно позициониране на измервателния уред със сензора по осите X, Y, Z; конкретни нормативни предписания за гранична стойност на индукцията на полето в зоната на електрическите машини.

Фиг.5.а)

Фиг.5.б)

Фиг.5. Измерване на магнитното поле на електрически двигател – а) и тринамотъчен трансформатор, б) с измервателния уред ME3851

Фиг.6. Измерване на магнитното поле на лабораторен автотрансформатор

Литература

[1] IEC 1547, ***International Elektrotechnical Commision***

[2] EN 61000-3-2 – ***Electromagnetic compatibility***, Part 3: Limits, Section 2: Limits for harmonics current emissions – April 1995

[3] Konig, Folkerts: ***Elektrischer storm als umweltfaktor***, Richard Pflaum Verlag, München

[4] GIGAHERTZ SOLUTION, ME 3851A, Technische Referenz, Deutschland

[5] Платиканов С., П. Цвятков, М. Йовчев, ***Изследване на електромагнитната съвместимост на електрическите осветители***, IV Научна конференция ЕФ2012, 28.09.2012-01.10.2012, Созопол

Автори: Стойо Платиканов, доц. д-р инж., катедра "Електроснабдяване и електрообзавеждане" (ЕСЕО), Технически Университет - Габрово, E-mail address: *stoyoplatikanov@gmail.com*; Петър Цвятков, инж. , катедра ЕСЕО, ТУ-Габрово, E-mail address: *pzwyatkov@tugab.bg*; Цветозар Петков, гл. ас. инж., катедра ЕСЕО, ТУ-Габрово, E-mail address: *tsvetozar_petkov@mail.bg*; Милко Йовчев, ас. инж., катедра ЕСЕО, ТУ-Габрово, E-mail address: *milkoyovchev1986@gmail.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** гл. ас. д-р Н. Матанов

ЕНЕРГИЙНО ОБСЛЕДВАНЕ И ЕНЕРГИЙНО-ЕФЕКТИВНА МОДЕРНИЗАЦИЯ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО В ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Стойо Платиканов, Пламен Цанков, Николай Бърдарски, Дешка Маркова, Милко Йовчев, Петър Цвятков, Емил Станев

Резюме: *В Технически университет-Габрово се извършва енергиен одит на техническото състояние на съществуващата осветителна уредба и нейните показатели за постигане на технически и икономически мерки за енергийна ефективност. Модернизацията на съществуващото осветление във всички лекционни зали, лаборатории и съоръжения се извършва чрез многовариантни светлотехнически изчисления със специализиран софтуер. Избират се съвременни лампи и оптимален брой осветителни тела за да се гарантират стандартни показатели за осветление и минимален разход на енергия.*

Ключови думи: *консумация на електрическа енергия, обследване, осветители, баласт, осветеност, светлоразпределение, DIALux, енергийна ефективност*

ENERGY AUDIT AND ENERGY EFFICIENT MODERNIZATION OF THE LIGHTING IN TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO

Stoyo Platikanov, Plamen Tsankov, Nikolai Burdarski, Deshka Markova, Milko Yovchev, Petar Tsvyatkov, Emil Stanev

Abstract: *The consumption of electrical energy in Technical University of Gabrovo is essentially determined by the lighting in lecture halls and laboratories, administrative and support facilities. For realization of technical and economic measures of energy efficiency is conducted an extensive energy audit of the technical condition of existing lighting and its technical indicators. Multivariate lighting engineering calculations with specialized software are done. Modernization of existing lighting in all lecture halls, laboratories and facilities is carried out. New light sources and luminaires with optimal number and electrical power are chosen to ensure standard lighting indicators.*

Key words: *energy consumption, audit, luminaires, gear, illuminance, light distribution, energy efficiency.*

1. Въведение

Средствата за консумираната електрическа енергия в учебните сгради на Технически университет-Габрово са значителен дял от енергийните разходи, като преобладаваща част от тях са за осветление. Реконструкцията и модернизацията

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

на осветителните уредби в учебните корпуси са предпоставка за подобряване на качеството на осветление в съответствие с изискванията на българския стандарт за вътрешно осветление БДС EN 12464-1:2011 [1] и повишаване на енергийната ефективност, което осигурява намаляване на преките енергийни разходи на университета.

В доклада се представят резултати от извършено енергийно обследване в учебните корпуси; резултати от вариантни светлотехнически изчисления на помещенията и реализираните с тях енергийни показатели. Направен е анализ на постигнатата енергийна ефективност и сравнителна оценка на съществуващите и постигнатите нови светлотехнически и енергийни показатели.

2. Енергийно обследване на осветлението в учебните корпуси

Екип от катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ при ТУ-Габрово извърши обстойно електроенергийно обследване на осветителните уредби в учебните корпуси на университета.

Консумираната електрическа енергия по учебни корпуси в периода от 2009 г. до 2011 г. е както следва: 933546 kWh – за 2009 г.; 875162 kWh – за 2010 г.; 803850 kWh – за 2011 г.

В табл.1 са представени обобщени резултати от обследването на учебните корпуси.

Табл.1

Общо за учебен корпус	Брой помещения	Площ	Брой осветители	Общ брой монтирани лампи	Брой работещи лампи	Брой неработещи лампи	Мощност на работещите лампи	Мощност на неработещите лампи	Инсталирана мощност със загуби в ПРА
	бр.	[m^2]	бр.	бр.	бр.	бр.	[kW]	[kW]	[kW]
Корпус 1									
Общо	259	12672	1296	4253	2477	1776	102,9	76,4	222,8
Корпус 2									
Общо	113	4943	790	2058	1504	554	58,7	23,7	102,1
Корпус 2а									
Общо	56	1997	248	886	842	44	16,6	0,79	21,7
Корпус 3									
Общо	136	4803	582	1290	1071	219	35,9	7,2	52,6
Корпус 5									
Общо	58	4124	530	-	-	-	-	-	115,9
Корпус 6									
Общо	357	-	304	2343	-	-	-	-	131,95
Общо за всички корпуси	979	-	3750	-	-	-	-	-	647,05

Учебен корпус 1 съдържа общо 259 помещения с обща площ 12672 m^2. Осветителната уредба е реализирана с 1296 броя осветители преди 35 години, предимно с луминесцентни лампи, които сега са разпределени: 80 W – 125 броя осветители; 40 W – 547 броя; 36 W – 383 броя; 18 W – 76 броя. Пусково регулиращата апаратура (ПРА) е с дросели, кондензатори и стартери и единични осветители с електронна ПРА. Общия брой монтирани лампи е 4253 броя, от които работят 2477 броя, т.е. 58 %. Общата инсталирана мощност, включително загубите в ПРА, е 222,8 kW.

В табл.1 са представени резултати и от обследването на корпуси 2, 2а, 3, 5 и 6. Корпус 6 е въведен в експлоатация през 1969 г. с 357 помещения, в които са монтирани 304 луминесцентни осветители с 691 лампи и 1652 осветители с нажежаеми лампи. Замяната на този значителен брой нажежаеми лампи е първата енергоспестяваща мярка. Общата инсталирана мощност на корпус 6 е 131,945 kW. Броят на осветителните тела в корпус 2 е 790, инсталираната мощност за осветление със загуби в ПРА е 102,1kW; за корпус 2а осветителите са 248, инсталираната мощност за осветление е 21,7 kW; за корпус 3 – 582 броя осветители, инсталирана мощност за осветление 52,6kW; за корпус 5 – 530 броя осветители, инсталираната мощност за осветление е 115,9 kW.

През годините на експлоатация на осветителната уредба в корпус № 1 са настъпили изменения на електрическия режим на работа на осветителите, особено при замяната на лампи с подобна, но различна от първоначалната мощност. Тези експлоатационни промени оказват влияние както на светлотехническите реализирани показатели – осветеност и др., така и на електрическите – консумация и загуби на електрическа енергия, фактор на мощността и др.

В електроенергийното обследване са проведени измервания със специализирана апаратура в електрическите табла в корпус 1 за захранване на линии за осветление – табл.2.

Табл.2

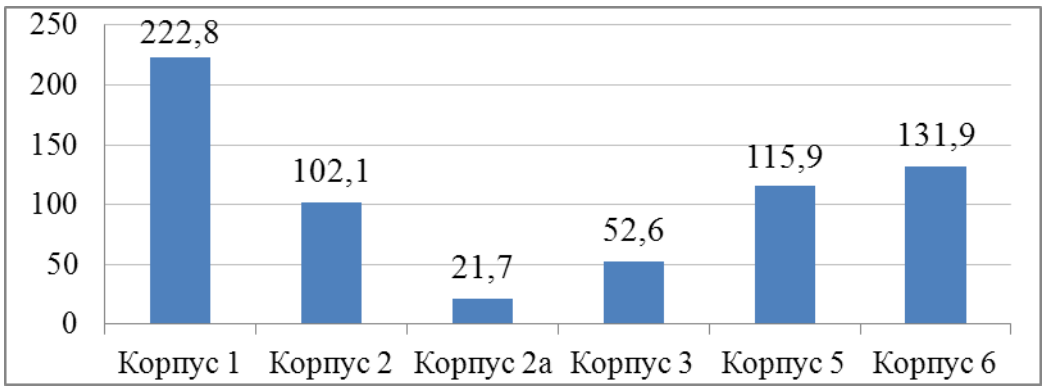
№	Учебна зала	Луминесцентни лампи в работещо състояние	Табло за електро-захранване	Измерени електрически величини					
				U	I	P	Q	S	PF
				[V]	[A]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	-
1.	Лекционна №1108	30бр. х 36W	Главно табло I етаж шахта ”Запад“	228,7	10,2	1,39	1,93	2,37	0,587
2.	Лекционна №1110	28бр. х 58W	Табло I етаж шахта ”Запад“	230,3	14,1	3,06	1,17	3,21	0,947
3.	Лекционна №1116	33бр. х 58W	Табло I етаж шахта “Изток“	228,4	13,4	2,94	1,40	3,28	0,922

Табл.2. (продължение)

№	Учебна зала	Луминесцентни лампи в работещо състояние	Табло за електро-захранване	Измерени електрически величини					
				U	I	P	Q	S	PF
				[V]	[A]	[kW]	[kVAr]	[kVA]	-
4.	Лекционна №1130	28бр. x 36W	Табло I етаж шахта “Изток“	228,8	11,3	1,36	2,06	2,47	0,548
5.	Лекционна №1406	33бр. x 58W	Табло IV етаж шахта “Изток“	230,2	15,0	3,13	1,37	3,36	0,920
6.	Лаборатория №1421	28бр. x 58W	Табло IV етаж ”Запад“	227,0	12,5	2,64	1,20	2,86	0,920
7.	Лаборатория №1422	28бр. x 58W	Табло IV етаж “Изток“	230,4	12,3	2,56	1,36	2,86	0,895
8.	Коридор - партер ”Запад“	19бр. x 58W	Табло Партер ”Запад“	230,0	9,7	0,9	2,04	2,23	0,404
9.	Коридор – II етаж ”Запад“	21бр. x 36W	Табло II етаж ”Запад“	229,0	15,5	0,97	3,42	3,55	0,273
10.	Коридор – IV етаж”Запад“	17бр. x 36W	Табло IV етаж ”Запад“	229,0	6,4	0,90	1,21	1,51	0,600

Измерват се напрежение (U), ток (I), активна мощност (P), реактивна мощност (Q), пълна мощност (S) и фактор на мощността (PF). По време на експлоатацията е извършена замяна в съществуващите осветители на старите луминесцентни лампи 80 W с лампи 58 W и 65 W – работен ток 0,67 A. Променя се консумацията на активна и реактивна мощност. През многогодишния срок на работа на осветителите са променени състоянието и капацитета на компенсиращите кондензатори в техните схеми. Поради значителния брой неработещи лампи е променено съотношението на консумираната активна и реактивна мощност от осветителите и редица от тях работят с капацитивен фактор на мощността PF, което е особено меродавно за осветителите по коридорите на корпус 1.

На фиг.1 е представено разпределението на инсталирана мощност за осветление по учебни корпуси.



Фиг.1. Разпределение на инсталираната мощност за осветление по учебни корпуси в [kW]

В отделните типови помещения от учебните корпуси е извършено измерване в достатъчен брой контролни точки и е изчислена измерената средна осветеност, която е значително под нормативните предписания – в диапазона от 140 lx до 260 lx, при нормирани стойности от 300 lx до 500 lx [1].
От данните за големината и разходите за консумираната електрическа енергия в ТУ-Габрово по учебни корпуси и резултатите от извършеното енергийно обследване за разпределението на инсталираните осветители и инсталирани мощности за осветление (таблица 1 и фигура 1) се прави извода за наложителна модернизация и реконструкция на осветителната уредба в корпус 1, корпус 2 и корпус 6 [2, 3].

3. Енергийно-ефективна модернизация на осветлението

За да се реализира енергийно-ефективната модернизация на осветлението са извършени изследвания и специализирани измервания на съществуващите работещи осветители, проучени са възможните рационални замени с нови ефективни осветителни тела и подходящи лампи, направени са многовариантни светлотехнически изчисления, оценена е енергийната ефективност и са предложени мерки за нейното повишаване.
За изследване на светлотехническите показатели на съществуващите осветителни тела в лаборатория „Осветителна техника“ в ТУ-Габрово е измерен коефициента на полезно действие на демонтирани осветители от корпус 1 и корпус 2, който е в границите от 29 % до 36 % - според типа на разсейвателя, отражателя и тяхното експлоатационно състояние, т.е. понижаването е с 50 % от началната стойност. По време на експлоатацията на осветителите се изменя и светлоразпределението на интензитета на светлината в околното пространство. За да се сравни по изчислителен път старото съществуващо и предлаганото ново светлотехническо решение са демонтирани експлоатирани осветители от осветителните уредби и са фотометрирани в акредитирана светлотехническа лаборатория [7] с автоматизиран гониофотометър
Изследвани са преобладаващите луминесцентни осветители с електромагнитни баласти: 3x40 W с лампи T12; 3x36 W с лампи T8; 4x40 W с лампи T12.

За повишаване на ефективността на новото модернизирано осветление е избран съвременен светлинен източник – луминесцентна лампа Т5 за работа с електронна пусково регулираща апаратура (ЕПРА). Въз основа на резултатите от енергийното обследване са избрани за всеки учебен корпус типови помещения, на които са измерени геометричните размери: лекционна зала, лаборатория, семинарна зала, чертожна зала, кабинет, коридор.

Светлотехническите изчисления се извършват със софтуерния продукт DIALux за съществуващото осветление - с измерени светлоразпределения на стари осветителни тела [7] и за ново енергийно-ефективно осветление – с избрани луминесцентни осветители с лампи Т5. Резултати от изчисленията са представени в табл.3, в която са представени някои от изчислените светлотехнически показатели: средна осветеност $E_{ср}$, равномерност на осветеността $U_0 = E_{min}/E_{ср}$, обобщен показател на дискомфорт UGR, инсталирана мощност за осветление със загуби в баластните устройства $P_{инст}$.

Табл.3

Помещение		Съществуващо осветление						Ново енергийно-ефективно осветление						Икономия
предназначение	площ	Осветител		$E_{ср}$	U_0	UGR	$P_{инст}$	Осветител		$E_{ср}$	U_0	UGR	$P_{инст}$	P
	[m^2]	тип	бр	[lx]	-	-	[W]	тип	бр	[lx]	-	-	[W]	[W]
Корпус 1														
лекционна зала	118	3x40W -T12	19	220	0,79	-	3078	2x28W - T5	12	313	0,63	16	744	2334
лаборатория	78	3x36W -T8	6	210	0,7	20	972	2x28W -T5	8	317	0,62	16	496	476
чертожна зала	49	4x40W -T12	9	217	0,74	15	1755	2x28W -T5	9	511	0,65	17	558	1197
коридор	194	4x40W -T12	24	83	0,81	-	4680	1x28W -T5	24	100	0,8	-	696	3984
Корпус 2														
лекционна зала	50	4x40W -T12	9	218	0,73	15	1755	2x28W -T5	9	515	0,64	17	558	1217
								2x28W -T5	6	352	0,71	17	372	1383
кабинет	19,3	3x40W -T12	3	159	0,82	17	486	2x28W -T5	3	408	0,77	17	186	300
коридор	213	4x40W -T12	16	81	0,74	-	2592	1x28W -T5	16	98	0,75	-	464	2128
Корпус 2а														
лекционна зала	99	4x18W -T8	12	358	0,59	17	888	4x14W -T5	12	362	0,65	17	768	120
лаборатория	61	4x18W -T8	9	432	0,59	17	666	4x14W -T5	12	433	0,49	17	576	90
кабинет	19,3	4x18W -T8	2	238	0,78	-	148	4x14W -T5	2	244	0,72	18	128	20

Таблица 3 – продължение

Помещение		Съществуващо осветление						Ново енергийно-ефективно осветление						Икономия
предназначение	площ	Осветител		$E_{ср}$	U_0	UGR	$P_{инст}$	Осветител		$E_{ср}$	U_0	UGR	$P_{инст}$	P
	[m^2]	тип	бр	[lx]	-	-	[W]	тип	бр	[lx]	-	-	[W]	[W]
Корпус 3														
лаборатория	53	3x36W T8	6	304	0,76	19	972	2x28W T5	6	348	0,70	17	372	600
кабинет	20	3x36W T8	2	228	0,77	-	324	2x28W T5	2	302	0,64	-	124	200
Корпус 5														
семинарна зала № 5103	57	3x40W -T8	12	366	0,77	18	1800	2x28W -T5	9	544	0,66	17	540	1260
лаборатория 5211	72	2x36W -T8	9	155	0,71	20	810	2x28W -T5	6	303	0,63	17	360	450
машинна зала	360	400W-ЖЛВН	24	428	0,67	24	**12000**	150W-МХЛ	18	318	0,51	18	2825	9175
коридор	89,1	3x40W -T8	17	89	0,57	-	2550	2x14W -T5	9	113	0,73	-	279	2271
Корпус 6														
лекционни зали	194	2x36W -T8	25	268	0,68	-	2592	2x28W -T5	16	296	0,715	16	992	1600
	146	3x40W -T12	16	184	0,88	-	2592	2x28W -T5	16	375	0,8	16	992	1600
семинарни зали	37	3x36W -T8	4	277	0,77	-	648	2x28W -T5	4	326	0,7	-	248	400
	45	3x40W -T12	6	167	0,77	20	972	2x28W -T5	6	386	0,65	16	372	600

Особен интерес в табл.3 представлява икономията на инсталираната мощност от новото проектно решение за всеки тип помещение. Предложените нови светлотехнически решения са оптимизирани в съответствие с нормативните предписания за учебни сгради [2, 3].

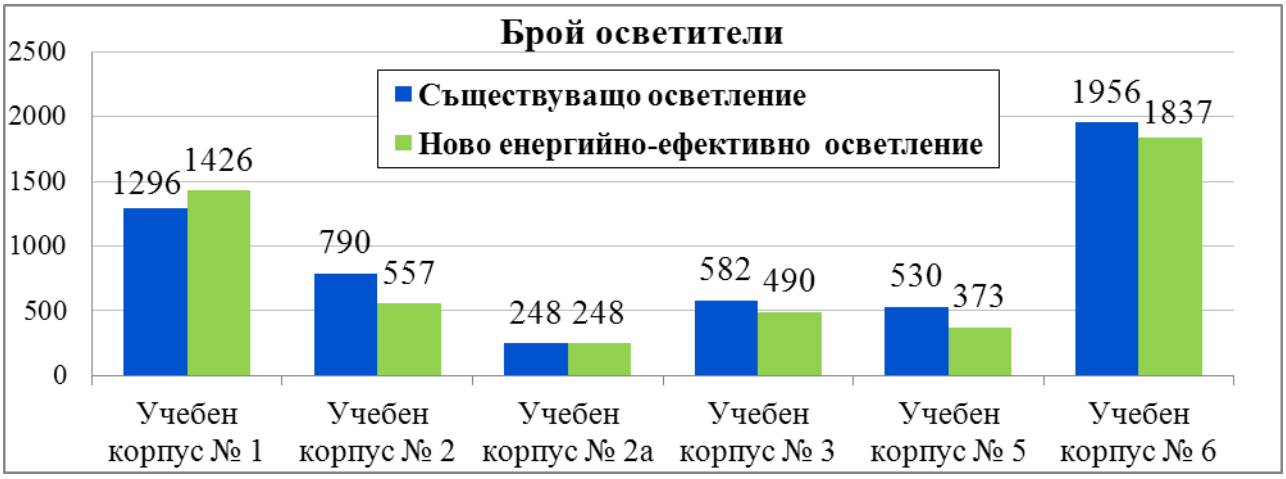
В табл.4, на фиг.2 и фиг.3 са представени обобщени сравнителни резултати от енергийно-ефективната модернизация.

Табл.4

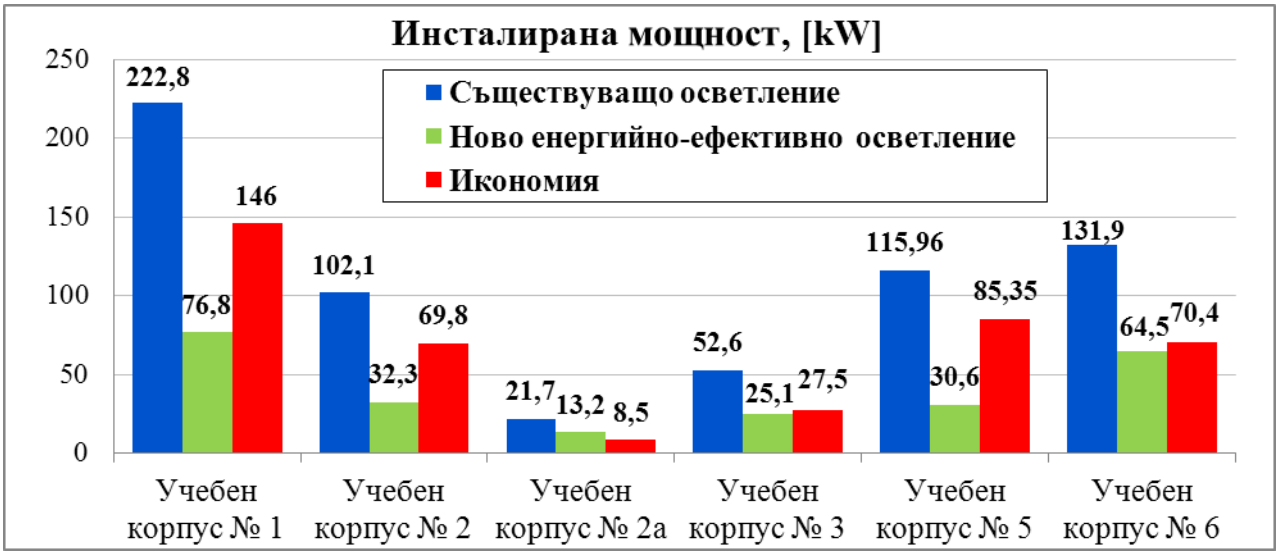
Сграда	Съществуващо осветление (луминесцентни лампи Т12, Т8, нажежаеми лампи, компактни луминесцентни лампи, живачни лампи високо налягане)		Ново енергийно-ефективно осветление (луминесцентни лампи Т5, компактни луминесцентни лампи, металхалогенни лампи)		Постигната икономия на мощност, [kW]
	Брой осветители	Инсталирана мощност, [kW]	Брой осветители	Инсталирана мощност, [kW]	
Учебен корпус № 1	1296	222,80	1426	76,84	145,96

Таблица 4 – продължение

Сграда	Съществуващо осветление (луминесцентни лампи Т12, Т8, нажежаеми лампи, компактни луминесцентни лампи, живачни лампи високо налягане)		Ново енергийно-ефективно осветление (луминесцентни лампи Т5, компактни луминесцентни лампи, металхалогенни лампи)		Постигната икономия на мощност, [kW]
	Брой осветители	Инсталирана мощност, [kW]	Брой осветители	Инсталирана мощност, [kW]	
Учебен корпус № 2	790	102,10	557	32,31	69,79
Учебен корпус № 2[a]	248	21,70	248	13,20	8,50
Учебен корпус № 3	582	52,60	490	25,09	27,54
Учебен корпус № 5	530	115,96	373	30,61	85,35
Учебен корпус № 6	1956	131,94	1837	64,51	70,43
Общо	5402	647,1	4931	242,56	407,57



Фиг.2. Сравнителни резултати на брой осветителни тела

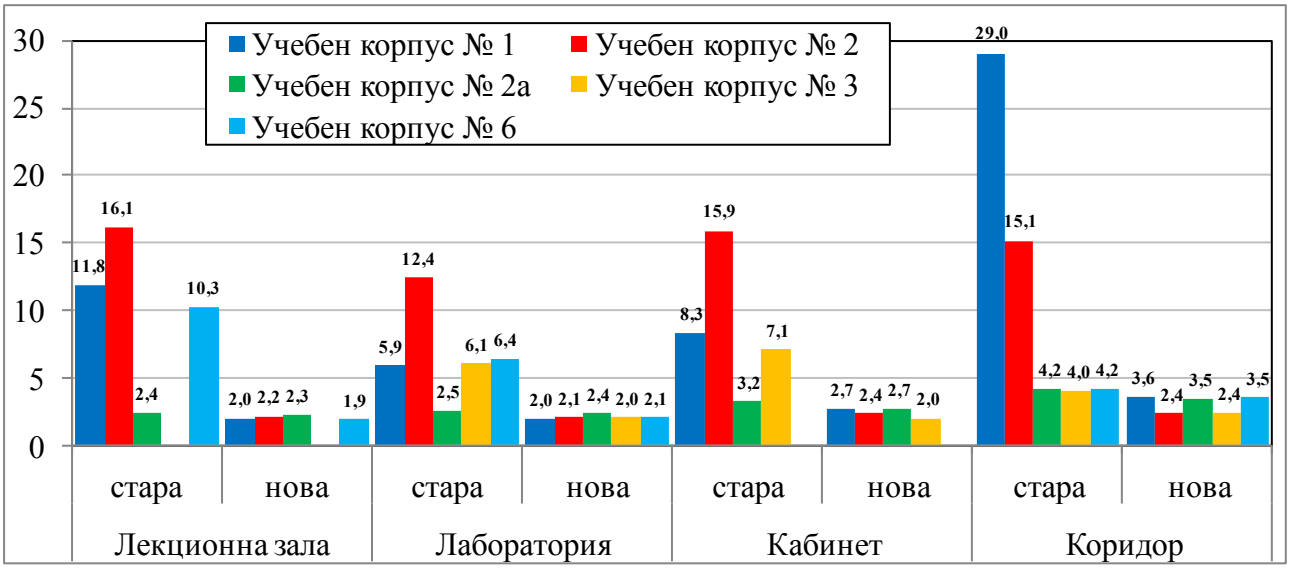


Фиг.3. Сравнителни резултати на инсталираната мощност за осветление и постигната икономия

В табл.5 и на фиг.4 са представени изчислените резултати със специализиран софтуер на показателя за енергийна ефективност [W/(m^2.100lx)].

Табл.5

Сграда	Показател за енергийна ефективност на осветлението W/(m^2.100lx)							
	Лекционна зала		Лаборатория		Кабинет		Коридор	
	Състояние на осветителната уредба							
	стара	нова	стара	нова	стара	нова	стара	нова
Учебен корпус № 1	11,81	2,01	5,89	2,00	8,34	2,73	29,00	3,58
Учебен корпус № 2	16,08	2,16	12,39	2,08	15,86	2,36	15,14	2,36
Учебен корпус № 2[a]	2,40	2,25	2,54	2,35	3,23	2,72	4,18	3,45
Учебен корпус № 3	-	-	6,05	2,03	7,06	2,02	4,01	2,39
Учебен корпус № 6	10,25	1,90	6,36	2,07	-	-	4,20	3,53



Фиг.4. Показател за енергийна ефективност на осветлението W/(m^2.100 lx)

4. Заключение

След модернизацията и реализация на мерките за енергийна ефективност, инсталираната мощност за осветление в ТУ-Габрово намалява от 647,1 kW на 242,56 kW, т.е. 2,67 пъти.

Оценката за енергийната ефективност на съществуващите и предложените нови осветителни уредби в учебните корпуси се извършва по утвърдена европейска методика EN 15193:2009, “Energy performance of buildings - Energy requirements for Lighting” [2]. Резултатите от табл.5 и фиг.4 показват неблагоприятното съотношение на стойностите на показателя за енергийна ефективност W/(m^2.100lx)

за съществуващото („старо“) и предложеното модернизирано („ново“) състояние на осветителните уредби.
При съществуващите стари осветителни уредби (корпус 1, корпус 5 и корпус 6) този показател в съответствие с реализираната съществуваща осветеност има стойност в диапазона (6 ÷ 18) W/(m^2.100lx), а при новите и реконструираните (корпус 3, корпус 2а) – в диапазона (4 ÷ 7) W/(m^2.100lx), което е от 2 до 9 пъти над предписанията [2] и добрите практики за осветление на учебни сгради в други страни. В учебните сгради в Германия за реализация на енергийно-ефективно осветление се препоръчва 2 W/(m^2.100lx) [6]. Тази стойност се постига при нас в предложените в доклада проектни решения със съвременни осветителни тела и светлинни източници. Реализацията на тези решения е предпоставка за енергийно-ефективна модернизация на осветлението в Технически университет – Габрово.

Литература

[1] БДС EN 12464-1:2011, ***Светлина и осветление. Осветление на работни места. Част 1: Работни места на закрито.***
[2] EN 15193:2009, ***Energy performance of buildings - Energy requirements for Lighting***.
[3] CIE TC 3-31, ***Lighting design methods for obstructed interiors***.
[4] Petrinska I., A Pachamanov., ***Energy Efficiency Classification of Lighting Systems in Public Buildings***, ICEST'2009, May 25-27 2009, Veliko Tarnovo.
[5] Directive 2002/91/IEC, December 2002, ***On the energy performance of buildings***, Official Journal of the European Communities 4 January 2003.
[6] Bretzke A., ***Best practice for lighting in Frankfurt schools also standard in the directive with 2 W/(m2.100 lx)***, Frankfurt am Main, Germany.
[7] Научно-изследователска и калибровъчна лаборатория по Осветителна техника при ТУ-София, ***Протоколи от изпитване***, 2012.
[8] http://www.dial.de – ***software DIALux 4.10***.

Автори: Стойо Платиканов, доц. д-р инж., катедра "Електроснабдяване и електрообзавеждане" (ЕСЕО), Технически Университет-Габрово, E-mail address: *stoyoplatikanov@gmail.com*; Пламен Цанков, гл. ас. д-р инж., катедра ЕСЕО, ТУ-Габрово, E-mail address: *plamentsankov@gmail.com*; Николай Бърдарскир инж., фирма за електроматериали "Елком" ООД; Дешка Маркова, доц. д-р инж., катедра ЕСЕО, ТУ-Габрово, E-mail address: *dmmarkova@abv.bg*; Милко Йовчев, ас. инж., катедра ЕСЕО, ТУ-Габрово, E-mail address: *milkoyovchev1986@gmail.com*; Петър Цвятков, инж., катедра ЕСЕО, Технически Университет-Габрово, E-mail address: *pzwyatkov@tugab.bg*; Емил Станев, ас. инж., катедра ЕСЕО, ТУ-Габрово, E-mail address: *emostanev@yahoo.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** гл. ас. д-р К. Николова

КОНЦЕПЦИИ И ЦЕЛИ НА УПРАВЛЕНИЕ НА ПОТРЕБЛЕНИЕТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Теодора Терентева, Мария Кънева, Димо Стоилов

Резюме: *В доклада се разглеждат въпроси свързани с управлението на ЕЕС и ефективността при използване на електрическата енергия. Разгледани са концепциите и целите за постигане на намаляване на разходите за ЕЕС и за потребителите, за съхраняване на природните ресурси и висока енергийна ефективност. Представят се различните методи на Управление на потреблението* (*УП*)*, популярни като DSM* (*Demand Side Management*)*, които може да бъдат реализирани чрез технико-икономически подходи, в съчетание с изграждане и използване на интелигентни мрежи.*

Ключови думи*: управление на потреблението, разходи на потребителите, изравняване на товаров график*

THE CONCEPTS AND AIMS OF DEMAND SIDE MANAGEMENT OF ELECTRIC POWER

Teodora Terenteva, Maria Kaneva, Dimo Stoilov

Abstract*: In the paper are treated the concepts and aims of Demand Side Management* (*DSM*) *and it relationship to energy efficiency, cost for electric power users and its reduction as well as preservation of natural resources. Different methods of DSM and their usage in smart grids are presented.*
Keywords: *Demand Side Management* (*DSM*)*, cost for electric power system, cost for electric power users*

1. Въведение

За да получи дългосрочни бизнес ползи от инвестициите си в енергийна ефективност, една организация трябва да направи повече от това да въведе технически промени. Постоянното подобрение изисква наличието на план за стратегически енергиен мениджмънт, който да е създаден спрямо специфичните условия за дадената организация и да задава ясни цели за постигане на енергийна ефективност. Приетата през 1991 година енергийна харта дефинира ясно целите на електроенергийните системи, а именно:

- Да се гарантира надеждността на доставките на електроенергия;
- Да се оптимизират енергийните разходи;
- Да се намалят до минимум цените на електроенергията за потребителите;
- Да се спазват екологичните изисквания.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

С използването на техниката за управление на потреблението, като част от изграждането на интелигентните мрежи, могат да бъдат постигнати повечето от поставените цели [1].

2. Ролята на управление на потреблението

За постигане на високо ниво на надеждност и сигурност в електроенергийните системи, мрежата е проектирана за върхово, а не за средно натоварване. Този подход води до непълното използване на преносните способности на мрежите и преразход на природни ресурси. Освен това, повечето от енергоносителите, даващи възможност за бърза промяна в натоварването и използвани за покриване на върхови товари, като природен газ и нефтопродукти, са скъпи и имат големи въглеродни емисии.

За преодоляване на тези проблеми, са предложени различни подходи, които адаптират товаровите графици на потребителите към производствените възможности [2]. Те позволяват наличните производствени мощности да се използват по-ефективно. Обозначават се като управление на потреблението (УП) и целят да променят някои негови характеристики.

Една от възможностите при УП е директното контролиране на потреблението от страна на електрическите компании. При такова споразумение компанията дистанционно включва и изключва товари на потребители за определени периоди от денонощието. Успеваемостта на програмите за УП зависи основно от това колко голяма част от общия товар може да се включи към тях.

Диференцираното ценообразуване е другата алтернатива, при която клиента сам избягва да консумира много енергия в определени часове поради по-високата й цена отколкото в други.

Интелигентното ценообразуване трябва да осигурява подходящи стимули за отделните потребители да участват в програмите за управление на потреблението, например чрез редуциране на сметките за ток. Различните потребители използват по различен начин електрическата енергия. Често методите на УП допринасят за подобряване на енергийната ефективност.

Това има положително въздействие върху икономическото и енергийното развитие на всяка страна – намаляване на енергийните разходи за бизнеса и домакинствата, намаляване на зависимостта от внос, подобряване на конкурентоспособността на икономиката, сигурността на енергийните доставки и опазването на околната среда.

3. Концепции за приложение на управление на потреблението

Използването на енергията е различно в зависимост от нуждите на различните потребители (битови и промишлени). Процесът на производството и консумацията на електроенергия се извършва практически едновременно и енергията не може да се натрупва в големи количества, без значителни загуби при този процес. Във всеки момент има нужда от баланс на мощността на източниците на енергия и на потребителите. Всяка промяна в мощността на потребителите изисква промяна на електрическите мощности в централите. Разходите, свър-

зани с производство, трансформация, пренос и разпределение на електроенергията зависят до голяма степен от формата на товаровите графици.

Индикатор за по-ефективно производство на електроенергия е плътността на товаровия график на производителя. Следователно остава проблемът с регулирането и балансирането на товара, чрез различни методи, прилагани както общо за ЕЕС, така и при потребителите.

Най-често използваните начини за балансиране във върхови моменти и в такива с ниско натоварване са:

- Използване на помпено-акумулиращи водни централи;
- Използване на върхови ЕЦ (водни, газови);
- Включване на потребители – регулатори (специални или сезонни потребители, например помпа за напояване);
- Икономически стимули за потребителите с цел промяна на начина на потребление на електроенергия чрез въвеждане на подходящи тарифи и методи за управление на потреблението.

4. Методи за управление на потреблението на електроенергията

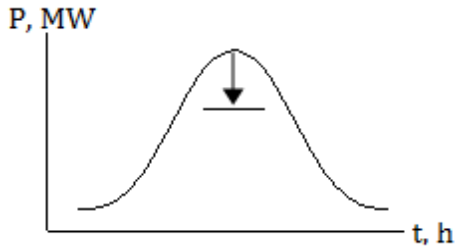
Коефициентът на плътност (коефициент на натоварване) е много важен показател за всяка енергийна система, за всеки потребител. Той се определя чрез израза:

$$к_п = P_{ср}/P_м \quad , \qquad (1)$$

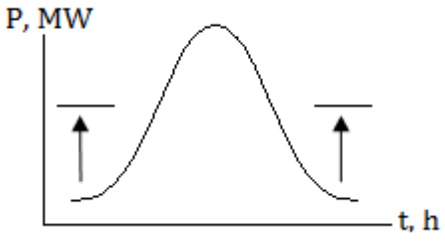
където $P_{ср}$ е средната мощност, а $P_м$ – максималната мощност. Този коефициент е по-малък от единица, т.е. електроцентралите работят под номиналната си мощност. В резултат на това количеството гориво за производство на 1 MWh от електроцентралата се увеличава, което означава, че работата не е ефективна. Целта е да се повиши стойността на този коефициент. Изглаждането на товаровите графици благоприятства работата на ЕЕС. За въздействие върху тяхната форма се използват следните методи:

Намаляване на върховото натоварване

Това е най-често срещаният метод за управление на потреблението. Илюстриран е на фиг.1, където условно е показана част от денонощна товарова диаграма.



Фиг.1



Фиг.2

Методът се основава на способността на електрическите компании да налагат директен контрол върху уредбите на потребителите. Основната идея е да се намери начин да се изключи част от електрооборудването, когато общото потребление е твърде високо.

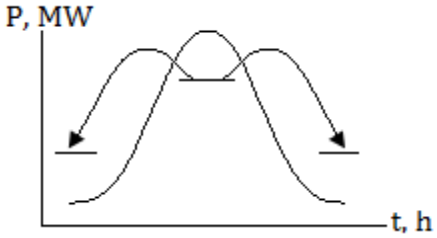
Запълване на минимумите

Това е широко използван метод на управление на потреблението. Идеята е да се увеличи потреблението на електроенергия в малко натоварените часове на товаровия график. Условна илюстрация е показана на фиг.2.

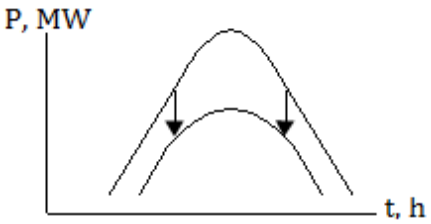
В случая електрическите компании насърчават използването на допълнителни електрически уреди, за да работят както в дневни, така и в сезонни периоди, когато има по-малка консумация на енергия. Това води до увеличаване на коефициента на плътност и намаляване на средната цена на електроенергията без да е необходимо повишаване на инсталираните производствени и преносни мощности.

Преместване на товари

Това е третият от традиционните методи за управление на потреблението на електроенергия. Той е предназначен за намаляване на върховите натоварвания чрез прехвърляне на част от върховата консумация в извънвърховите периоди. Например електроенергията необходима за подгряване на вода може да се използва в извънвърховите часове, а топлата вода да се съхрани за потребление през цялото денонощие. Реализацията на този метод става чрез използване на различни тарифни системи. Той е условно илюстриран на фиг.3.



Фиг.3



Фиг.4

Електрическите компании определят фиксирано максимално ниво на потребление и когато то е надвишено потребителят заплаща допълнително. Електрическите компании изпращат предупреждения, така че потребителят да може да реши дали да продължи да използва електроенергия или да отложи консумацията. Недостатък на този метод е, че всеки потребител трябва да планира потреблението си, в противен случай подлежи на санкции във вид на доплащане.

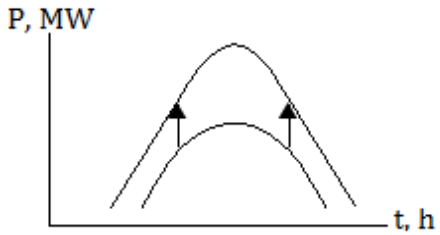
Стратегическо намаляване

Този метод се използва предимно от електрически системи с малки резервни мощности за производство или завишен излишък спрямо цената за произведена електроенергия. Методът е условно илюстриран на фиг.4.

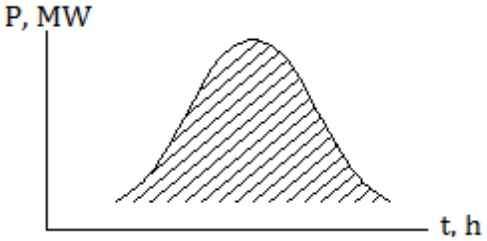
Чрез този метод, енергийните компании могат да променят не само продажбите, но и товаровата крива. Примерите за стратегическо намаляване (съхраняване) включват: изолация на сгради, енергоспестяващо осветление и стимули за подобряване на енергийната устойчивост.

Стратегически растеж на товара

Този метод се прилага от електрически компании, които имат достатъчно инсталирани мощности за производство на електроенергия. Те използват този метод за увеличаване на товара независимо от ежедневните или сезонните товари: растежът на потреблението се постига чрез разрастване на пазарния дял на електроенергията. Методът е условно илюстриран на фиг.5.



Фиг.5



Фиг.6

Гъвкаво разпределение на товара

Този метод се използва от енергийните компании, които се нуждаят от допълнителни мощности през най-натоварените часове. Условно е илюстриран на фиг.6. Той е подходящ най-вече при индустриални потребители, които са готови да приемат промени в качеството на електроснабдителната услуга в замяна на по-ниски цени на електроенергията.

Прилагането на методите е задача, която трябва да се разглежда и изпълнява така, че крайният резултат да е оптимално полезен и за потребителите и за ЕЕС/компанията. Различните методи или техни съчетания могат да се прилагат във всяка електроенергийна система. Изборът на подходящ метод зависи както от особеностите на генериращите източници в дадена ЕЕС, така и от характера на потреблението.

5. Потенциални ползи от по-активното управление на потреблението от самите потребители

Създателите на енергийната политика - регулаторите, операторите на ЕЕС, както и групи от потребители в много страни изразяват засилен интерес към подобряване на управляемостта на електрическия товар в системата, най-вече спрямо разходите за снабдяване с електроенергия. По-адаптивен характер на товара може да подобри ефективността на системата и да намали разходите на потребителите. Намаляване на потреблението в или близо до върха може да намали нуждата от скъпоструващи инвестиции в допълнителни генериращи мощности и изместваики потреблението във времето, когато натоварванията са по-ниски, да изравни товаровите графици, да подобри часовата използваемост в ЕЕС и да намали сумарните разходи за доставка на дадено количество електроенергия. Адаптирането в реално време на потреблението може да намали несигурността на доставките, привнесена от растящата инсталирана мощност на ВЕИ, да намали нуждата от нови мощности, както генериращи, така и преносни, за захранване на електро- и хибридните автомобили. По-адаптивно поведение на потребителите към цените може да смекчи влиянието на пазарната сила на пазара на едро за генериращите компании и да намали печалбата им от повишаване на цените.

Нарастващият интерес от ангажирането на потреблението е придружен от значителен напредък в развитието и разпространението на технологии, способни да реализират тази промяна. В САЩ, Великобритания и други страни се предвиждат значителни средства за влагане в измервателна инфраструктура (AMI - Advanced Metering Infrastructure), която регистрира консумацията на потребителя всеки час (или по-често) и осигурява двупосочна комуникация с електрос-

набдителната компания [3]. Тази апаратура осигурява интелигентен отговор на потребителя и технологии за управление, като например програмируем контролируем термостат и „смарт“ зареждане на електроавтомобилите. Очевидно не само големите, но и по-малки потребители – от търговски обекти и домакинства могат да бъдат включени в активното управление на електроенергийната им консумация и да се подпомогне тяхната отзивчивост към цената или други сигнали от страна на електрозахранването.

Новите технологии улесняват и малките потребители да участват в намаляването на товара при необходимост. За да се реализира обаче този потенциал към потребителя трябва да се изпрати прост сигнал и той да отговори подходящо на него.

6. Ползи от прилагането на методите за управление на потреблението

Въвеждането на методите за управление на потреблението в електроенергийната система на страната би довело до ползи за генериращите компании, за разпределителните дружества, за крайните потребители и за околната среда.

От гледна точка на електроразпределителните дружества и производителите, управлението на потреблението би довело до: намаляване на консумацията в пикови часове, увеличаване на придобитите данни и сведения за потребителите, подобряване на прогнозите за товаровите графици, повишена способност за интегриране на възобновяеми източници на енергия.

Чрез увеличаване на придобитите данни и сведения за потребителите, електроразпределителните дружества биха могли да изготвят прецизен товаров график за всяко едно домакинство по отделно, като по този начин те могат да осъществят точно предвиждане на консумацията на електрическа енергия. Благодарение на тези данни се осигурява ефективно използване на всички генериращи мощности в различните часови интервали. За да се осъществи събирането на такава информация при всеки един потребител следва да се инсталира устройство наречено „smart meter“ - интелигентен електромер.

Възможността за правилно и ефективно интегриране на ВЕИ до голяма степен зависи от познаването и правилното управление на консумацията в дадена електроенергийна система. Чрез въвеждането на методи за управление на потреблението електроразпределителните дружества могат да направят точен анализ за необходимостта и възможността за въвеждане на ВЕИ в енергийната система, както и от определяне на тяхната физическа локация и необходимата инсталирана мощност. Без използване на УП ползата от въвеждане на ВЕИ може да бъде силно компрометирана. Ползите за крайният потребител са основно свързани с повишена способност, възможност и мотивация да има по- ефективна консумация, спестяване на парични средства, възможност за преминаване към електрически транспорт, увеличаване на възможността за закупуване на енергия от „чисти” ресурси, както и бъдещото преминаване от въглеродна към „зелена” икономика. Ползите за крайния потребител са свързани с подобряване на качеството на живот в урбанизирана среда, както и с идеята за опазване на околната среда и пестене на природни ресурси.

7. Управлението на потреблението като част от интелигентна мрежа

Интелигентната (smart) мрежа е форма на стандартната електрическата мрежа, използваща цифрова технология за двупосочна комуникация между доставчиците и потребителите. Чрез прилагане на измерване, наблюдение и устройства за управление с двупосочна комуникация при производството, преноса, разпределението и потреблението, разумната мрежа прави възможно потребителите на системата, операторите и автоматичните устройства да реагират динамично на промените в състоянието на мрежата [4, 5]. В интелигентните мрежи са включени интелигентни системи за мониторинг, които следят движението на цялата електроенергия от производството й до нейното потребление. В тях има възможност за интегриране на отделните системи произвеждащи електроенергия от възобновяеми източници [6, 7].

Управлението на потреблението е важен компонент на всяка интелигентна мрежа, който дава решение за използване на енергията спрямо нуждите на потребителите с цел енергията да бъде използвана ефективно. УП често е свързано с пазара на електроенергия, така че потребителите да могат да променят естествения си начин на използване на енергията според цената, като по този начин пестят енергия, което пък съвпада с намерението за развитие на интелигентни мрежи. Развитието на УП има голямо значение за консумацията на енергия в интелигентна мрежа, за решаване на глобални проблеми свързани с околната среда и енергийната криза и за да гарантира стабилна и надеждна работа на електроенергийната индустрия.

Интелигентните мрежи ще свързват производителите и консуматорите. Те ще подпомогнат създаването на нови пазари за електроенергия, вариращи от системите за управление на енергията при крайните потребители до технологиите който биха позволили на потребителите както и на трети страни да отдават енергийни ресурси на пазара на електроенергия.

8. Заключение

В наши дни, електроенергията е основен фактор в човешкия живот, незаменим в бита и в промишлеността.

Управлението на потреблението на електроенергия включва действия за намаляване на производството на електроенергия в дадени моменти от товаровия график или повишаването й в други, използвайки техники за преразпределяне на консумацията в различни части от денонощието и прецизно управление на товаровия график, с цел да се подобри икономическата ефективност, запазвайки или подобрявайки качеството на услугите.

Посредством интелигентните мрежи и електромери при потребителя и с използването на методи на УП се предлагат оптимално полезни решения за управляване и спестяване на електрическа енергия.

Ефектите, които се постигат чрез прилагане на Управление на потреблението, са:

- Намаляване на нужните финансови средства за построяване на нови електроцентрали и нови електрически мрежи;
- Подобряване на ефективността на енергийните системи;
- Минимизиране на негативното влияние върху околната среда;
- Намаляване на цената на доставяната на клиентите енергия;
- Намаляване недостига на електроенергия;
- Подобряване на надеждността и качеството на електрозахранването.

Литература

[1] A. Faruqui, S. Sergici, and A. Sharif, "The Impact of Informational Feedback on Energy Consumption: A Survey of the Experimental Evidence," *Energy* 35 (2010): 1598-1608

[2] A. Faruqui and S. Sergici,"Household Response to Dynamic Pricing of Electricity: A Survey of 15 Pricing Experiments," Journal of Regulatory Economics, 38, no. 2 (2010): 193-225

[3] Federal Energy Regulatory Commission, *2010 Assessment of Demand Response and Advanced Metering Staff Report* (Washington, DC, 2011), 21.

[4] Association of Home Appliance Manufacturers, "Smart Grid White Paper: The Home Appliance Industry's Principles and Requirements for Achieving a Widely Accepted Smart Grid" (Washington, DC: Association of Home Appliance Manufacturers, 2009)

[5] Electric Power Research Institute, *Assessment of Residential Energy Management Systems for Demand Response Applications* (Palo Alto, CA, 2009)

[6] Electric Power Research Institute, *Residential Electricity Use Feedback: A Research Synthesis and Economic Framework* (Palo Alto, CA, 2009)

[7] K. Ehrhardt-Martinez, K. Donnelly, and J. Laitner, *Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities* (Washington, DC: American Council for an Energy-Efficient Economy, 2010)

Автори: инж. маг. Теодора Николаева Терентева, докторант, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *terenteva@tu-sofia.bg;* Мария Маринова Кънева-Цочева, доцент д-р, катедра "Електроенергетика", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *mkaneva@tu-sofia.bg;* Димо Георгиев Стоилов, доцент д-р, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р Светлана Цветкова

АДАПТИВНА КОМПЕНСАЦИЯ НА СМУЩЕНИЯ В ЕНЕРГИЙНА СИСТЕМА С ОГРАНИЧЕНА МОЩНОСТ

Теофана Пулева

Резюме: *В статията се предлага алгоритъм за адаптивно оценяване на смущение по товар. Получената оценка се използва като компенсационен член в закона на управление, реализиран като PI регулатор в пространство на състоянията при вторичното регулиране на честотата на електроенергийна система (ЕЕС). Параметрите на наблюдателя и регулатора са определени чрез синтез по зададени полюси. Проведени са симулационни изследвания при различни модели на смущенията с цел да се изследват предимствата на предложената система за управление, работеща в условия на променлив товар и генерирана мощност.*

Ключови думи: *електроенергийна система, компенсация на смущение, адаптивен наблюдател, PI регулатор в пространство на състоянията*

ADAPTIVE DISTURBANCE REJECTION IN POWER LIMITED ENERGY SYSTEM

Teofana Puleva

Abstract: *In this paper an adaptive observer for load disturbance estimation is proposed. The adaptive observer feature consists in the accurately estimation of the disturbance steady state value. This estimate is used to obtain the compensation term of the state space PI secondary frequency control law. The observer and controller parameters are determined by pole placement technique. The simulation experiments with different disturbance models are carried out in order to examine the advantages of the proposed control system operating under stochastic load and power variations.*

Keywords: *Energy system, disturbance rejection, adaptive observer, integral state space control*

1. Introduction

The increased power from the renewable energy sources (RES) as a part of electric power system (EPS) involves the impact analysis of this energy source stochastic nature on the active power balance. Larger the percentage part of RES in the EPS is, greater this influence is. The random variation of wind and solar energy potential makes difficult to forecast and to keep the balance between power production and load, and therefore the forecasting and control processes of normal operation of EPS. This imposes the increase of spinning reserves and complicates the control systems

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

for the EPS normal operation. In [1, 2] a new approach for wind power plants integration into automatic control of electric power system is investigated. It ensures a grid-friendly response to variations in wind speed and consequently in generated power from the wind. Different wind turbine power control strategies for frequency primary control are explored. They provide an effective support of power balancing and frequency control functions [2]. The existence of two stochastic processes in EPS (load and RES power variation) involves special requirements to the generating units that operate in the frequency secondary control. They have to cover the unpredictable variations both in load and power generated from the RES. The hydraulic turbine generating systems which are usually considered as dynamic components of the EPS may be effectively used in the frequency secondary. Their turbine governors have to ensure fast response in case of load disturbances. The main task of the turbine governing system is to provide the stability and performance in the secondary frequency control of the EPS under wide range of variable conditions related to the load variation and power generated by RES. Hence *improved control algorithms* have to be examined such as robust [3], adaptive [4] and predictive control.
In this paper an adaptive observer for load disturbance estimation is proposed. The adaptive observer feature consists in the accurately estimation of the disturbance steady state value. This estimate is used to obtain the compensation term of the state space PI secondary frequency control law. The observer and controller parameters are determined by pole placement technique. The simulation experiments with different disturbance models are carried out in order to examine the effectiveness of the proposed control algorithm.

2. Model of joint operation of RES and power limited energy system

The random variation of wind energy potential makes difficult to keep the balance between power production and load, and therefore to control process of normal operation of EPS. The wind energy utilization in some countries comprises the wind turbines integration in the frequency-power control system, which is a significant step to wind turbine participation in operation control of the EPS. The wind plants should be treated as an integral part of the electric system. Currently the wind turbine and wind farm control systems are equipped with several new features supporting the grid integration of wind power. The wind turbines have active and reactive power set-points available for external control. These set-points are used by wind farm controllers to support the power balancing and frequency control functions in the power system. Such an approach is realized in Denmark for the wind farm “Horns Rev” [1]. The wind farm power control strategy enables to support the active power balance of the EPS and therefore to avoid the short-term power decrease of conventional plants.
On the Fig.1 the block-diagram of joint operation of RES and equivalent power limited energy system in the presence of static and dynamic load and load disturbance is presented [5]. The change the balance between the active power produced by the units and the active load causes a frequency deviation about its nominal value of 50 Hz. It is necessary to produce an appropriate control signal to the turbines gate to change their power output in accordance with the principles of the primary and secondary frequency control. This action will restore the system frequency to its nominal value.

The model of the equivalent power system can be presented by first order delay element [5]:

$$W_{es}(s) = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1/k_{es}}{T_{es}s + 1}, \quad (1)$$

where Δf and ΔP are the frequency and power error respectively. The parameters in this model are k_{es} – power-frequency factor of the equivalent power system and T_{es} is the power system time constant. The load variation and the power generated from RES can be represented as an equivalent disturbance. The increase of RES power can be treated as decrease of active load, and vice versa. The equivalent turbine-generating unit that operates in secondary frequency control loop can be represented by first order delay element with parameters k_g and T_g.

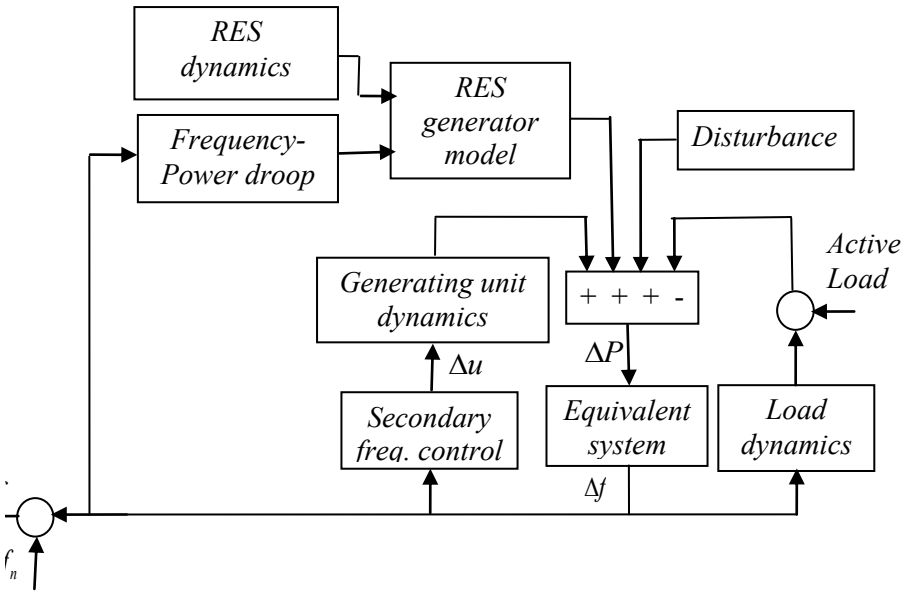
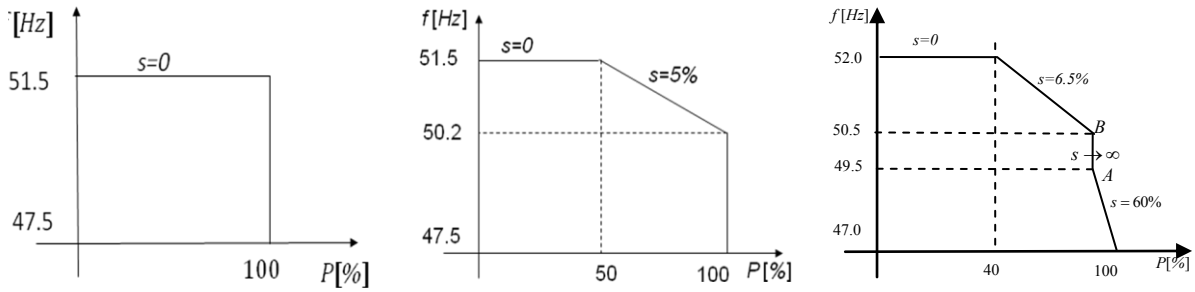


Figure 1. Model of equivalent power limited energy system

One of the possible operation strategy of the wind power plants requires to extract the maximal available energy from the wind. The frequency – power droop characteristic of this control strategy is represented in Fig.2.a. At frequencies beyond the admissible frequency range the wind turbine is disconnected from the grid. Under this control strategy the wind turbine generates the maximal available power, but doesn't support the EPS power balancing and therefore the restoration of the frequency on its nominal value.



(a) maximum power extraction strategy (b) E.on grid code requirements (c) WPS grid code

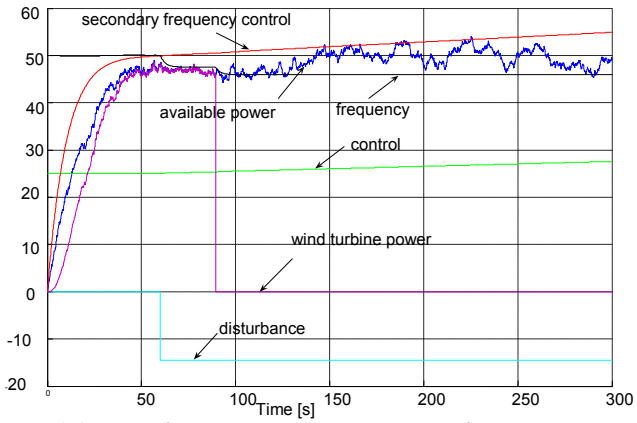
Figure 2. Frequency- power characteristics

Another approach is to implement the wind turbine control strategy associated with the E. on grid code 2006 requirements (Fig.2.b). According to the 2006 E. on grid code, wind turbines remain connected to the grid within a frequency range from 47.5 Hz to 51.5 Hz. Beyond these limits, separation without any time delay is required. At frequencies within the range $[47.5, 50.2]$, the wind turbine power output equals to the whole available power P_m depending on the current wind velocity. At frequencies within the range $[50.2, 51.5]$, the wind turbine power output is determined from the relationship

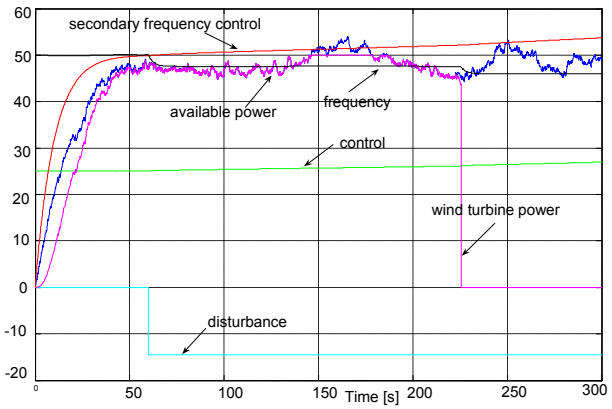
$$\Delta P = \frac{20P_m(50.2 - f)}{50} = 0.4P_m(50.2 - f). \quad (2)$$

According to the WPS grid code in USA (Fig.2.c), wind turbines remain connected to the grid within a frequency range from 47.0 Hz to 52.0 Hz. If the electric power system frequency is lower than 49.5 Hz (*point* A), the wind turbine active power increases depending on the frequency – power droop factor. Similarly if the electric power system frequency is higher than 50.5 Hz (*point* B), the wind turbine active power decreases in accordance with the frequency-power characteristics. At frequencies within the range [49.5, 50.5] the wind turbine power output equals to 95% P.

Simulation experiments for the dynamical model of power limited energy system are carried out. The equivalent system power is $P_{es} = 6000MW$, 1000 MW from which is wind turbine generating power. The power-frequency factor of the equivalent energy system is $k_{es} \approx 0.1P_{es} = 600\,[\mathrm{MW/Hz}]$, and its time constant is $T_{es} = 2.5\,s$. The secondary power-frequency control in the EPS is accomplished by a conventional PI controller with $k_p = 0.06$ and $T_i = 24\,s$. The power control range of the conventional power generating units that participate in the frequency secondary control is 200MW. They are presented as a first order delay element. The closed loop wind generator dynamics with respect to the frequency deviation as an input signal and the active power as an output are presented by a second order delay element. The system performance under different wind turbine "control strategies" and load disturbances is investigated.

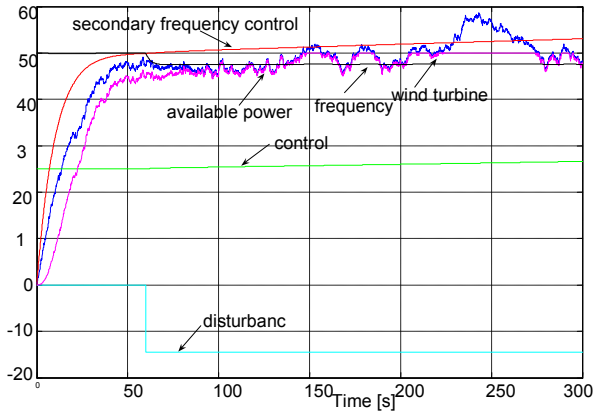


(a) maximum power extraction strategy



(b) E.on grid code requirements

Figure3. Frequency control in power limited energy system under load disturbance (load increase)



(c) WPS grid code

Figure3. Frequency control in power limited energy system under load disturbance (load increase)

In Fig.3 the system behavior in the case of sudden load increase (generating unit active power decrease) at t=60s is shown. The wind turbine generating unit operating in accordance with the maximum power extraction strategy is disconnected from the grid at t=90 s; because of the frequency deviation beyond the admissible range of [47.5, 51.5] Hz. Under this control strategy the wind turbine generates the maximal available power, but doesn't support the EPS power balancing and therefore the restoration of the frequency on its nominal value. On the other hand the conventional generating units have not a sufficient power control range in order to compensate the load disturbance. The wind turbine generating unit operating in accordance with E.on grid 2006 (Fig.3.b) is disconnected from the grid at t=220 s because of the insufficient power control range of the conventional power control generating units, as well as insufficient wind generator active power range available from the wind. The wind turbine generators operating in accordance with WPS grid code remain connected to the grid (Fig.3.c) and support the EPS power balancing and therefore the restoration of the frequency on its nominal value. Analogous experiments can be carried out in the case of sudden load decrease (generating unit active power increase).

3. Adaptive load disturbance rejection

The existence of two stochastic processes in EPS (load and RES power variation) involves special requirements to the generating units that operate in the frequency secondary control. Their turbine governors have to ensure fast response in case of load disturbances. The main task of the turbine governing system is to provide the stability and performance in the secondary frequency control of the EPS under wide range of variable conditions related to the load variation and power generated by RES. Hence *improved control algorithms* have to be examined. A simplified plant model from Fig.1 consisting of the generating units which operate in a frequency secondary control and equivalent power system model is shown in Fig.4. It should be noticed that the signals are represented by where deviations about the operating point - Δw is an equivalent disturbance from variable load or generated power from RES, Δu - the control signal, and Δf - the frequency deviation about its nominal value.

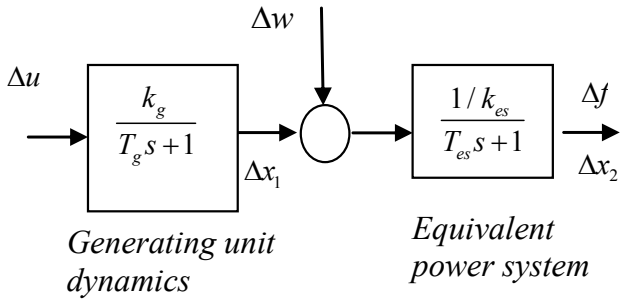


Figure 4. Plant model with equivalent disturbance

The plant state space description is

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Jw \\ y &= Cx \end{aligned}, \quad (3)$$

where $x = [\Delta x_1 \quad \Delta x_2]$ and $y = \Delta f$, $\tilde{w} = J\Delta w$. The matrices in the state-space description are:

$$A = \begin{bmatrix} -1/T_g & 0 \\ 1/(k_{es}T_{es}) & -1/T_{es} \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} k_g/T_g \\ 0 \end{bmatrix},\ C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix},\ J = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/(k_{es}T_{es}) \end{bmatrix} \ldots.(4)$$

A state space PI controller for frequency secondary control and disturbance rejection is designed. The augmented system description with an extra integral state is [6]

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u + \bar{\Gamma}r + \bar{J}\Delta w \\ y &= \bar{C}\bar{x} \end{aligned}, \quad (5)$$

where $\bar{x} = [x_i^T \quad x^T]^T$ is the state vector. The matrices from (5) have the form

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & -C \\ O_{(2x1)} & A \end{bmatrix},\ \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix},\ \bar{C} = \begin{bmatrix} 0 & C \end{bmatrix},\ \bar{J} = \begin{bmatrix} 0 \\ J \end{bmatrix},\ \bar{\Gamma} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0_{2\times 1} \end{bmatrix},\ \bar{D} = O_{(3x1)}. \quad (6)$$

The control signal is given by

$$u = -\bar{K}\,\bar{x} - K_{comp}\Delta\hat{w}, \quad (7)$$

where the state feedback gain matrix $\bar{K} = [-K_i \quad K]$, K_i is the integral term gain, K - the proportional term gain and K_{comp} is the compensation term which is used to compensate the disturbance Δw. Since the disturbance Δw can't be measured its estimate $\Delta\hat{w}$ in the control low should be used. To obtain the PI state space controller parameters the poles placement technique is used.

In Fig.5 the structure scheme of the control system is shown. It comprises state space PI controller and a compensation term that depends on the disturbance estimate.

The general equation of the adaptive observer can be expressed as [7]

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) + L_w\int_0^t (y_1 - C_1\hat{x})dt, \quad (8)$$

where C_1 is diagonal matrix all elements of which are zero excepted in these rows where the disturbance acts on the system state. In this case the corresponding element is one. The observer matrices L and L_w are vector-column and diagonal matrix respectively.

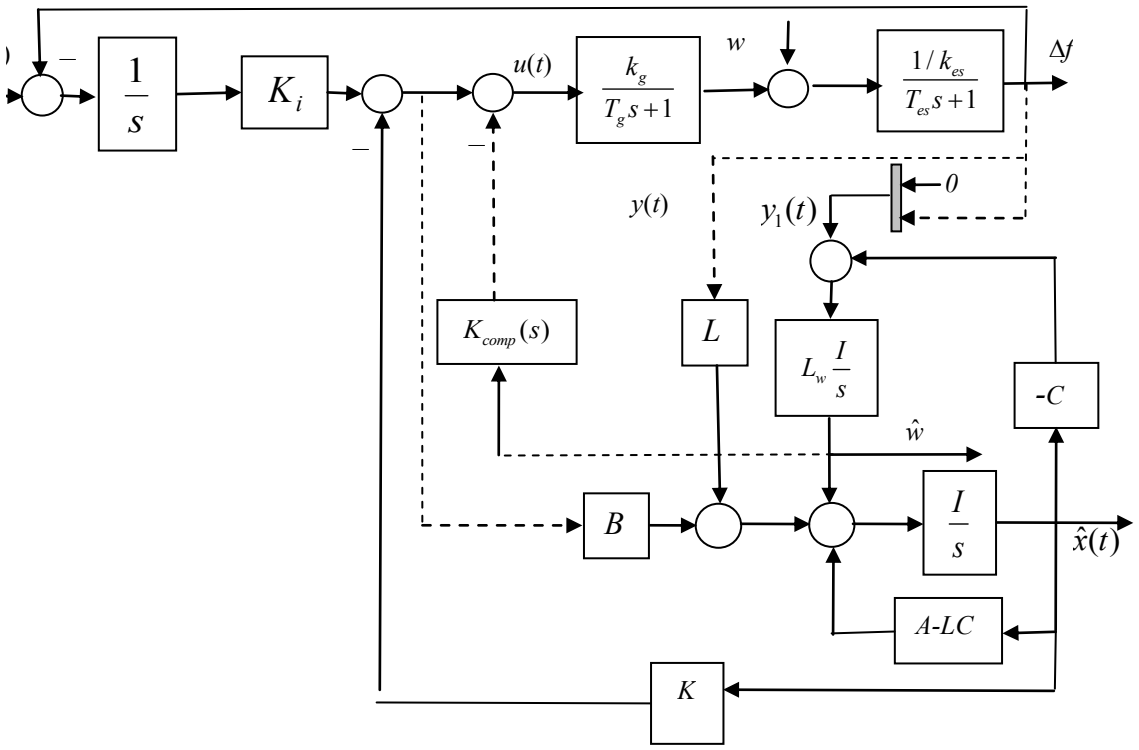


Figure 5. Structure scheme of the control system

The matrix L_w is similar to C_1, but contains elements that should be obtained by using pole placement design technique. The observer error can be expressed as:

$$\dot{e} = (A - LC)e - L_w C_1 \int_0^t e dt - w. \quad (9)$$

If the disturbance $w = const$. Eq. (9) can be represented in the form

$$\ddot{e} = (A - LC)\dot{e} - L_w C_1 e. \quad (10)$$

The observer matrices are determined from the condition

$$\det[s^2 I_2 - (A - LC)s + L_w C_1] = H_d(s), \quad (11)$$

where $H_d(s) = s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3$ is the desired observer characteristic polynomial, I_2 - identity matrix. Solving the Eq. (11) the following expressions for the observer parameters are obtained

$$L_2 = a_1 - \frac{1}{T_{es}} - \frac{1}{T_g},\ L_w = a_3 T_g,\quad L_1 = k_{es} T_{es}\left[a_2 - L_w - \left(\frac{1}{T_{es}} + L_2\right)/T_g\right]. \quad (12)$$

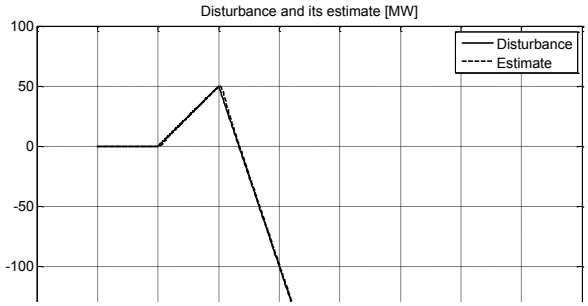


Figure 6. Linear varying disturbance and its estimate

Figure 7. Frequency deviation

Figure 8. Control signal

In Fig.6 a linear varying disturbance in the range of [-150, 50] MW has appeared at $t = 300\,s$. It can be noticed the estimate tracks the disturbance signal very well. In Fig.7 and Fig.8 the frequency deviation and the control signal are shown, which confirm the good control system performance – the frequency deviation is about $\pm 40 MHz$ in the case of improved control algorithm with a compensation term, and in the interval $[-0.6, 0.2]\,Hz$ without a compensation term. The control signal satisfies the technological requirements.

In Fig.9 a random disturbance in the range of $\pm 30 MW$ has appeared at $t = 300\,s$. It can be seen the estimate tracks the disturbance signal with high accuracy. The mean square error of the output is $J_1 = 2.6.10^{-3}$ (without a compensation term), and $J_1 = 1.95.10^{-4}$ (with a compensation term) hence it decreases significantly.

In Fig.10 a frequency deviation about its nominal value is shown. It can be noticed that the frequency deviation is about $\pm 30\,mHz$ in the case of improved control algorithm with a compensation term based on adaptive disturbance rejection, and $\pm 150\,mHz$ without a compensation term.

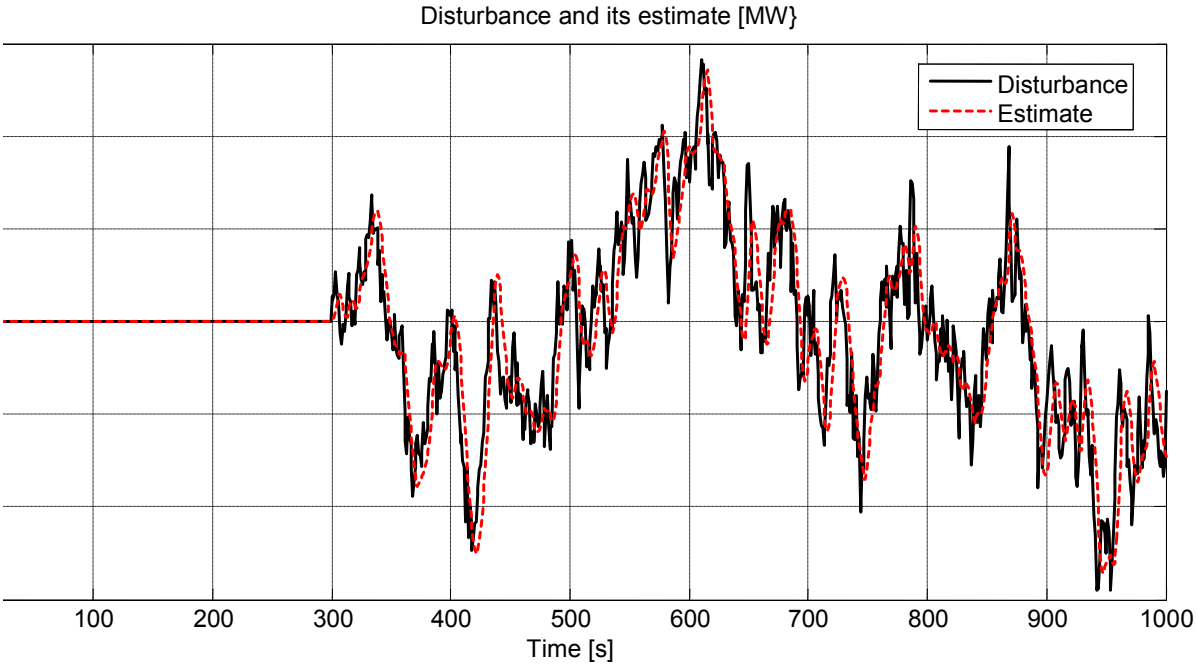


Figure 9. Disturbance and its estimate

(a) without a compensation term (b) with a compensation term

Figure 10. Frequency deviation

These results confirm the effectiveness of the proposed control algorithm that ensures a small frequency deviation about its nominal value.

In memoriam of Prof. DSc. Lazar Petkanchin who had inspired research activities in this area and had been my tutor.

Acknowledgement

The author would like to acknowledge the Ministry of Education and Science Fund of Bulgaria, Research Project No: DDVU 02/80.

References

[1] DeMeo, E, *Wind Plant Integration*, Power & Energy, Vol. 3, No 6, pp. 91-96, 2005.

[2] Petkanchin, L., *Static characteristics frequency-active power for primary control of wind power plants*, Energetika, No 3, pp. 31-35, 2009, (in Bulgarian).

[3] Jiang, J., *Design and optimal robust governor for hydraulic turbine generating units*, IEEE Trans. on AC, Vol. 10, No. 1, pp.188-194.

[4] Orelind, G., et al., *Optimal PID gain schedule for hydro generators - decision and application*, IEEE Trans. On AC, Vol. 4, No.3, 1989, pp. 300-307.

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

[6] Ogata, K., *Designing Linear Control Systems with Matlab*, Prentice Hall Int., Inc., 1994.

[7] Kuzovkov, N., *Modal control and observers*, Mashinostroene, Moscow, 1976, (in Russian)

Author: Teofana Puleva, Associate professor, PhD; Department of Systems and Control Engineering, Faculty of Automatics, Technical University of Sofia, E-mail address: *tpuleva@tu-sofia.bg*

Received 02 September 2013 **Reviewer**: Associate professor, PhD Angel Tzolov

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ ПРИ АВАРИЙНИ РЕЖИМИ В ТЯГОВИТЕ ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАЩИ ВЕРИГИ НА „МЕТРОПОЛИТЕН“ ЕАД

Тодор Лалев

Резюме: *В работата е представена методика за изчисляване на преходни процеси на базата на създаден математически модел на тяговата електрозахранваща мрежа на софийския метрополитен. Направена е оценка на приложимостта на методиката при изследване на преходни процеси и аварийни режими симулирани на pspice. Чрез софтуерни симулации с помощта на pspice са изследвани характерни аварийни режими в тяговата мрежа. Направен е сравнителен анализ между реални аварийни режими и симулирани такива.*
Ключови думи*: метрополитен, тягова мрежа, тяговопонизителна станция.*

STUDY THE TRANSIENT PROCESSES AT FAILURE MODES OF TRACTION POWER SUPPLY OF „METROPOLITAN“ JSC

Todor Lalev

Adstract: *A mathematical model forcalculating transient processes of the traction power supplyis present in the current paper. Appraisal ofapplicability of the presented mathematical model is presented and proven via PSpice. Analysis between real breakdown and simulationbreakdown are made in the current paper.*
Key words: *subway, tractionpowersupply, tractionpowerstation*

1. Увод

Преходните процеси са свързани с преминаването на електрическата верига от един установен режим в друг. Характерът на изменение на преходните токове и напрежения се определя както от източниците на енергия (вида на действащите входни сигнали), така и от структурата на веригата, стойността на параметрите и първоначалните енергийни запаси в бобините и кондензаторите. Задачата за анализ на преходните процеси се състои най-общо в определяне на моментните стойности на токовете и напреженията в различните клонове на веригата за процеса след комутацията.

В теоретичната електротехника, при изследване на преходните процеси се разглеждат различни по характер вериги, захранени от източници на постоянно или променливо напрежение. Дава се общото решение на поставената задача, включващо намиране корените на характеристичното уравнение, определяне вида на търсената величина в зависимост от корените, а също така и начина на изчисление на интеграционните константи. В практиката изследваните електрически

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

вериги са по-сложни. Те се състоят от голям брой възли и клонове, съдържащи активни и реактивни елементи.
В доклада е предложена методика за изчисление на преходните процеси при къси съединения в тяговата електрозахранваща система (ТЕС) за постоянен ток в Софийското метро. Методиката е разработена на базата на математическо моделиране и използване на подходящи програмни продукти и изследва основните параметри на преходните режими типични за тяговата електрозахранваща система на метрополитена.
Случайния характер на графика на движение на метровлаковете, динамично променящият се тягов товар и свързаната с това, както и с други фактори, изменение на захранващото напрежение води до това, че големината на тока в тяговата мрежа е случайна величина. От горенаписаното следва, че параметрите в тяговата мрежа се явяват вероятност от сложна математическа функция, чието точно разпознаване (решение) завишава изискванията по отношение на моделиране на процесите в ТЕС.
В реалното моделиране на ТЕС максималното токово натоварване се определя по предварително зададена заместваща схема, която се приема за разчетна. Вземат се предвид броя на съставите в изчислителния участък, на базата, на което се определя средна стойност на тока в дадената зона. В случаите когато моделирането се прави за една характерна подстанционна зона определящо е токовото натоварване на съставите, които се намират в нея. Съвпадение на два или повече състава в една подстанционна зона, захранвана от две ТПС е малко вероятно и не се разглежда.
Създадения модел дава възможности за разширено аналитично изследване на преходните процеси развиващи се в ТЕС. Направен е сравнителен анализ на получените резултати от аналитичното изследване с тези снети от реалните измервания при аварийни режими. На базата на това е определена истинността на създадения модел и възможността и за адекватен анализ на сложните преходни процеси в ТЕС.

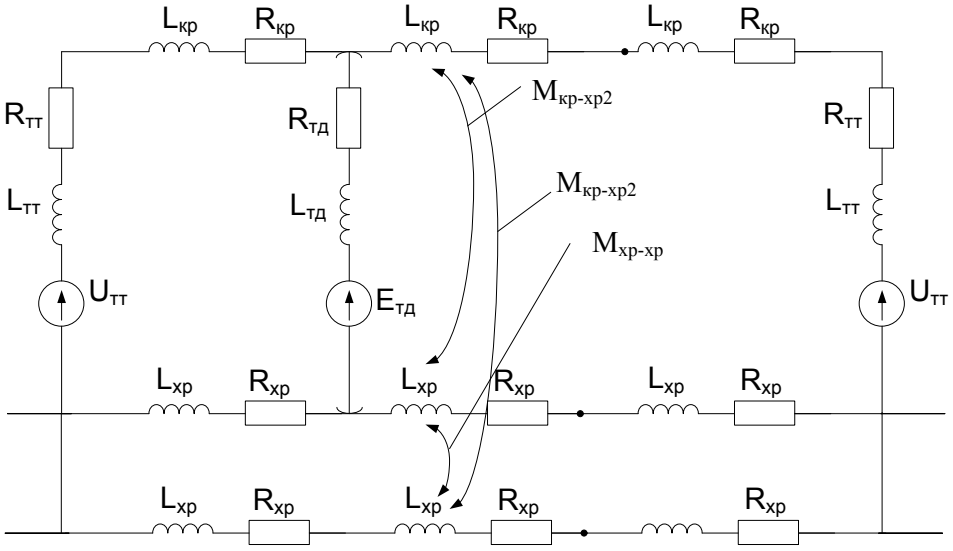
2. Създаване на модел за изчисляване на преходни процеси при къси съединения в ТЕС

За да се създаде адекватен модел на ТЕС на софийското метро е необходимо изграждащите елементи на ТЕС да бъдат представени посредством подходяща заместваща електрическа [1] схема. Елементите на модела се подбират така, че максимално точно да опишат процесите при изследване на преходните аварийни режими развиващи се в ТЕС.
Софийския метрополитен ТЕС е изградена от:

- Тяговопонизителна станция /ТПС/, изградена е от КРУ 10kV, тягови агрегати, РУ 825V;
- Тягова мрежа /ТМ/ , изградена е от захранващи кабели, контактна релса, ходова релса и обратни фидери.

ТПС е представена посредством тягов агрегат /Тягов трансформатор и изправител/ , във вид на източник на постоянно напрежение $U_{тт}$, активното $R_{тт}$ и индуктивното съпротивление $L_{тт}$.

Тяговата мрежа (контактна релса/Кр/ и ходова релса/Хр/)се разглежда като електрическа верига с разпределени параметри. Те представляват модел на крайни елементи, съставени от последователно свързани активни и индуктивни съпротивления, отговарящи на дължината на разглеждания участък от метротрасето. При нормална експлоатация ТЕС захранва един метросъстав, движещ се в един подстанционен участък. Предвид този факт е необходимо в заместващата схема на ТЕС да бъде симулиран и един метросъстав.
В разглеждания случай метросъставът (товарът) се представя във вид на електрическа верига, съдържаща еквивалентен източник на е.д.н., активно съпротивление индуктивност. На фиг.1 е показана разработената заместваща схема ТЕС.



Фиг.1. Заместваща схема на ТЕС

За да се симулират и изследват процесите по предложената заместваща схема на модела на ТЕС е необходимо да се изведат математическите зависимости за определяне на основните електрически параметри в отделните елементи на ТЕС, както и да се знаят стойностите на индуктивните и активните съпротивления.

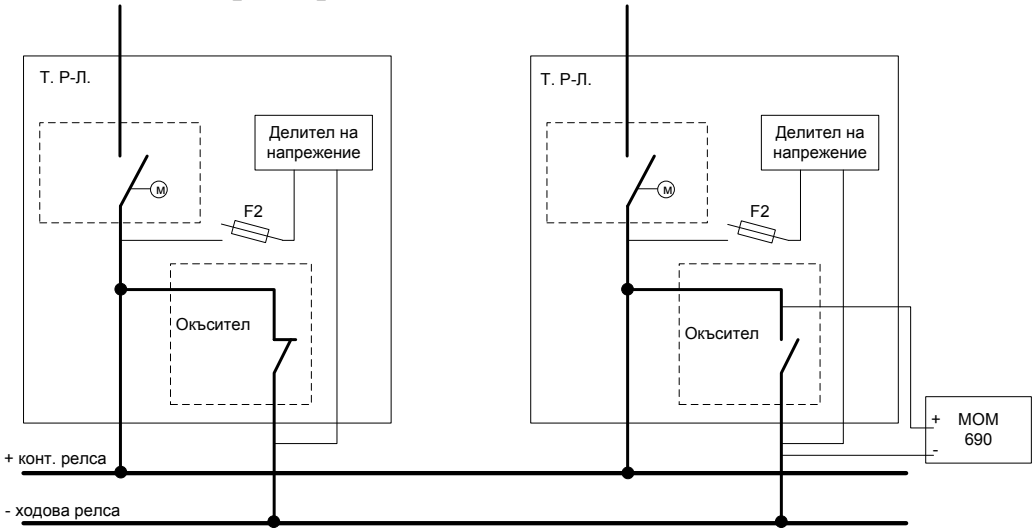
2.1. 2.1. Определяне на параметрите на тяговата мрежа

Тяговата мрежа е изградена от положителна тоководеща част +825 V, за която се използва масивна стоманена релса (контактна релса КР), разположена отстрани на ходовата релса (ХР), по която се движи метросъстава. КР е съединена чрез захранващи кабели, бързодействащ прекъсвач и тунелни разединители с шина РУ„+825 V” на „РУ 825 V” на ТПС. Контурът на ТМ включва и ХР, която се използва като минусова тоководеща част. Тя също е свързана посредством захранващи (минусови) кабели с шина „РУ -825 V ” на „РУ 825 V”. Минусовата верига се състои от непрекъсната по дължината си релсова верига, в която са включени: ХР, кабелни линии и междупътни връзки.
Активното съпротивление на тяговата мрежа е взето от паспортните данни на Кр и Хр като за сравнение същото експериментално е измерено и проверено за разгледаните участъци.
Стойностите на активните съпротивленията на Кр и Хр за 1km съгласно паспортните им данни са: $\mathbf{R_{к.р.} = 0{,}0182\ \Omega/km; R_{х.р.} = 0{,}0318\ \Omega/km.}$ Показаните данни са

за една ходова релса.

Предвид сложността на електрозахранващата схема на метрополитена и ограниченото време на безтокова пауза (липса на състави) активните съпротивления на КР и ХР са измерени при последователно им свързване и в окончателния модел се изчислява и използва еквивалентното съпротивление. Схемата на измерване е показана на фиг.2.

Поради ниското съпротивление на ходовата и контактната релса ($R_{к.р.}$= 0,0182 Ω/km; $R_{х.р.}$= 0,0318 Ω/km за една релса) измерването на контура ТМе направено със специализиран измервателен уред с подходящ обхват (в случая „МОМ 690" на фирмата Megger). Измереното активното съпротивление на тяговата мрежа в изследвания участък е Rтм=0,036 Ω/km, което напълно отговаря на даденото в паспортните данни на Кр и Хр.



Фиг.2. Схема за измерване на активното съпротивление на тяговата мрежа

Приема се, че тяговият ток в изследваната верига[1][2] се изменя по закона:

$$i = I_{\infty}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

където:

τ – време на изменение на тока

$$\tau = \mathrm{L}_{\text{тес}}/R_{\text{тес}}; \quad (2)$$

I_{∞}–установен ток на к.с. в ТЕС

$$I_{\infty} = U_{\text{тес}}/R_{\text{тес}}; \quad (3)$$

t – време за достигане на установения ток.

Собствената и взаимна индуктивност на елементите на тяговата мрежа $L_{Кр}$ и $M_{Хр}$ се определя от зависимостите [1][2]:

$$L = \left(2lnK\frac{10^4\sqrt{\tau}}{\sqrt{10\gamma_з}r_e}\right).10^{-4}, \text{ H} \quad (4)$$

$$\mathrm{M} = \left(2lnK\frac{10^4\sqrt{\tau}}{\sqrt{10\gamma_з}\mathrm{a}}\right).10^{-4}, \text{ H} \quad (5)$$

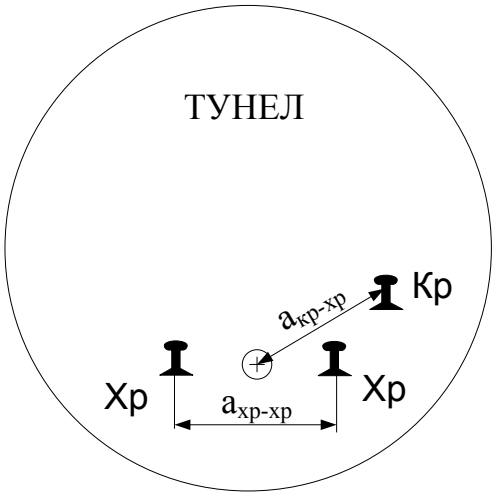
където: $\gamma_з$ - проводимост на земята по трасето, $\gamma_з$ =10^{-3} S/m; r_e - еквивалентен радиус на контактна и ходова релса, $r_{екр}$=0,0795, m ; $r_{ехр}$=0,111, m; a - разстояние между ходовите релси и контактна релса, определено по фиг.3; $a_{хр\text{-}хр}$=

1,44m; $a_{кр-хр}$= 1,52m; K - корекционен коефициент [1], K=0,318 за подземни участъци и K=0,448 за надземни участъци;

За да се определи $L_{Кр}$ и $L_{Хр}$ от (4) се вижда, че е необходимо да се знае τ. Предвид факта, че $L_{тм} \approx const$ за да се изчислят $L_{Кр}$ и $L_{Хр}$ се приема, че τ=0,1,s.

След решението на (4) за $L_{Кр}$ и $L_{Хр}$ се получават следните стойности: $L_{Кр}=2{,}42.10^{-3}$, H/km; $L_{Хр}=2{,}37.10^{-3}$, H/km.

По формула (5) е изчислена взаимната индуктивност между Хр и Кр и между двете ходови релси. Получени са следните резултати: $M_{хр-хр}$= $1{,}83.10^{-3}$, H/km; $M_{кр-хр}$= $1{,}82.10^{-3}$, H/km.



Фиг.3. Средно разстояние между ХР и КР

Фиг.3: Средно разстояние между ХР и КР

За определяне на активното еквивалентно съпротивление $R_{хр.екв.}$е необходимо да се пресметне израза:

$$R_{хр.екв.}=1/2.R_{х.р.}=0{,}0159,\ \Omega/km \qquad (6)$$

Изчислението на еквивалентната индуктивност на ТМ се прави по изразите (7) и (8).

$$L_{екв.}=1/2(L_{Кр} + M_{кр-хр})=2{,}1.\ 10^{-3},\ H/km. \qquad (7)$$

$$L_{тм} = L_{кр} + L_{екв}\alpha - M_{кр-хр}(1+\alpha)==0{,}76.\ 10^{-3},\ H/km \qquad (8)$$

където: α - коефициент на разпределение на тока между релсите в преходен режим, α=0,62 .

2.2. Определяне на параметрите на ТПС

В софийския метрополитен най-масово използвания тип тягови трансформатори е 4GJ6544, производство на фирма GEAFUL. Те имат следните технически параметри: $S_{т.\ ном.}$=3000kVA; $U_{н1/н2}$=10/0,65kV; $U_к$=6,3,%; $P_к$=14,37,kW.

Посредством (9) се определя активното съпротивление на тяговия трансформатор:

$$R_{тт} = P_к\left(\frac{U_{2н}}{S_н}\right)^2.10^{-3} = 0{,}0007\ ,\ \Omega \qquad (9)$$

Като се отчетат съпротивленията на шинните съединения и тяговия изправител, активното съпротивление на ТПС е равно на от 1,5 до 2 пъти [3] от $R_{тт}$, т.е. $R_{тпс}$=(0,0011÷0,0014), Ω.

За да се определи еквивалентната индуктивност на ТПС $\mathbf{L_{тпс}}$ (9) е необходимо

първо да се пресметне индуктивното съпротивление на тяговия трансформатор израз (8).

$$X_{l\text{тт}} = \frac{U_k U_{н2}^2}{100 S_{\text{т.ном}} 10^3} = 0{,}0089\ ,\ \Omega \qquad (8)$$

$$L_{\text{тт}} = \frac{X_{l\text{тт}}}{2\pi f} = 0{,}028.10^{-3}\ ,\text{H} \qquad (9)$$

Чрез (10), (11) и (12) се определя индуктивното съпротивление на първичната страна на ТПС $\mathbf{Xl_{тпс10kv}}$ и съответно нейната индуктивност $\mathbf{L_{тпс10kv}}$. За изчисленията е необходим тока на к.с. на шини 10 kV, който за нашия случай е $\mathbf{I_{к.с.\ 10kV}}$=13, kA.

$$X_{\text{с10kv}} = \frac{U_{н1}}{\sqrt{3}.I_{\text{к.с10kv}}} = 0{,}46\ ,\ \Omega \qquad (10)$$

$$X_{l\text{тпс10kv}} = X_{\text{с10}kV}\left(\frac{U_{н2}}{U_{н1}}\right)^2 = 0{,}0018\ ,\ \Omega \qquad (11)$$

$$L_{l\text{тпс10kv}} = \frac{X_{l\text{тпс10kv}}}{2\pi f} = 0{,}0057.10^{-3}\ ,\text{H} \qquad (12)$$

Общата индуктивност на ТПС е равна на

$$L_{\text{тпс}} = L_{\text{тт}} + L_{l\text{тпс10kv}} = 0{,}034.10^{-3}, \text{H} \qquad (13)$$

2.3. Определяне на параметрите на тяговия състав

Параметрите на тяговия двигател тип ДК-117М са отчетени от паспортните му данни. Той има следните технически параметри: номинална мощност $P_{\text{тд.н}}$=112kV; номинално напрежение $U_{\text{нтд.}}$=375,V; максимален ток $I_н$=330, A; ъглова скорост $\omega_н$=154, s^{-1}; активно съпротивление на котвената и възбудителната намотка $R_{\text{тд.кн.}}$= 0,0285, Ω и $R_{\text{тд.вн}}$= 0,0312, Ω (предвид факта че двигателите са с последователно възбуждане $R_{\text{тд}}$= 0,06, Ω); индуктивността на намотките на тяговия двигател$L_{\text{тд}}$ се изчислява по формулите [4]:

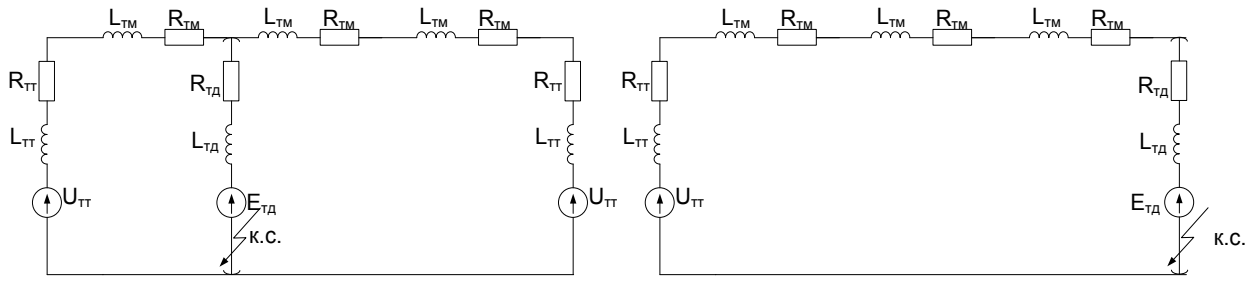
$$L_{\text{тд.}} = \gamma \frac{U_н}{p.\omega_н I_н} = 1{,}11.10^{-3}, \text{H} \qquad (14)$$

където: γ - коефициент, γ =0,6 за двигатели без компенсационна намотка [4] [5];

$$U_{\text{тд.}} = U_н - I_н R_{\text{тд}} + L_д \frac{di_d}{dt} \approx 356, \text{V} \qquad (15)$$

Предвид факта, че в един метровагон на един метросъстав тяговите двигатели са 4 броя по време на регулиране на скоростта схемата им на свързване се мени постоянно, се приема, че в момента на к.с.$U_{\text{тд.}}$ ≈860, V.

След определяне на параметрите на отделните елементи на ТЕС за симулиране на основните режими на работа се използва подходящ програмен продукт. Симулационната заместваща схема на ТЕС е показана на фиг.4.



Фиг.4. Симулационна заместваща схема на ТЕС

3. Сравнителен анализ на резултатите от аналитичното и експериментално изследване на процесите ТЕС

Значително по големия брой к.с. в ТЕС настъпват в товарите и са провокирани от тях, предвид този факт за целите на симулацията са разгледани случай когато к.с. настъпва във веригата на метросъстава.

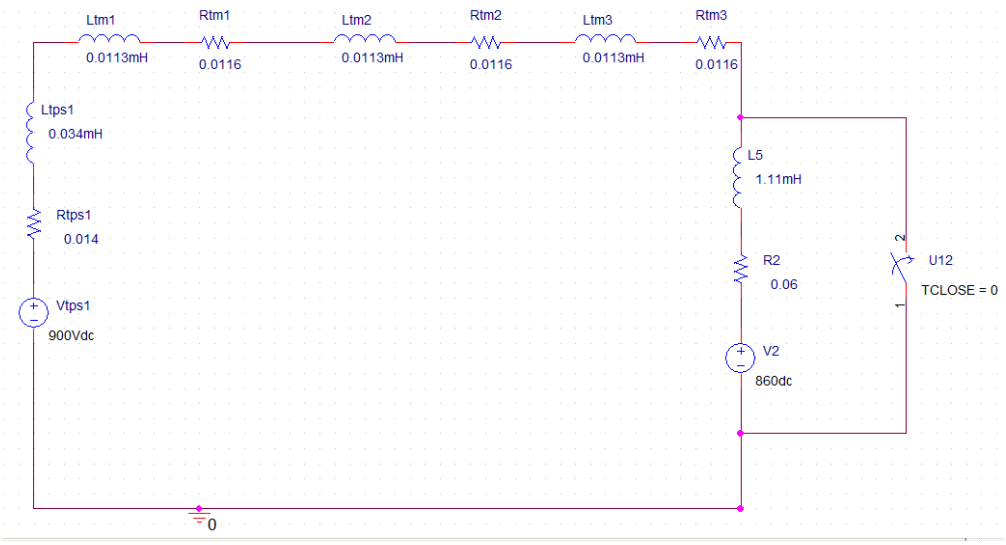
Симулирани са два характерни случая на аварийни режими настъпващи в ТЕС. Първият случай е когато участъка от ТЕС се захранва от едно ТПС а метросъставът се намира в края на участъка. Втория случай е когато метросъставът се намира приблизително в средата на участъка, който се захранва от две ТПС.

3.1. Първи случай

На фиг.5 е показана симулационната схема, по която се изследват параметрите на преходен авариен процес настъпил в тяговия товар при едностранно захранване. Местоположението на тяговия товар се задава чрез изменение на параметрите на TML_{tm}и R_{mt}.

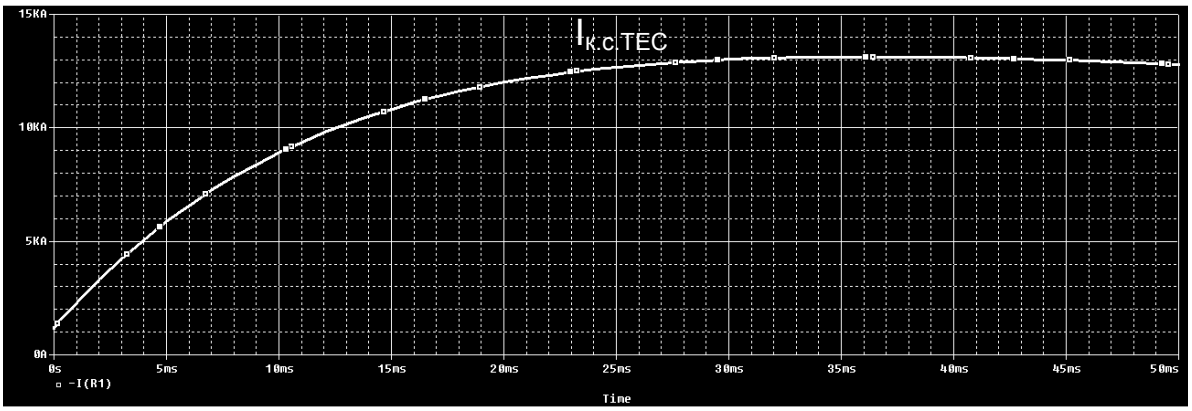
Условията, при които е извършена симулацията са следните: 1. Разглежданият подстанционен участък е дълъг един километър; 2. Метросъставът е в края на участъка; 3. Участъкът се захранва едностранно от едно ТПС; 4. Късото съединение настъпва в метросъстава; 5. Метросъставът е на естествена характеристика и консумира ≈500, А тягов ток от ТПС.

Тази симулация се прави за да се изследва характера на к.с. когато то е настъпило в края на ТМ и е трудно за разпознаване от релейната защита. По този начин чрез симулацията се установява скоростта на нарастване на тока на к.с.di/dt, максималната му стойност Im и характера му на изменение във веригата.



Фиг.5. Модел на ТЕС симулиран на pspice, когато участъкът се захранва от едно ТПС.

На фиг.6 е показана кривата на изменение тока к.с. в ТЕС като измерването му е направено в ТПС.За времевия интервал от t=0, ms до t= 20, ms, тока на к.с. нараства по експоненциална зависимост до достигане на максимална стойност $I_{к.с.ТЕС}$= 13,1, kA, след време t=20, ms, той достига установената си стойност $I_{к.с.ТЕС}$= 13, kA.

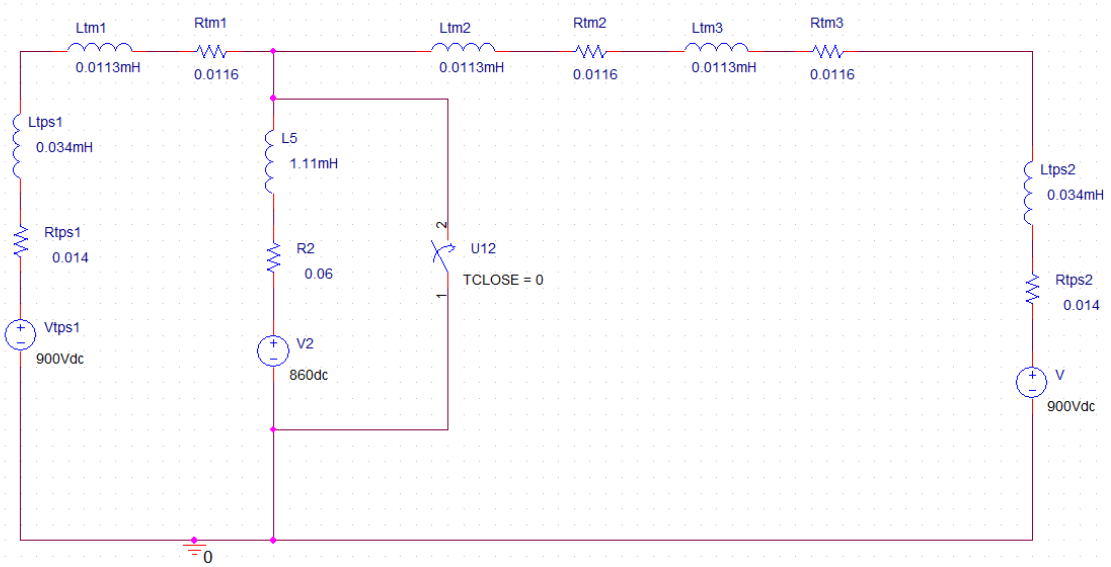


Фиг.6. Изменение на тока на к.с. в ТЕС захранвана от едно ТПС

3.2. Втори случай:

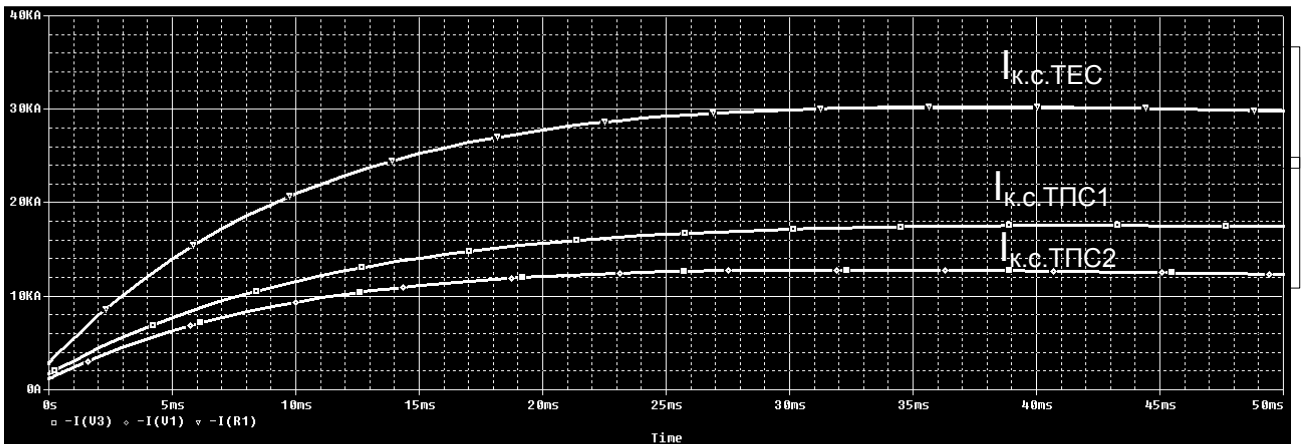
На фиг.7 е показана симулационната схема, за изследване на преходни аварийни режими при настъпило к.с. в тяговия товар при двустранно захранване. Местоположението на тяговия товар се задава чрез изменение на параметрите на TML_{tm}и R_{tm}.

Условията, при които е извършена симулацията са следните: 1. Разглежданият подстанционен участък е дълъг един километър; 2. Метросъставът се намира на 300 метра от едното ТПС и на 700 метра от другото; 3. Участъкът се захранва двустранно; 4. Късото съединение настъпва в метросъстава; 5. Метросъставът е на естествена характеристика и консумира ≈500, Атягов ток от ТПС.



Фиг.7. Модел на ТЕС симулиран на pspice когато участъка се захранва от две ТПС

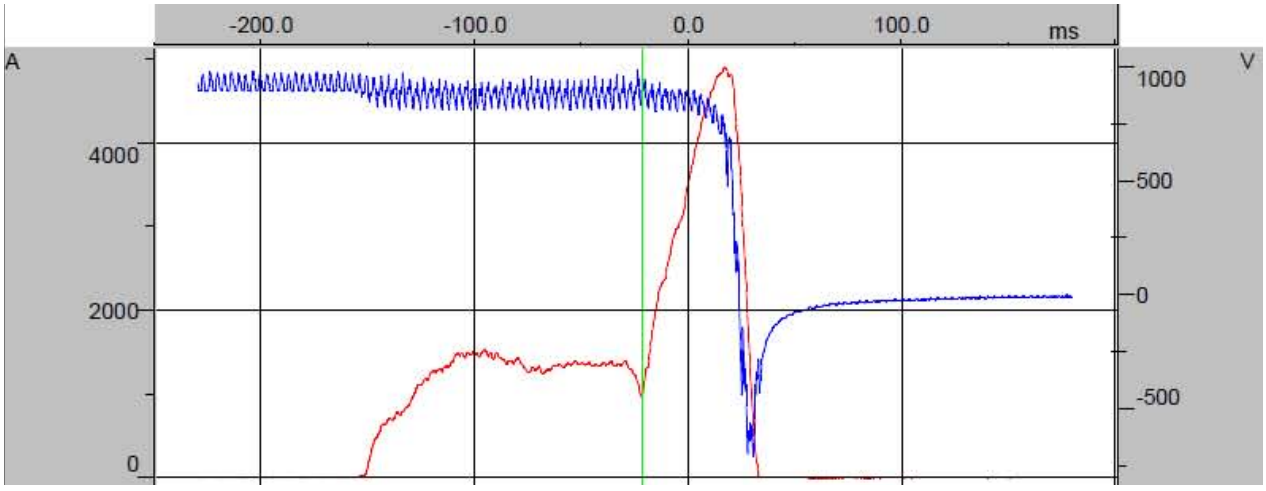
На фиг.8 са показани токовете на к.с., през отделните ТПС и тока на к.с. в ТЕС, за периода от t=0,msдо t= 20,ms , аналогично както при първия случай токовете на к.с. нараства по експоненциална зависимост, като след време t=20,ms, тока достига максималната си стойност $_{к.с.ТЕС}$= 30, kA, аслед t=4 тока във веригата се стабилизира на $I_{к.с.ТЕС}$=29,9, kA. Накривите$I_{к.с.ТПС1}$ и $I_{к.с.ТПС2}$е показано изменението на токовете от отделните ТПС.



Фиг.8. Изменение на тока к.с.в ТЕС захранвана от две ТПС.

За сравнение на получените резултати на фиг.9 е дадено измерено к.с. настъпило при сходни условия, като при направената симулация.
Аварийния преходен процес е измерен между Метростанция (МС) „Младост III“ и МС„Цариградско шосе“ където разстоянието между двете ТПС е приблизително 1000 метра. К.с. настъпва във веригата на метросъстава, като подстанционния участък е бил захранван само от ТПС 21А, находящо се на МС „Младост III“.

Като сравним фиг.9 и фиг.6 се вижда, че характерът на изменението на тока на к.с. при реален и симулиран случай съвпада. Затова можем да кажем, чрез създадения математически модел и използването на подходящи програмни комплекси могат да бъдат проведени изследвания и анализи на специфичните параметри характеризиращи специфичните преходни процеси развиващи се в ТЕС. Тези изследвания анализи могат да послужат и за проектиране на микропроцесорна релейна защита, която да отговаря на изискванията за селективност и бързодействие и надеждност.



Фиг.9. Изменение на тока к.с. в ТЕС в подстанционния участък МС „Младост III“ и МС „Цариградско шосе“ .

4. Заключение

От направените проучвания категорично може да се твърди, че математически модел и симулация на процесите при преходни режими в ТЕС на Столичния метрополитен до този момент не е правена. Това създава редица затруднения при експлоатацията и определяне на режима на работа /настройка/ на използваните цифрови релейни защити в ТЕС.

Специфичния характер на развитието на преходните процеси в изследваните силови електрически вериги определя сложността на релейните защити като дефинира различни алгоритми и критерии на сработване.

Разработения модел с възможности на цялостна симулация на процесите при нормален и авариен режим дава възможности за проектиране микропроцесорна релейна защита отчитащата специфичните особености на процесите в ТЕС на метрополитена.

Литература

[1] Быков Е.И., Б,В. Панин, В.Н. Пупынин, **Тяговые сети метрополитенов**, М., «Транспорт», 1987, 256 с;

[2] Рюденберг Р. **Переходныепроцессы в электроэнергетических системах**, МоскваИзд-воиностраннойлитературы 1955г. 716 с.;

[3] Векслер М.И. **Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания**, М., «Транспорт», 1976, 120с.;

[4] Иоффе А.Б. **Тяговые электрические машины**. –М.–Л.:Энергия, 1965. – 232с.;

[5] Чиликин М. Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. **Теория автоматизированного электропривода**: Учеб. пособиедлявузов. – М.:Энергия, 1979.– 616с.

Автор: маг. инж. Тодор Кънчев Лалев, докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане в транспорта”, ВТУ „Т. Каблешков”, главен енергетик “Метрополитен” ЕААД, E-mail address: *16nakon@gmail.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** гл. ас. д-р Т. Йонов

КАПСУЛОВАНА ОПТИЧНА СИСТЕМА ЗА СВЕТОДИОДНИ УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛИ

Христо Василев, Вълчан Георгиев, Ива Драганова, Станимир Стефанов

Резюме: *Чрез представената капсулована оптична система се цели постигане на високи стойности на експлоатационния фактор и намаляване на разходите за обслужване на уличните осветителни уредби. Светодиодите предлагат несъществуваща досега възможност да се построи улична осветителна уредба, която да не се нуждае от обслужване. Това е така, заради дългият им живот - за целия срок на експлоатация на уредбата – от порядъка на 16 години, осветителите не се нуждаят от подмяна на източника. Използването на конвенционални технологии при конструиране на осветителите обаче, изискват или периодично почистване (най-малко веднъж на 4 години) или залагане на много нисък експлоатационен фактор при проектиране на уличното осветление. С предлаганата идея може да се постигне експлоатационен фактор MF=0.9 при необслужваема уредба.*

Ключови думи: *Светодиоди, улично осветление, експлоатационен фактор.*

CAPSULATED OPTICAL SYSTEM FOR ROAD LIGHTING LUMINAIRE

Hristo Vasilev, Vulchan Gueorgiev, Iva Draganova, Stanimir Stefanov

Abstract: *A conception for road lighting luminaire is presented. The goal is to be achieved a high value of the maintenance factor and low exploitation expenses for road lighting installation. LEDs offer unique feature, unachievable with conventional light sources – a road lighting system that does not need any exploitation through its full lifecycle can be build. This is due to the long life of LEDs which covers entire lifecycle of the road lighting system –16 years average. During that period the main part of luminaires will not need light source replacement. The usage of conventional technologies for construction of road lighting luminaires requires periodical cleaning of luminaires or very low values of MF as a starting point for road light system design. The idea discussed here makes possible the road lighting installation to be designed with maintenance factor MF=0.9 and absolutely no maintenance.*

Keywords: *LED, road lighting, maintenance factor*

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

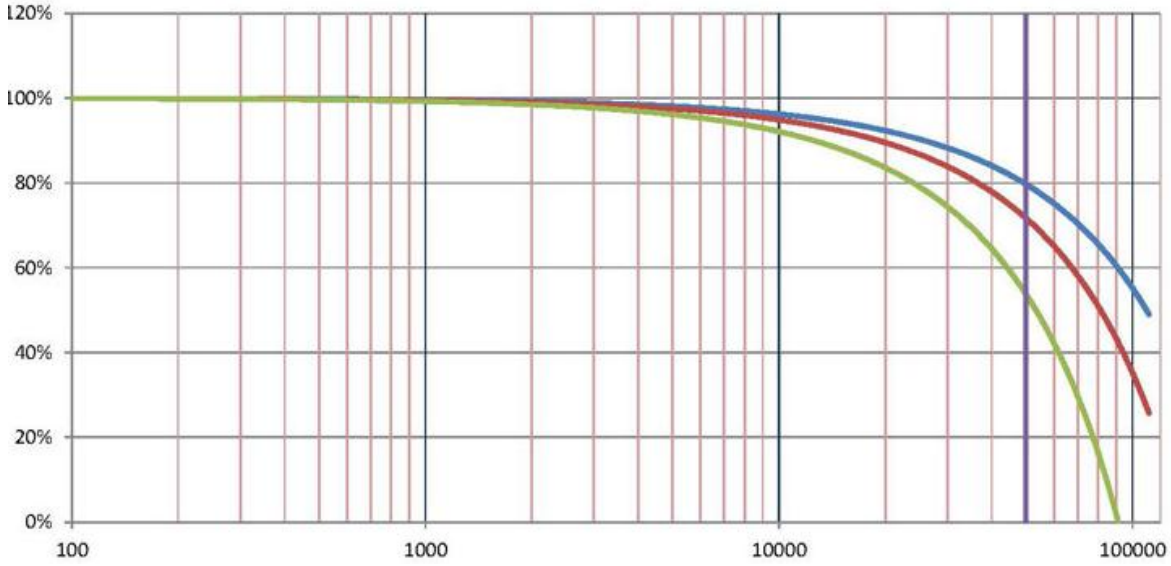
Въведение

Стойността на експлоатационния фактор MF на светодиодните улични осветители оказва съществено влияние върху енергийните и експлоатационните разходи и първоначалните инвестиции на уличните осветителни уредби.

Както е известно MF се определя по следната зависимост:

$$MF = LLMF \times LSF \times LMF,$$

където LLMF е експлоатационният фактор, отчитащ намалението на светлинния поток на светодиодните модули в процеса на експлоатация на уличните осветители. На фиг.1 е представено изменението на светлинния поток на модулите съгласно стандартите LM70 и LM80.



Фиг.1.

Както се вижда от представените резултати при използването на осветители със светодиодни модули с L80, разходите (енергийни и др.) могат да се намалят с около 14% спрямо модулите L70.

Данните LLMF се представят от производителите на осветители и светодиоди. Възможно е един светодиоден модул с представени от производителя данни за L80 при монтирането му в един лошо термично оразмерен осветител да има показатели L70 и дори L65. Възможен и обратният случай, при който един модул с L80 монтиран в термично добре оразмерен осветител, който осигурява Tj ≤ 50° C, Ток = 20° C, да има показатели L85 64kh и дори < L90 64kh (Ток = 20° C).

Конструкторите и производителите на светодиодни улични осветители имат възможността да повишат стойностите на LLMF. През последните години все по-често се използва технологията CLO (ConstantLightOutput), при която светлинният поток на светодиодния модул ΦLED е постоянен за целия период на експлоатация на осветителя (t = 64 kh) ΦLED = const. Това се постига чрез програмирано повишаване мощността на светодиодните модули (обикновено през период от 4 г.), като по този начин се компенсира намаления светлинен поток.

В табл.1 е представено изменението на мощностите на светодиодните модули за период от 64 000 h при стойности L70, L80, L85, L90.

Табл.1. Изменение на мощностите на светодиодните модули за период от 64 000 h при стойности L70, L80, L85, L90

Намаление на светлинния поток за T = 60 kh	Начална стойност на мощността P [0 kh]	Крайна стойност на мощността P [60 kh]	Средна стойност на мощността P [0 kh – 60 kh]
L70	100%	143%	121,5%
L80	100%	125%	112,5%
L85	100%	118%	109%
L90	100%	111%	105,5%

При определяне на енергийните разходи на уличната осветителна уредба трябва да се използва средната мощност на светиодиодния модул $\bar{\mathbf{P}}$.

При условие, че се използва технологията CLO, стойността на LLMF = 1.

L9F е експлоатационен фактор, отчитащ броя на светещите улични осветители в една улична осветителна уредба. Съгласно EN13201 и добрите европейски практики, несветещите (изгорели LED модули) улични осветители трябва да се възстановят в рамките на 24 h. Поради това стойността на L9F = 1.

LMF е експлоатационен фактор, който отчита намалението на светлинния поток на осветителя, следствие замърсяване и стареене на оптичната система на осветителя.

Основната причина за това намаление е така нареченото „дишане“ на осветителя.

В резултат на дишането на осветителя в оптичната система настъпват следните процеси:

Заедно с „вдишвания“ въздух в оптичната система постъпва прах, влага и сернисти газове;

Основната част от прахта, попаднала в оптичната система попада върху разсейвателя (рефрактора), следствие на което се намалява коефициента на пропускане. По-малка част (финната прах) се полепва върху отразяващите повърхности на рефлектора, следствие на което се намалява коефициента на отражение на рефлектора;

При определени температурни условия „вдишаната“ влага се превръща в конденз и спомага попадналата прах да се свърже по-здраво с разсейвателя и рефлектора. Сернистите газове в комбинация с кондеза създават „мини“ химически реакции върху рефлектора, които водят до невъзстановяемо (след почистване) намаление на коефициента на отражение на рефлектора и невзстановяема про-

мяна на формата на светлоразпределителната крива на осветителя.

Повишената температура и светлинните излъчвания на разсейвателя в нощните часове привличат инсекти, малка част от които се отлагат върху външната повърхност на разсейвателя и по този начин намаляват коефициента на пропускане.

Гореописаните процеси налагат почистване на оптичните системи на уличните осветители за нормално замърсена въздушна среда на период от 4 години, като при това LMF = 0,85. При уличните осветители с конвенционални лампи (HPS) този период на почистване (4 години) съвпада с периода на групова подмяна на лампите. Естествено възниква следният въпрос:

Обезценява ли се едно от съществените предимства на светодиодните улични осветители, а именно дългият им живот в експлоатационни условия (15 – 16 години), тъй като на всеки 4 години оптичните системи на осветителите се нуждаят от почистване?

При групово почистване стойността на почистването на един осветител е около 15 €, включително и консумативите.

Авторите на доклада за светодиодни улични осветители предлагат ново техническо решение на капсулована оптична система, подкрепено със заявка за патент.

Това ново техническо решение има следните преимущества спрямо конвенционалните системи:

- Оптичната система на осветителя има нулево „дишане“;
- В оптичната система не попадат прах, влага и сернисти газове;
- Не настъпват окислителни процеси вътре в оптичната система;
- Полепването на инсекти върху външната повърхност на разсейвателя е сведено до минимум.

Следствие на съществените преимущества на оптичните системи за светодиодни осветители, изградени на базата на предложеното ново техническо решение, предлагаме периодът на почистване на оптичната система да съвпада с периодът на подмяна на светодиодните модули, т.е. t ≈ 64 kh (16 години), като при това стойността на експлоатационния фактор LMF64kh = 0,9 за нормално замърсена околна среда.

Окончателната стойност на експлоатационния фактор на светодиодния уличен осветител MF, при използване на технологията CLO, комбинирана подмяна на дефектиралите LED модули и драйвери и приложението на капсулована оптична система с „нулево дишане“ е равна на:

$$MF64kh = LLMF \times LSF \times LMF64kh = 1 \times 1 \times 0,9 = 0,9$$

MF = 0,9 е една изключително висока стойност в сравнение със съществуващата

практика в момента (МФ = 0,67 ÷ 0,8).

В табл.2 са представени сравнителни резултати за относителните енергийни разходи за улични осветителни уредби, изпълнени със светодиодни осветители с различни стойности на експлоатационния фактор MF (0,9; 0,8; 0,75) и период на почистване на оптичните системи 64 000 h (16 години). Минималните относителни енергийни разходи EO min = 100% са идеализирани разходи, които се определят за конкретна осветителна уредба със следните експлоатационни фактори:

Технология CLO → L100 → LLMF = 1, LMF = 1, LSF = 1

Реалните относителни енергийни разходи Eo_p [%] се изчисляват по следната зависимост:

$$\mathbf{EO_P = 100\frac{\left[1+\frac{(\bar{P}-100)}{100}\right]}{MF}}$$

EO min = 100% - идеализирани енергийни относителни разходи.

Табл.2.

Стойност на експло-атац. фактор MF	Стойност на експлоатац. фактор LLMF	Реални относителни енер-гийни разходи EO_P [%]
MF = 0,9	LLMF = 0,9	117 %
	LLMF = 0,85	121
	LLMF = 0,8	125
	LLMF =0,7	135
MF = 0,8	LLMF = 0,9	132
	LLMF = 0,85	136
	LLMF = 0,8	141
	LLMF =0,7	157
MF = 0,75	LLMF = 0,9	141
	LLMF = 0,85	145
	LLMF = 0,8	150
	LLMF =0,7	162

Заключение

Възможно е да се създаде осветител, който да е необслужваем и в същото време да осигурява залагането на експлоатационен фактор MF=0.9. Това би имало сериозни икономически предимства – висока ефективност при почти нулеви разходи за поддръжка.

Признателност

Работата по настоящия доклад е част от договор ДУНК-01/3/2009 - „Създаване на университетски научно-изследователски комплекс (УНИК) за иновации, трансфер на знания в областта на микро/нано технологии и материали, енергийната ефективност и виртуалното инженерство“, финансиран от Фонд „Научни изследвания“.

Литература

[1] ANSI RoadwayLighting, RP-8-00, 2005

[2] Христо Василев, “Улично светодиодно осветление” кръгла маса „XIV Национална конференция с международно участие 10-12 юни 2010, BulLight2010, ”Св.св.Константин и Елена”, Варна.

[3] Христо Василев, Станимир Стефанов "Оптимизиране на светлоразпределението на улични осветители по осветеност", „XIII Национална конференция с международно участие 10-12 юни 2007г, BulLight 2007., ”Св. Св. Константин и Елена”, Варна

Автори: Христо Николов Василев, проф. д-р, инж., катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *hristo.vasilev@denima2001.com*; Вълчан Георгиев, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vulchy@tu-sofia.bg ;* маг. инж. Ива Димитрова Драганова, докторант, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivadraganova@tu-sofia.bg;* Станимир Благоев Стефанов, гл. ас., д-р, инж., Технически Университет - София, филиал Пловдив, E-mail address: *glasst@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. Р. Кючуков

ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗТОЧНИЦИ НА ЕНЕРГИЯ ЗА ЕЛЕКТРОМОБИЛИ – СРАВНЕНИЕ, УСЛОВИЯ ЗА ИЗБОР, АНАЛИЗ

Чавдар Джамбазки

Резюме: *Параметрите и видът на електромобила (ЕМ) зависят от характеристиките на използваните акумулаторни батерии (АБ). Пробегът на ЕМ на едно зареждане на АБ (запас ход) е право пропорционална на отношението: тегло на АБ към пълното тегло на ЕМ.*
Ключови думи: *електромобил, акумулаторни батерии*

ELECTRICAL ENERGY SOURCES FOR ELECTRIC VEHICLES - COMPARISON TERMS OF CHOICE ANALYSIS

Chavdar Djambazki

Abstract: *The parameters and the type of electric vehicle (EV) depends on the characteristics of the accumulator battery (AB). The range of EV on one charge of AB (stock speed) is directly proportional to the ratio: weight of AB to the full weight of the EV.*
Key words: *electric vehicle, batteries*

Въведение

Електромобилът - автомобил задвижван от един или няколко електродвигателя със захранване от автономен източник на електроенергия. Различава се от електрокара и тролейбуса. Формулировката за електромобил може да прозвучи и така – автомобил, задвижването на водещите колела на който се осъществява от електрически двигател, захранван с електрическа енергия получавана от химически източник на ток, или така – безрелсово транспортно средство с автономен химически източник на енергия. Първите прототипи са построени в края на XIX век. Активно са се използвали в САЩ, Германия и Англия.

Принципната схема на електромобилът е следната: Акумулаторна батерия, електрозадвижване и система за регулиране въртящия момент на ТД, а чрез предавките и на теглителната сила създавана в точката на контакт между колело и път. Зависимостта на теглото на АБ от товароносимостта на ЕМ е значително по-голяма от зависимостта между теглото на карбураторния двигател от товароносимостта на автомобила. Батериите се разполагат на шасито на ЕМ така, че да има:

- равномерно разпределение на теглото;
- лесен достъп за обслужване и смяна;
- безопасни условия за обслужване, контрол и пътуване.

© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Комбинирани енергоизточници

В края на 60-те и началото на 70-те години са разработени редица опитни образци на ЕМ с комбинирани енергийни източници тип *«Акумулаторни батерии – Топлинни елементи»*. В Англия на базата на DAF 44 е конструиран ЕМ със смесена система енергийни източници: акумулаторна батерия и хидрозийно-въздушни ТЕ с относителна мощност 160 W/kg. При ускоряване основното натоварване се поема от АБ, в останалите режими - топлинните елементи зареждат АБ. В САЩ на базата на Austin A-40 е изготвен ЕМ с комбинирана система включваща алкални водородно-въздушни елементи, и оловно-киселинни акумулаторни батерии. Пробегът който е постигнат е 320 км.

Електромобили на слънчеви батерии

Съществуват много конструкции ЕМ задвижвани от слънчеви батерии,така наречените «слънцемобили». Проблем е ниският КПД на батерията (10-15 %, до 30%), което не позволява да се запаси достатъчно енергия за средно дневен градски пробег; слънчевите елементи за безполезни нощем и в мрачно време и са много скъпи. Примери: *Venturi Astrolab*, *Venturi Eclectic* (допълнително оборудван с ветрово задвижване), *ItalDesign-Giugiaro Quaranta* (енергията от слънчевите батерии се използва от бордовата електроника), италианските *Phylla*, а също *SolarWorld GT*, който през 2012 г. извърши околосветско пътуване. Последният е оборудван с две мотор колела Loebbemotor с номинална мощност 1,4 kW всяко (пикова мощност - 4,2 kW всяко или сумарно - 11,42 конски сили). Кошът е от карбон с тегло 85 kg, пълно тегло 260 kg и съвършена аеродинамична форма (Cx = 0,137), което позволява да се достигнат 120 km/h. При скорост 50 км/ч (при работа на моторите на номинална мощност), SolarWorld GT може да измине 275 km много повече от редица ЕМ. Този пробег се осигурява от 21-килограмова литиево-йонна батерия с капацитет 4,9 kWh. Съществуват и хибридомобили, които се привеждат в движение както от слънчеви батерии така и от педали. Основно това са самоделки но съществуват проекти за серийно производство на такъв вид транспорт, *SolarLab rickshaw* и унгарския *Antro Solo*.За производство на слънцемобили и тяхната популяризация съществуват съревнования като трансавстралийското рали «Всемирна слънчева покана (*англ.*)».

Главните експлоатационни показатели на електромобила оказващи влияние върху избора на параметрите на агрегатите са:
- пълната маса на натоварения електромобил – $G_{ем.нат.}$ (kg);
- мощност на енергииния източник (АБ) – $P_{еизточ(АБ)}$ (W);
- брой водещи колела – m_k;
- трайна (номинална) теглителна сила – $F_{ном}$(N) при постоянна номинална скорост – $v_{ном.}$ (m/sek);
- максимална теглителна сила – $F_{макс.}$(N) и скорост – $v_{макс.}$(m/sek).

Модел на механическата част

За изчисляване мощността на електродвигателя задавам следните изходни данни (автомобил Рено Канго): пълна маса m – 1400 kg., коефициент на триене по асфалт $f_{тр}$– 0.018, коефициент на обтекаемост на коша Cx – 0,32 , площ на челното съпротивление S – 1,8 m^2., максимална скорост на движение V_{mak} =60 km/h-16,6m/s

Максималната мощност, осигуряваща механическото движение се определя с израза:

$$P_д = \pm P_{уск} + P_{тър} \pm P_{възсъпр} \pm P_{нак} \quad (1)$$

където: $P_{уск}$ – мощност, губена за ускорение на ЕМ; $P_{тър}$ – мощност губена за преодоляване силите на съпротивление от търкаляне; $P_{възсъпр}$ – мощност губена за преодоляване на аеродинамическото съпротивление; $P_{нак}$ - мощност губена за преодоляване на наклон.

При движение на ЕМ по участък от пътя с равно асвалтобетонно покритие без наклон, силата на съпротивление на движението се събира от силата на съпротивление от търкаляне и силата от съпротивление на въздуха.

$$F_{сдвиж} = F_{стър} + F_{свъз}:$$

$$F_{сдвиж} = F_{стър} + F_{свъз} = f \cdot m \cdot g + K_V \cdot S \cdot \frac{V^2}{13} N = 247,3 + 12,2 = 260N, \quad (2)$$

където: f – коефициент на сопротивление от търкаляне – 0,018; m – пълна маса на електромобила – 1400 kg; g – ускорение на свободно падане – 9,81m/s^2, K_v – коефициент на съпротивление на въздуха – 0,32N·s^2/m^4; S – повърхностна обдухване – 1,8 m^2; V – скорост на ЕМ – 60 km/h.

Силата на съпротивление на движение създава на колелата на ЕМ момент на съпротивление, който с отчитане предавателните числа на трансмисията се привежда към вала на електродвигателя с отчитане КПД на трансмисията. Моментът на съпротивление на движение върху вала на електрическия двигател се определя с израза:

$$Mc = \frac{F_{сдвиж} \cdot r_{колело}}{i_{транс} \cdot \eta_{транс}} \; N \cdot m, = \frac{260.0,35}{1,45.0,85} = 73,83N.m \quad (3)$$

където: $r_{кол}$ – радиус на търкаляне на колелото,m; $i_{транс}$ – предавателно число на трансмисията; $\eta_{тр}$ – КПД на трансмисията.

Освен това моделът на механическата част отчита движението на ЕМ по участък от пътя с наклон (нагорнище или надолнище) и съпротивление на движение, обусловено от неравности на пътя. При моделиране движение на ЕМ по надолнище се отчита и рекуперативното спиране.

Модел на електрическия двигател

В качеството на тягов електродвигател на ЕМ в работата се разглежда трифазен асинхронен двигател с накъсо съединен ротор. При всички известни недостатъци този тип двигатели позволява регулиране честотата на въртене в широки пределе с помощта на векторно управление.

Полезната мощност P_2 се определя като разлика $P_2 = P_1 - \Delta P_{заг}$, където P_1 – е консумираната от акумулаторната батерия мощност; $\Delta P_{заг}$ –мощност на загубите в електродвигателя.

Необходимата мощност на електродвигателя на автомобила се определя с израза:

$$P = g.f_{mp}.m.v + C_x.s.v^2 + g.m.\sin\alpha, \quad (4)$$

където: g – 9,81 m/s^2 ускорение на свободно падане; α – ъгъл на наклона на пътя – 15^0 .

Заместването в (4) на известните променливи позволява да се достигне до:

$$P = 9{,}81.0{,}018.1400.16{,}66 + 0{,}32.1{,}8.(16{,}66)^2 + 9{,}81.1400.\sin 15 =$$
$$4103{,}7 + 158{,}72 + 3554{,}62 = 7817{,}04\ W$$

За движение на ЕМ по асфалт със скорост 16,66 m/s (60 km/h) и изкачване 15 % е необходима мощност на колелата – 7,8 кW. Отчитат се КПД на възлите на електромобила: $\eta_{дв}$ – на двигателя 0.95, $\eta_р$ – на редуктора на главната предавка – 0.92, $\eta_{кон}$ – на контролера с загубите по проводниците и контактора – 0.9, $\eta_{мех}$ – на механиката на електромобила е:

$$\eta_{мех} = 0.95 . 0.92 .0.9 = 0.76$$

Реалната необходима мощност на електродвигателя е

$$P_{елдв} = 7{,}8 / 0{,}76 = 10{,}2632\ кW \quad (5)$$

Избира се двигател с мощност не по-малка от 11кW.

Моментът на вала на електродвигателя се определя с израза:

$$M_2 = 9{,}55P_2 / n\ (N.m)$$

Връзката обороти на вала на двигателя и постъпателната скорост на ЕМ се дава с израза: $n = 30.V.i_{гпр}.i_{кп} / 3{,}6.\pi.r_{кол.}$ (1/min)

Пълната мощност на АБ се определя с израза:

$$P_{АБ} = P_д/(\eta_м \cdot \eta_э) + P_{всп} = 11/0{,}9 = 12{,}22\ kW \quad (6)$$

Максималната теглителна сила F(V) при потегляне се определя с израза:

$$F_{МАК} = P_{АБ}.\frac{\eta_n}{v} = 12{,}22.\frac{0{,}76}{2{,}77} = 3{,}35kN \quad (7)$$

където: η = 0,76 е к.п.д. на цялата система. Съгласно нея се определят кратностите на: максималната скорост на движение на ЕМ $k_v = \frac{v_{мак}}{v_{ном}}$ - варира от 3 до 6 и максималната теглителна сила $k_f = \frac{F_{мак}}{F_{ном}}$ - варира от 3 до 4;

Следователно: $F_{ном}$ = 278,33Nm.. Следователно при постоянно предавателно число $i_{пред.}$=const. се изменят момента на вала на тяговия двигател и ъгловата скорост. Всички работни режими на АБ и инвертора се ограничават от следните параметри, определени от зависимостта F(v): максимална $F_{мак}$ и номинална $F_{ном.}$ теглителна сила, номинална мощност на енергийния източник (АБ), максималната скорост- $v_{мак.}$ при някаква минимална теглителна сила Fмин. За номинална стойност на теглителната сила – $F_{ном.}$се приема такава стойност, която обезпечава на ЕМ с пълна маса – $G_{ел.нат.}$ зададената скорост –$v_{ном.}$ на усреднен най-често срещан профил на пътя.

Зависимостта $M_{дв}(\Omega_{дв})$ се намира непосредствено от зависимостта F(V), а електромагнитния момент M (Nm) и ъгловата скорост $\Omega_{дв.}$(s^{-1}) от изразите :

$$\Omega_{дв} = \frac{i_{пр}.v}{r_{кол}}; M = \frac{F.r_{кол}}{m_{кол}.i_{гл.пр.}.i_{ск.кут}.\eta} \quad (8)$$

Зависимостта $M(\Omega_{дв.})$ може да се преобразува в $U_{дв}$ ($I_{дв.}$). За АД с накъсо съединен ротор $I_{дв} = \frac{M}{K\Phi_{дв}.cos\varphi_{дв}}$; $E_{дв} = \frac{K\Omega_{дв}\Phi_{дв}}{(1-s)}$; $U_{дв} = E_{дв} + I_{дв}.Z_{дв}$.

При оразмеряване на АБ се изхожда от факта, че ЕМ ще се използва за вътрешноградски пътувания с чести спирания на светофарите и задръстванията. Определя се време за чисто движение – 15 минути, което е реално за град София. При средна скорост 40 km/h и пробег 80 km е необходимо време за чисто движение 2 часа. При среден консумиран ток 50 ампера се изчислява капацитетът на акумулатора с израза :

$$Cp = I^n . t_{дв} = 50^{1,2} . 2 = 109,33 .2 = 218,66\ A/час \quad (9)$$

За да се определи видът и параметрите на АБ монтирана на ЕМ се използват следните цависимости:

- за баланс на енергията:

$$\sigma \cdot G_б = a \cdot L.G \cdot 10^{-3}\ kWh \quad (10)$$

където: σ – относителна енергия на батерията, Wh/kg; a – относителен разход на енергия при движение в режим, за който е зададен пробегът, Wh/(t.km); G-пълна маса на ЕМ, kg ;

Пълната маса на електромобила се разпределя както следва:

$$G = G_{ходч} + G_{елзад} + G_{птов} + G_{бат}\ ;\ kg \quad (11)$$

където: $G_{ходч}$ – маса на ходовата част, kg; $G_{ел.зад}$ – маса на електро задвижването, kg; $G_{птов}$ – полезен товар, kg; $G_{бат}$ – маса на батерията, kg.

Теглото на акумулаторната батерия в първо приближение.

$$G_б = a \cdot G \cdot L \cdot \gamma\ \ ;kg \quad (12)$$

където: a - относителен разход на енергия на 1 t.km пълно тегло при зададена средна скорост 40 km/h градско движение и наклон 6% - 0,28 кW.h/(t.km); L — пробег - 40km; γ — относително тегло на АБ - 0,0202kg/кW.h.

0,28.1,4.40.0,0202 = 0,313t

-Тяговата енергия – $A_{т.аб}$ на батерията се определя със следния израз:

$$A_{таб} = L.G.a.10^{-3} kWh = 40.1,4.28.10^{-3} = 1,568\ kWh \quad (13)$$

От друга страна, общата полезна енергия на батерията в тягов режим на разряд се определя с израза:

$$W_{табат} = G_{таб}.\sigma_G.k_m\ kWh = 0,33.25.0,8 = 6,6\ kWh \quad (14)$$

където: $G_{таб}$ – обща маса на акумулаторната батерия с електролит, (t), приемам – 0,33t; σ_G – относителна енергозапасеност на батерията в номинален режим, приемам – 25 Wh/kg , k_T – коефициент на възможно използване за целите на тягата номиналната енергозапасеност на батерията в дадените условия на движение – натоварване и скорост – приемам за оловни батерии 0,8.

Решавайки съвместно изрази (11) и (12) и означавайки $G_{тбат}/ G = k_G$ се получава:

$$K_G = L.a/1000.\sigma_G.k_T = 40 .28 /1000.25.0,8 = 0,056\% ;$$

тоест теглото на АБ ще бъде 6% от теглото но ЕМ , или 84kg .

- Оптимизация на транспортната работа.

Стойността на транспортната работа се определя с израза:

$$A = L .g ,(t.km) \quad (15)$$

където: А- транспортна работа, L- пробег, g - товароносимост.
Товароносимостта на ЕМ се представя с израза:

$$g = G - G/M.m_{бат.} \quad (16)$$

където: G – товароносимост на базовия автомобил, t; M- максимално допустимата маса на източника на енергия, t. $m_{бат.}$- маса на източника на енергия, t.
Пробегът на ЕМ може да се определи с израза:

$$L=\sigma.m_{бат.}/a.G_u\ ,km \quad (17)$$

където: σ - относителна енергия на източника Wh/kg; а – относителен разход на енергия при движение Wh/t.km; $G_п$ – пълната маса на ЕМ, t.
Замества се в израза за транспортна работа:

$$A = \frac{m_{бат}.К}{\sigma G_{пъл}}\left(G - \frac{G}{M}\cdot m_{бат}\right) = m_{бат}\frac{G.K}{\sigma \cdot G_{пъл}} - m_{бат}^2 \cdot \frac{G.K}{\sigma G_{пъл}\cdot М} \quad (18)$$

След диференциране и приравняване производната на нула се получава, че $m_{бат.}$= G/2, тоест масата на източника не трябва да превишава половината от товароносимостта на ЕМ.
От предлаганите на българския пазар типови акумулаторни батерии се избира батерия с капацитет 185A/h производство на Монбат със следните данни: MEGALIGHT POWER тип ML220C nominal voltage 12V; C_{100}=250Ah to 10,8V; C_{20} =220Ah; C_5=185 Ah to 10,2V; dimensions L/W/H 518/274/242/; тегло 55kg България
Изпитания са извършени и с акумулаторни батерии тип MONOLITE UMTB series 12UTMB 160 nominal voltage – 12V;capacity (AH at 20^0C 10hrs to 1,8VPC 160 AH; short circuit current 3200 A; internal resistence -3,9m0hm; weight – 60 kg, производство за Италия.
На ЕМ се монтират и литиево железофосфатни йонни акумулаторни батерии тип TS-LFP100AHA 2,5 – 4,25V , 100Ah , тегло 7,3 kg , брой цикли 3000 -5000 , размери H276 mm,W183mm,T100mm
Паралелно на акумулаторните батерии се включват и суперкондензатори тип 20 EC 402 120 26/13 – 0,006

Режими на движение

Реализирано е движение на електромобила както в стандартен изпитателен цикъл *SAEj* 227 C, така и в режим, формиран на основание експериментално движение. Цикъл SAE j 227 C е един от най-напрегнатите. Пробегът за цикъл е 537 м, средна скорост на движение – 25 km/h, средно ускорение при ускорение 0,74 m/sek^2, при спиране – 1,23 m/sek^2.
Режимите на движение, получени на основание експерименталните данни, съществено се отличават от режима на движение в цикъл SAE j 227 C. При реалния режим на движение се получава по-малък относителен разход на енергия (260 Wh/tkm), спрямо движение в цикъл (390 Wh/tkm).
За определяне параметрите на електромобила с АБ тип ML220C е използвано уравнението на Шеферд. По този метод е описвана зависимостта U=f (I, t) с аналитична зависимост

$$E = E_s - K \cdot \frac{Q}{Q - I \cdot t} \cdot I - N \cdot I + A \cdot e^{I \cdot t / B \cdot Q} - C \cdot I \cdot t, \quad (19)$$

където: Es – начално напрежение на разряд,V; К – коефициент на поляризация, Ω.sm^2; N – вътрешно съпротивление на елемента, Ω.sm^2; Q – количество активен материал, Cu.sm^2; i – ток на разряд, A; t – време на разряд, ч; A – емперичен коефициент, V; B – емперичен коефициент; C – коефициент, V.sm/A.sек.

Коефициентите на уравнението (19) се определят по две разрядни криви. Разрядните характеристики не са показани. Изпитанието е проведено на автомобил Рено Канго в цикъл SAE J227C с 6 акумулатора тип ML220C. Резултатите от изпитанията са показани по-долу.

Пробег – 37,25 км; разход на енергия от АБ – 14,93 кWh; ползван капацитет – 137,18 Ah; брой цикли – 67. За оценка влиянието на супер кондензаторите на работата на АБ проведохме експеримент с паралелно включване на АБ и СК (АБ: 6 х ML220C, с маса 330kg; СК 20 ЕС 402, напрежение 26V, съпротивление 0,006Ω , маса 75 kg, капацитет – 500 F).

Резултатите от експеримента са:

- пробег – 41,24 km;
- разход на енергия на АБ – 16,53 kWh;
- използван капацитет – 146,95 Ah;
- брой цикли 74.

Експериментът показа, че паралелно включване на СК стартерен тип към оловно-киселинните батерии 6х ML220C и СК 20 ЕС 402 води до увеличаване масата на източника на енергия от 330 на 405 kg, т.е. с 22,7% , а пробегът се е увеличил с 10,7 % от 37,25 до 41,24 km. Монтирането на супер кондензаторите подобрява работата на ЕМ, за което свидетелства увеличаването на отдадената енергия от АБ от 14,93 kWh на 16,53 kWh (с 10,7 %).

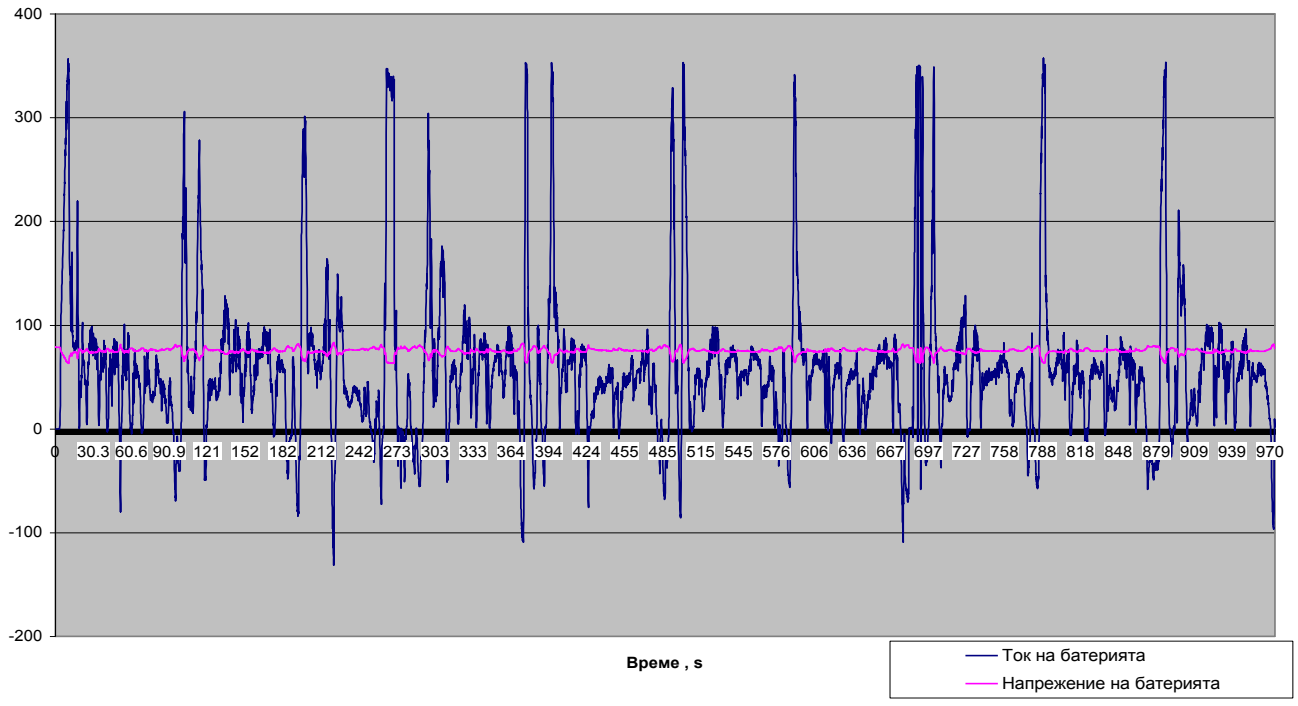
За илюстрация на разпределението на енергийните потоци между АБ и СК може да се построят графически зависимости за три състояния на АБ. Степените на разреденост на АБ са 0%, 50% и –95%, тъй като АБ съществено мени своите параметри по време на разряд, в това число и вътрешното съпротивление. Част от изпитанията са показани в табл.1 и фиг.1 и фиг.2.

В табл.1 са приети следните означения: № на цикъла SAFJ227C; $E_{бат}$ едс на батерията в края на съответния цикъл; $I_{екв}$ – еквивалентния ток на двигателя в съответния цикъл; t – време на цикъла с отчитане на спирането; S- изминатия път в съответния цикъл ,a – относителния разход на енергия в цикъла. Движението на ЕМ продължава докато напрежението на АБ не се намали до 65 волта.

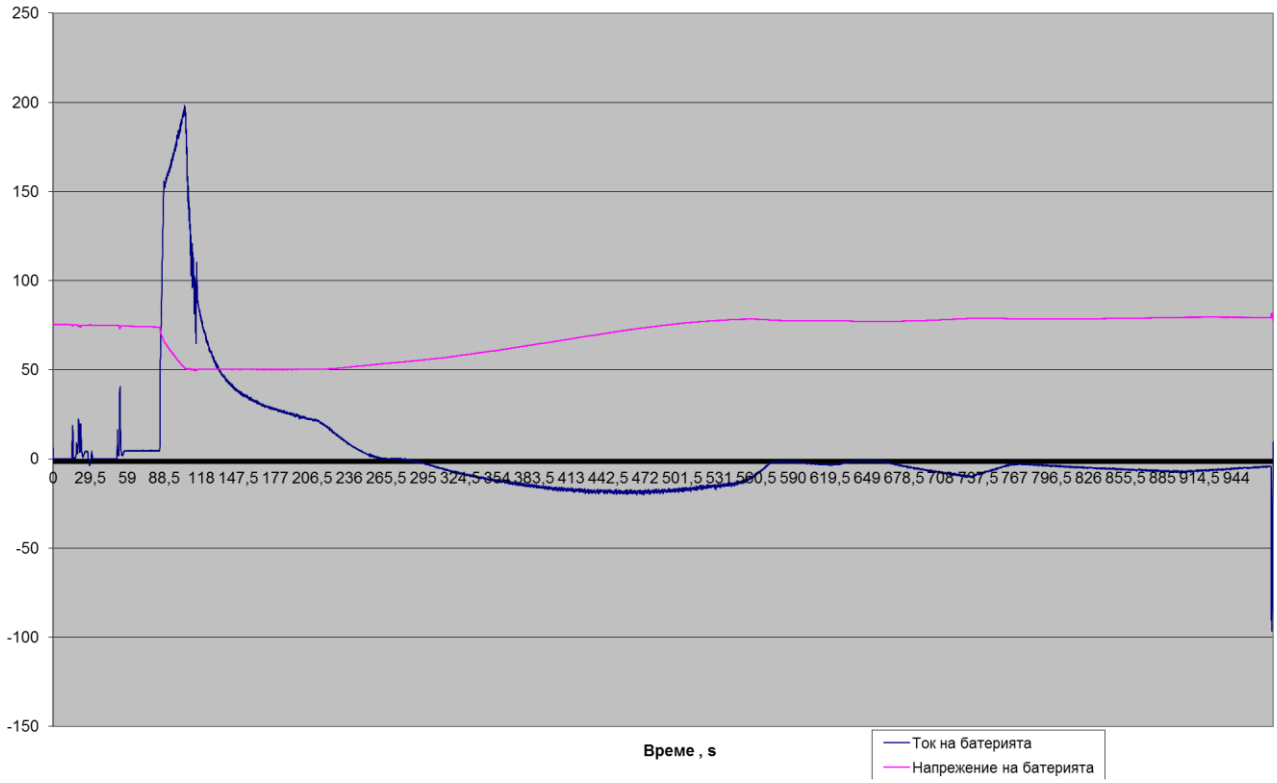
Анализирайки табличните данни могат да бъдат направени следните изводи: За целия цикъл среден еквивалентен ток 146A, време пътуване 2710 sek, Средният относителен разход на енергия е 101,7 Wh/tkm, пробегът на ЕМ в цикъла SAEJ227C е-14,075 км.

Табл.1

№	$E_{бат}$(V)	$I_{екв}$ (A)	t (sek)	S(m)	A (Wh/tkm)
1	80	103	80	562	102,86
2	80	104	80	563	103,05
3	80	104,5	80,1	562,5	103,36
4	78	105	80,2	563	101,44
5	78	106	80	563	102,40
6	78	106	80	563	102,40
7	76	107	80	562	100,54
8	76	108	80,1	563	101,66
9	76	109	80	563	102,6
10	74	110	80	563	100,82
11	74	111	80	563	101,73
12	74	112	80	562	102,65
13	72	114	80,1	563	101,66
14	72	115	80	562	102,37
15	72	116	80,2	562	103,44
16	70	117	80	562	101,44
17	70	118	80	562	102,12
18	70	120	80	562	103,85
19	70	121	80,2	562	104,90
20	69,5	122	80,3	563	105,02
21	69,5	124	80	563	106,74
22	67	127	80	563	105,39
23	67	129	80	563	107,05
24	67	131	80,1	563	108,71
25	67	133	80,2	563	110,37



Фиг.1



Фиг.2

Използвани съкращения:

А – автомобил, ЕМ – електромобил, АБ – акумулаторна батерия, СЕ – събирач на енергия (йонистори, супер кондензатори)

Литература

[1] Иоанесян А;В; Методы расчёта характеристик аккумуляторных батарей для электромобилей / Е.И.Суриц А.В;Иоанесян: // Материалы научно-методической и научно: исследовательской конференции МАЛИ
(ГТУ): -М., 2003. - С.29-36;

[2] Электрохимические конденсаторы компании «ЭСМА». Моск. обл., г.Троицк, ЗАО «ЭСМА», 1998.

[3] Адлер Ю.П,, Маркови Е.В., Грановский О.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. М.: Наука, 1971.

[4] Аль-Масуд Тауфик, Докучаев СВ., Петленко А.Б. и др. Индивидуальные транспортные средства с электроприводом и емкостным накопителем энергии

Автор: Чавдар Ангелов Джамбазки, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта” към ВТУ „Тодор Каблешков”

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** Проф. д-р инж. Л. Българанов