ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ
Том 68, книга 1, 2018

PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
Volume 68, Issue 1, 2018

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. дтн Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. дтн Елена ШОЙКОВА

членове

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

секретар-организатор

инж. Мая СТОЙЧЕВА

EDITORIAL BOARD

Editor -in -Chief

Prof. D.Sc. Emil NIKOLOV

Editor -in -Vice -Chief

Prof. D.Sc. Elena SHOYKOVA

Editors

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

Organizing Secretary

Eng. Maya STOYCHEVA

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

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

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

ISSN 1311-0829

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

форум
„ДНИ НА НАУКАТА НА ТУ-СОФИЯ“

IX-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2017“

11 - 14 септември 2017 г., Варна, "Св. св. Константин и Елена", България

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

председател

проф.	дтн	**Иван**	**Ячев**

научен секретар

доц.	д-р	**Николай**	**Матанов**

членове

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

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Forum
„DAYS OF SCIENCE OF TU-SOFIA“

IX-th CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING “EF 2017”

September 11 - 14, 2017, Varna, „St.st. Constantine and Elena“, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEE

chair of PC

Prof. DSc **Ivan Yatchev**

scientific secretary

Assoc. Prof. PhD **Nikolay Matanov**

members of PC

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

СЪДЪРЖАНИЕ том 68, книга 1 (2018)

1. **Валентин Колев, Ивайло Лазаров, Анка Жеглова** **15**
   Изследване влиянието на калаен диоксид върху свойствата на синтезиран бариев титанат

2. **Лилия Антонова, Петър Наков, Виктор Райчев** **23**
   Оценка на вида на дефекта по разпределението на частични разряди по фаза на захранващото напрежение

3. **Калоян Бурванов, Васил Захариев** **29**
   Метод и алгоритъм за определяне режима на максимално напрежение на опън в изолирани проводници за мрежи средно напрежение

4. **Калоян Бурванов** **39**
   Изследване термичната устойчивост на алуминиево-стоманени проводници при къси съединения в електрически мрежи за високо напрежение

5. **Димитър Богданов, Тефик Фърладжов** **49**
   Моделиране на електрическа мрежа с присъединени източници на възобновяема електрическа енергия със софтуер НеПлан

6. **Кристиан Кадиев, Веселина Трашлиева, Димо Стоилов** **59**
   Математически модел за оптимално оперираане на микромрежа

7. **Борислав Бойчев** **69**
   Влияние на ВЕИ върху сигурността на енергийната система на България

8. **Виктор Захариев** **75**
   Оптимизация на изчисленията за разпределителен трансформатор чрез автоматизация във FEMM с помощта на LUA скриптове

9. **Радослав Спасов, Пламен Ризов, Виктор Захариев, Цветомир Стоянов** **83**
   Разпределителни трансформатори за фотоволтаични електроцентрали с намотка ниско напрежение двоен зиг-заг

10. **Георги Димитров, Иван Петров** **91**
    Изследване на енергийната ефективност на товарните превози с локомотиви SIEMENS TAURUS в България

11. **Харалан Пенев** **101**
    Изследване на показателите на товаровите графици на предприятие от електротехническата промишленост

12. **Светлана Цветкова, Ангел Петлешков** **109**
    Изследване на характеристиките на електрическата енергия, произведена от фотоволтаична централа

13. **Борислав Бойчев, Ангел Пачаманов** **119**
    Добри практики за прилагане на фотоволтаици в жилищни и общински сгради

14. **Дери Торес, Иван Шарланджиев, Костас Цацакис, Уилфрид Утц, Иян Дънуел, Христос Малавазос, Джералд Вагенхофер, Акрайц Гобантес, Шишуан Жан и Александър Воденичаров** 125
Текущо състояние на проекта OrbEEt: инсталиране на устройства и наблюдение на енергийното потребление в общински сгради

15. **Захари Иванов, Борислав Бойчев** 135
Разработване на методика за определяне на коефициента на експлоатация при проектиране на вътрешни осветителни уредби

16. **Вълчан Георгиев** 143
Оптика за светодиоди

17. **Николай Матанов, Иван Ангелов** 149
Система за управление на светодиодни осветители за пътни тунели

18. **Валентин Гюров, Християн Панчев, Гинка Иванова** 155
Реализиране на теоретични и експериментални изследвания на светлотехническите параметри на LED източници на светлина за навигационно корабно осветление

19. **Валентин Гюров, Християн Панчев, Гинка Иванова** 163
Особености при проектирането реконструкцията на осветителната уредба на машинно отделение на контейнеровоз в съответствие с IACS no143/2013

20. **Камелия Николова, Ива Петринска, Димитър Павлов, Петя Джановска** 171
Влияние на възрастта върху въздействието от лъчения в синята част на спектъра при различни LED източници

21. **Петко Петков, Димитър Димитров, Гинко Ангелов** 181
Върху една възможност за определяне електрическите загуби в асинхронни двигатели в преходен режим на работа

22. **Цветомир Стоянов, Радослав Спасов, Пламен Ризов** 189
Оптимизиране размерите на ротора на синхронна машина с постоянни магнити

23. **Божидар Стоев** 197
Пулсации на момента на синхронни двигатели с постоянни магнити с неявнополюсна и явнополюсна конструкция при различни натоварвания

24. **Иван Петров, Иван Ангелов, Георги Димитров** 207
Изследване на предпоставките за откази в токоизправителите на електрически локомотив серия 61

25. **Димитър Богданов, Тони Димитров, Александра Хальясмаа, Станислав Ерошенко** 217
Изграждане на стенд за работа с модул за векторно измерване (PMU)

26. **Виктор Гърбев** 227
Технико-икономическа оценка на приложението на батерии за съхранение на електроенергия

27. Цветелина Богоева, Борислав Бойчев, Камен Матеев 235
Измерване на параметрите на елегаза и влияние върху изолационните му свойства

28. Михаела Славкова, Костадин Миланов, Минчо Минчев 241
Магнитомеханичен резонанс в тороидални магнитопроводи

29. Мехмет Шен, Йоско Балабозов, Кръстьо Хинов, Боян Иванов, Иван Ячев 249
Експериментално изследване на токови сензори базирани на ефекта на Хол

30. Йоско Балабозов, Кръстьо Хинов, Виктор Стаменов, Иван Ячев 255
Разработване на експериментална система за автоматизирано изследване на електромагнити

31. Захари Зарков, Владимир Лазаров, Людмил Стоянов, Иван Бачев, Борис Демирков . . . 263
Физическо моделиране на ветроенергийни преобразувателни системи със синхронни генератори с постоянни магнити

32. Людмил Стоянов, Захари Зарков, Владимир Лазаров, Ива Драгановска 273
Оценка на получената енергия от фотоволтаична централа

33. Людмил Стоянов, Захари Зарков, Владимир Лазаров, Валентин Миленов 283
Изпитване на фотоволтаични панели в лабораторни условия

34. Ива Драгановска 291
Производителност на фотоволтаични системи

35. Захари Иванов, Васил Станков 301
Проектиране на осветлението чрез въвеждане на естествена светлина в сгради с кухи тръбни светловоди

36. Йордан Шопов, Симона Петракиева 311
Апроксимация на кривата на относителната спектрална чувствителност на човешкото око

37. Васил Станков 317
Изпълнение на светловодни системи на различни видове покриви

38. Васил Димитров, Емилия Димитрова 325
Разработване на SCADA система за мониторинг и управление на енергийния процес в бизнес сграда - избор на елементи и устройства

39. Васил Димитров, Петко Костадинов 333
Софтуер за конфигурация и настройка на SCADA-система за мониторинг и управление на енергийния процес в бизнес-сграда

40. Васил Димитров, Гюлек Неджиб 339
Система за осигуряване на резервно електрозахранване на бизнес сграда

41. Васил Димитров 345
Дистанционно управление и мониторинг на аварийна дизел-агрегатна система в бизнес-сграда

42. Емилия Димитрова, Пламен Атанасов 351
Разработване на концепция за намаляване на риска при охрана на обекти с висока степен на защита

43. Татяна Радева **359**
Изследване на топлинно поле на лабораторна шинна система

44. Емил Мечков, Николай Стоименов **365**
Експериментално изследване прегряването на маслен разпредели-телен трансформатор

45. Димитрина Коева, Свилен Рачев, Любомир Димитров **375**
Анализ на работата на индукционни пещи със средна честота

46. Тодор Йонов **385**
Теглителни характеристики на трамвайна мотриса T8M-700 IT

47. Симона Петракиева **395**
Автоматично изчисляване на параметрите на линейни пасивни четириполюсници чрез използване на експериментални данни - част 2

CONTENTS volume 68, Issue 1 (2018)

1. Valentin Kolev, Ivaylo Lazarov, Anka Zheglova 15
Investigation of the Influence of Stannic Dioxide on the Properties of Synthesized Barium Titanat

2. Liliya Antonova, Petar Nakov, Victor Raychev 23
Evaluation of the Defects by the Distribution of Partial Discharges on the Phase of Power Supply Voltage

3. Kaloyan Burvanov, Vasil Zahariev 29
Method and Algorithm for Determining the Maximum Tensile Stress Regime of Covered Conductors in Medium Voltage Networks

4. Kaloyan Burvanov 39
Study of the Aluminium-Steel Conductors Thermal Withstand Capabilities Under Short Circuit Conditions in High Voltage Electrical Networks

5. Dimitar Bogdanov, Tefik Furladzov 49
Electrical Power Grid with Connected Renewable Sources of Electrical Energy Modeling with NePlan Software

6. Kristian Kadiev, Vesselina Trashlieva, Dimo Stoilov 59
Mathematical Model for Optimal Operation of a Microgrid

7. Borislav Boychev 69
Influence of Renewable Sources of the Security of the Energy System of Bulgaria

8. Victor Zahariev 75
Distributive Power Transformer Calculations Optimization in FEMM using LUA Script Automatization

9. Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Victor Zahariev, Tsvetomir Stoyanov 83
Distributive Transformer for Use in Photovoltaic Electrical Power Plants with Low Voltage Windings Placed in Zig-Zag Pattern

10. Georgi Dimitrov, Ivan Petrov 91
Research on the Energy Efficiency of the Freight Trains with SIEMENS TAURUS Locomotives In Bulgaria

11. Haralan Penev 101
Load Profile Parameters Study of a Factory from the Electrotechnical Industry

12. Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov 109
Study of the Electrical Energy Characteristics, Produced from Photovoltaic Station

13. Borislav Boychev, Angel Pachamanov 119
Good Practices for the Application of Photovoltaics in Housing and Municipal Buildings

14. Dery Torres, Ivan Sharlandzhiev, Kostas Tsatsakis, Wilfrid Utz, Ian Dunwell, Christos Malavazos, Gerald Wagenhofer, Arkaitz Gobantes, Shixuan Zhan and Alexandar Vodenicharov 125
Current Status of the Project OrbEEt: Tool Deployment and Monitoring of the Energy Consumption in Public Buildings Services

15. Zahari Ivanov, Borislav Bojchev 135
Determination of Maintenance Factors in Design Interior Lighting Installations

16. Vultchan Gueorgiev 143
LED Optics

17. Nikolaj Matanov, Ivan Angelov 149
System for the Management of LED Road Tunnel Lighters

18. Valentin Gurov, Hristian Panchev, Ginka Ivanova 155
Realization of Theoretical and Experimental Research on LED's Parameters for Navigation Lighting in Ships

19. Valentin Gyurov, Hristian Panchev and Ginka Ivanova 163
Special Features in The Design of Reconstruction of the Lighting System in Engine Room of Container Ship in Accordance with IACS No143/2013

20. Kamelia Nikolova, Iva Petrinska, Dimitar Pavlov, Petya Djanovska 171
Aging of the Human's Ocular Media and Blue Light Effects from Different LED Sources

21. Petko Petkov, Dimitar Dimitrov, Ginko Angelov 181
On a Possibility for Determining Electric Losses in Induction Motors in Transitional Operation Mode

22. Tsvetomir Stoyanov, Radoslav Spasov, Plamen Rizov 189
Optimization of the Rotor's Sizes of Permanent Magnet Synchronous Machine

23. Bozhidar Stoev 197
Torque Ripples of Permanent Magnet Synchronous Motors with Non-salient and Salient-Pole Rotor Configuration at Different Loads

24. Ivan Petrov, Ivan Angelov, Georgi Dimitrov 207
Research on the Failures in the Rectifiers of the Electric Locomotive Series 61

25. Dimitar Bogdanov, Toni Dimitrov
Alexandra I. Khalyasmaa, Stanislav A. Eroshenko 217
Design of Laboratory Test System for Experimental Work with Phasor Measurement Unit (PMU)

26. Viktor Garbev 227
Techno-Economic Assessment In Implementing Battery Electricity Storage

27. Tsvetelina Bogoeva, Borislav Boychev, Kamen Mateev 235
Measurement of Sf6 Parameters and Impact on its Insulation Properties

28. Michaela Slavkova, Kostadin Milanov, Mintcho Mintchev 241
Magnetomechanical Resonance in Toroidal Cores

29. Mehmet Sen, Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Boyan Ivanov, Ivan Yatchev 249
Experimental Study of Current Sensors Based on the Hall Effect

30. Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Viktor Stamenov, Ivan Yatchev 255
Development of Experimental System for Automated Study of Electromagnets

31. Zahari Zarkov, Vladimir Lazarov, Ludmil Stoyanov, Ivan Bachev, Boris Demirkov 263
Physical Modeling of Wind Energy Conversion Systems with Permanent Magnet Synchronous Generators

32. Ludmil Stoyanov, Zahai Zarkov, Vladimir Lazarov, Iva Draganovska 273
Assessment of the Energy Yield from Photovoltaic Power Plant

33. Ludmil Stoyanov, Zahari Zarkov, Vladimir Lazarov, Valentin Milenov 283
Study of Photovoltaic Panels in Laboratory Conditions

34. Iva Draganovska 291
Production of Photovoltaic Power Plants

35. Zahari Ivanov, Vasil Stankov 301
Lighting Design by Introducing Natural Light in the Building with Hollow Tubular Light Guide

36. Yordan Shopov, Simona Petrakieva 311
Approximation the Curve of the Relative Spectral Sensitivity of Human Eye

37. Vasil Stankov 317
Implementation of Tubular Daylighting Systems of Different Types of Roof

38. Vasil Dimitrov, Emiliya Dimitrova 325
Development of SCADA System for Energy Process Monitoring and Control in Business Center - Selection of Elements and Devices

39. Vasil Dimitrov, Petko Kostadinov 333
Software for Configuration and Setting of SCADA System for Energy Process Monitoring and Control in Business Center

40. Vasil Dimitrov, Gyulek Nedzhib 339
System for Providing Backup Power Supply of Business Center

41. Vasil Dimitrov 345
Remote Management and Monitoring of an Emergency Diesel-Aggregate System in Business Center

42. Emiliya Dimitrova, Plamen Atanasov 351
Development of a Concept to Reduce The Risk at Protection of Objects with High Degree of Security

43. Tatyana Radeva 359
Thermal Field Analysis of Laboratory Busbar System

44. Emil Mechkov, Nikolay Stoimenov 365
Experimental Temperature Rise Investigation of an Oil-Immersed Distribution Transformer

45. Dimitrina Koeva, Svilen Rachev, Lyubomir Dimitrov 375
Analysis of Medium Frequency Induction Furnaces Operation

46. Todor Yonov 385
Calculation Traction Characteristics of Trams T8M-700 IT

47. Simona Petrakieva 395
Automatic Calculation of the Parameters of Linear Passive Two-Port Networks by the Use Of Experimental Data - Part 2

Author's Index - Volume 68, Issue 1

№	author	article page
1.	Alexandar Vodenicharov	125
2.	Alexandra Khalyasmaa	217
3.	Angel Pachamanov	119
4.	Angel Petleshkov	109
5.	Anka Zheglova	15
6.	Arkaitz Gobantes	125
7.	Boris Demirkov	263
8.	Borislav Bojchev	69, 119,135, 235
9.	Boyan Ivanov	249
10.	Bozhidar Stoev	197
11.	Christos Malavazos	125
12.	Dery Torres	125
13.	Dimitar Bogdanov	49, 217
14.	Dimitar Dimitrov	181
15.	Dimitar Pavlov	171
16.	Dimitrina Koeva	375
17.	Dimo Stoilov	59
18.	Emil Mechkov	365
19.	Emiliya Dimitrova	325, 351
20.	Georgi Dimitrov	91, 207
21.	Gerald Wagenhofer	125
22.	Ginka Ivanova	155, 163
23.	Ginko Angelov	181
24.	Gyulek Nedzhib	339
25.	Haralan Penev	101
26.	Hristian Panchev	155, 163
27.	Ian Dunwell	125
28.	Iosko Balabozov	255, 249
29.	Iva Draganovska	273, 291
30.	Iva Petrinska	171
31.	Ivan Angelov	149, 207
32.	Ivan Bachev	263
33.	Ivan Petrov	91, 207
34.	Ivan Sharlandzhiev	125
35.	Ivan Yatchev	249, 255
36.	Ivaylo Lazarov	15
37.	Kaloyan Burvanov	23, 39
38.	Kamelia Nikolova	171
39.	Kamen Mateev	235
40.	Kostadin Milanov	241
41.	Kostas Tsatsakis	125
42.	Krastyo Hinov	249, 255
43.	Kristian Kadiev	59
44.	Liliya Antonova	23
45.	Ludmil Stoyanov	263, 273, 283
46.	Lyubomir Dimitrov	375
47.	Mehmet Sen	249
48.	Michaela Slavkova	241
49.	Mintcho Mintchev	241
50.	Nikolaj Matanov	149
51.	Nikolay Stoimenov	365
52.	Petar Nakov	23
53.	Petko Kostadinov	333
54.	Petko Petkov,	181
55.	Petya Djanovska	171
56.	Plamen Atanasov	351
57.	Plamen Rizov	83, 189
58.	Radoslav Spasov	83, 189
59.	Shixuan Zhan	125
60.	Simona Petrakieva	311, 395
61.	Stanislav Eroshenko	217
62.	Svetlana Tzvetkova	109
63.	Svilen Rachev	375
64.	Tatyana Radeva	359
65.	Tefik Furladzov	49
66.	Todor Yonov	385
67.	Toni Dimitrov	217
68.	Tsvetelina Bogoeva	235
69.	Tsvetomir Stoyanov	83, 189
70.	Valentin Gurov	155, 163
71.	Valentin Kolev	15
72.	Valentin Milenov	283
73.	Vasil Dimitrov	325, 333, 339, 345
74.	Vasil Stankov	301
75.	Vasil Stankov	317
76.	Vasil Zahariev	29
77.	Vesselina Trashlieva	59
78.	Victor Raychev	23
79.	Victor Zahariev	75, 83
80.	Viktor Garbev	227
81.	Viktor Stamenov	255
82.	Vladimir Lazarov	263, 273, 283
83.	Vultchan Gueorgiev	143
84.	Wilfrid Utz	125
85.	Yordan Shopov	311
86.	Zahari Ivanov	135, 301
87.	Zahai Zarkov	263, 273, 283

PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 68 Issue 1 (2018)

pages	articles	authors
402	47	87

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА КАЛАЕН ДИОКСИД ВЪРХУ СВОЙСТВАТА НА СИНТЕЗИРАН БАРИЕВ ТИТАНАТ

Валентин Колев, Ивайло Лазаров, Анка Жеглова

Резюме: *В работата е изследвано влиянието на 0.05 и 0.1mol% калаен диоксид SnO_2 върху свойствата на синтезиран бариев титанат. Изследвани са зависимостите на относителното свиване, плътността и относителната диелектрична проницаемост от температурата на спичане. Получени са температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост. Резултатите показват, че при добавянето на 0.1mol%SnO_2 се получават по-високи стойности за относителната диелектрична проницаемост при ниски температури на спичане и ясно изразени фазови преходи в температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост. Температурата на Кюри е при стайна температура и за двата изследвани състава, с изключение на материалите от легиран с 0.05mol%SnO_2 бариев титанат, спечени при температура 1250^oC.*
Ключови думи: *бариев титанат, калаен диоксид, относителна диелектрична проницаемост*

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF STANNIC DIOXIDE ON THE PROPERTIES OF SYNTHESIZED BARIUM TITANAT

Valentin Kolev, Ivaylo Lazarov, Anka Zheglova

Abstract: *In the work are investigated the influence of 0.05 and 0.1mol% stannic dioxide SnO_2. The dependencies of the relative shrinkage, the density and the dielectric permittivity on the temperature of synthesized have been obtained. The temperature dependencies of the relative permittivity have been obtained at different temperature of synthesized. The experimental results showed that added of 0.1mol%SnO_2 shifting the phase transition and Curie temperature at room temperature. The higher values for the relative permittivity were obtained for the ceramic materials doped with 0.1mol%SnO_2 synthesized by low temperature.*
Keywords: *barium titanate, stannic dioxide, relative permittivity*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Бариевият титанат е един от най-изследваните сегнетоелектрични материали, поради отличните си свойства и високи стойности за относителната диелектрична проницаемост при стайна температура. Той е типичен сегнетоелектричен

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

материал с температура на Кюри в диапазона 120-130°C, имащ първоскитна тетрагонална структура при стайна температура. При загряване над температурата на Кюри, бариевият титанат преминава от сегнетоелектрична в параелектрична фаза и структурата му се променя от тетрагонална в кубична. Характерно за бариевият титанат е, че при кубична структура той показва положителен температурен коефициент на съпротивлението, което го прави подходящ за изработване на позистори [1]. Керамика на основата на бариев е широко използвана за изработване на термистори [2], многослойни кондензатори (MLCC)[3], устройства за съхраняване на електрическа енергия [4], микровълнови устройства [5], електроакустични преобразуватели [6] и др.

Едно от направленията при изследване на бариев титанат $BaTiO_3$ е изменеието на свойствата му чрез добавяне на различни по вид и количество легиращи добавки като: Sr^{2+}[7], Pb^{2+}[8], Yb^{2+}[9], Ca^{2+}[10] и др..

При легиране на бариев титанат могат да бъдат модифицирани температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост, както и други свойства, като плътност, тангенс от ъгъла на диелектричните загуби, промяна на температурата на Кюри и др.

Цел на настоящата работа е да се изследва влиянието на 0.05 и 0.1 mol% калаен диоксид върху свойствата на предварително синтезиран бариев титанат.

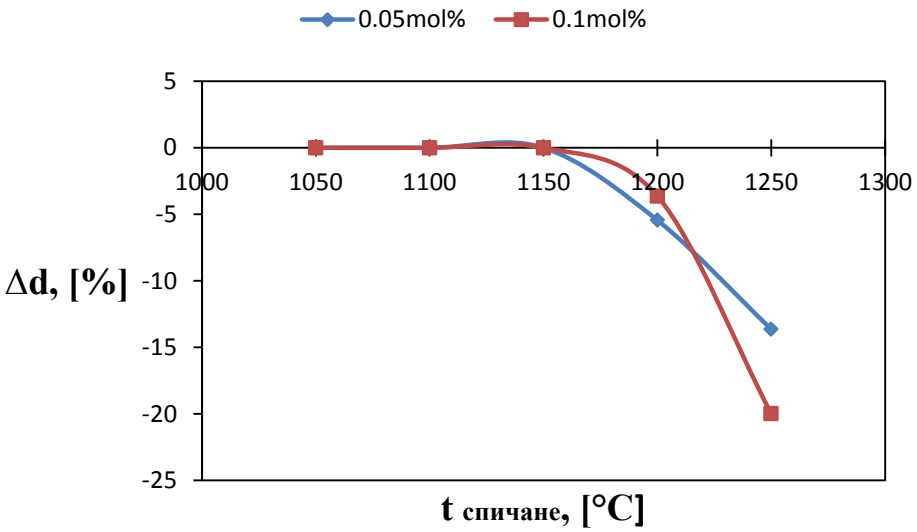
2. ИЗСЛЕДВАНИ СЪСТАВИ

Изследваните сегнетокерамични материали са получени по стандартна керамична технология, като е използван готов синтезиран бариев титанат с чистота 99.9% и легираща добавка от 0.05 и 0.1mol% SnO_2, с чистота 99.8%. След притегляне на необходимите количества от изходните компоненти се хомогенизират и смилат за 4 часа в планетарна мелница в 3% воден разтвор на половинилов алкохол. След изсушаване и гранулиране на изследваните състави, чрез пресуване се оформят образците под формата на дискове с дебелина 1-3mm и диаметър 11mm. Спичането е проведено при пет различни температури – 1050, 1100, 1150, 1200 и 1250°C за 2h във въздушна среда. След механична обработка се нанася сребърна паста за получаване на електроди, необходими за измерване на електрическите характеристики. Използваната сребърна паста съдържа сребърен диоксид и пластификатор. Спичането на пастата се извършва при температура 900°C за 1h.

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

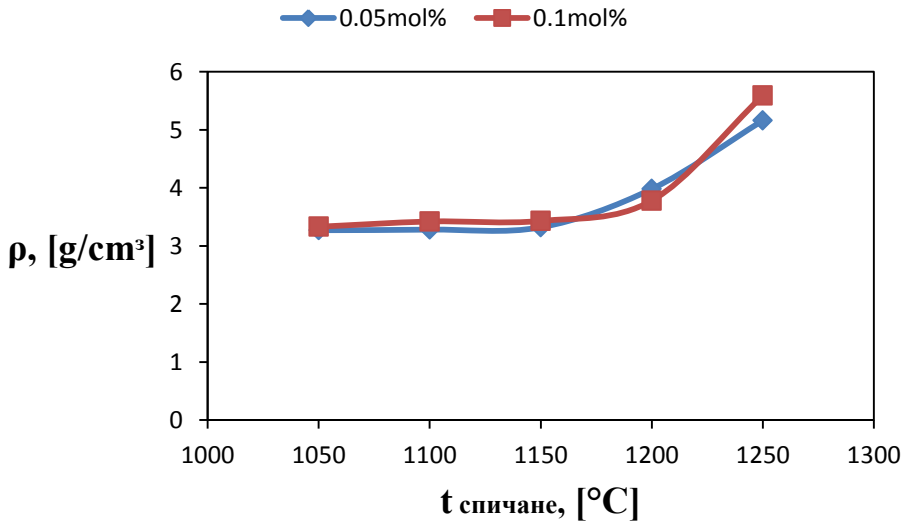
Изследвано е относителното свиване от температурата на спичане (фиг.1). При ниски температури на спичане (1050÷1150°C) не се наблюдава изменение на относителното свиване и при двете количества легираща добавка от калаен диоксид. При температури на спичане 1200 и 1250°C се наблюдава свиване за материалите и от двата изследвани състава, което показва по - пълно протичане на

твърдофазна реакция. Най-голямо е относителното свиване за материали от легиран с 0.1 mol% SnO_2 бариев титанат при температура на спичане 1250°C.



Фиг.1. Зависимост на относителното свиване от температурата на спичане за синтезиран $BaTiO_3$, легиран с 0.05 и 0.1mol%SnO_2 .

Получените зависимости на плътността от температурата на спичане за изследваните материали са показани на фиг.2.

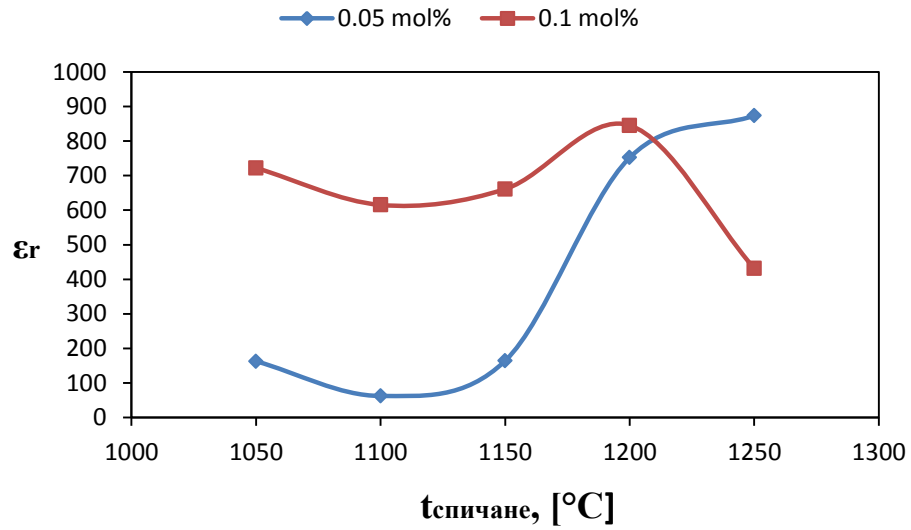


Фиг.2. Зависимост на плътността от температурата на спичане за синтезиран $BaTiO_3$, легиран с 0.05 и 0.1 mol%SnO_2

С повишаване на температурата на спичане, плътността на изследваните материали нараства. Получените стойности за плътността са близки и за двата изследвани състава. По-високи стойности за плътността са получени за образците от синтезиран бариев титанат, легирани с 0.1mol%SnO_2, при температура на спичане 1250°C.

4. ЗАВИСИМОСТ НА ОТНОСИТЕЛНАТА ДИЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИЦАЕМОСТ ОТ ТЕМПЕРАТУРАТА НА СПИЧАНЕ

Изследвана е зависимостта на относителната диелектрична проницаемост (ε_r) за изследваните керамични материали от температурата на спичане (фиг.3). За материалите от синтезиран $BaTiO_3$, легиран с 0.1mol%SnO_2 се получават по-високи стойности за относителната диелектрична проницаемост за температури на спичане от 1050 до 1150°C в сравнение с материали от легиран с 0,05mol%SnO_2. При ниски температури на спичане, стойностите за относителната диелектрична проницаемост за материали от легиран с 0.1mol%SnO_2, синтезиран бариев титанат са значително по-високи от тези за материали от легиран с 0.05mol%SnO_2 бариев титанат.



Фиг.3. Зависимости на относителната диелектрична проницаемост ε_r от температурата на спичане за синтезиран $BaTiO_3$, легиран с 0.05 и 0.1mol%SnO_2

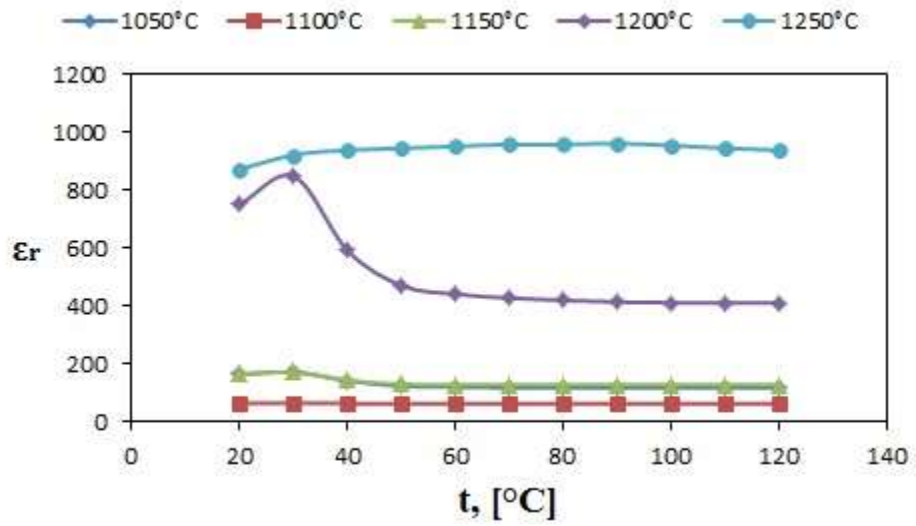
При температура на спичане 1250°C, се получават по-високи стойности за относителната диелектрична проницаемост ε_r за материали от легиран с 0.1mol%SnO_2 бариев титанат. При същата температура на спичане се получават ниски стойности за ε_r за материали от легиран с 0.1mol%SnO_2 бариев титанат в сравнение с останалите температури на спичане. От показаните резултати е видно, че добавянето на 0.1mol%SnO_2 към синтезиран $BaTiO_3$ понижава температурата на синтез.

5. ТЕМПЕРАТУРНИ ЗАВИСИМОСТИ НА ОТНОСИТЕЛНАТА ДИЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИЦАЕМОСТ

Изследвани са температурните зависимости на относителната диелектрична проницаемост за образци от легиран с 0.05mol% SnO_2 бариев титанат, спечени при различни температури.

Най-високи стойности за относителната диелектрична проницаемост се получават при температура на спичане 1250°C. При тази температура на спичане не се наблюдава ясно изразен максимум на температурната зависимост на относителната диелектрична проницаемост. Фазов преход се наблюдава при температура на спичане 1200°C. от една страна за останалите температури на спичане се получават ниски стойности за ε_r, а от друга не се наблюдава ясно изразен фазов преход.

Температурата на Кюри е в областта на стайната.Изключение се получава за материалите спечени при температура 1250°C (Tc =89°C).



Фиг.4. Температурни зависимости на относителната диелектрична проницаемост за материали 0.95mol%$BaTiO_3$ + 0.05 mol%SnO_2, спечени при различни температури.

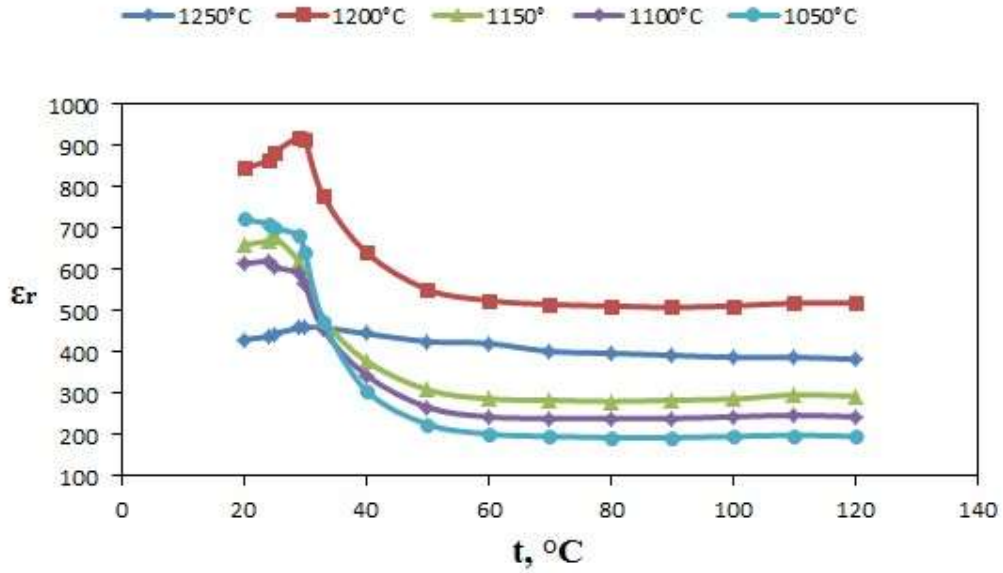
В табл.1 са представени максималните стойности за относителната диелектрична проницаемост и температурата на Кюри при различни температури на спичане за материали от легиран с 0.05mol%SnO_2.

Таблица 1

$t_{спичане}$,[°C]	1050	1100	1150	1200	1250
Температура на Кюри,[°C]	32	40	31	31	89
ε_r	171	62	169	865	962

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

От представените температурни зависимости за относителната диелектрична проницаемост се вижда, че най-високи стойности за ε_r се получават за материалите, спечени при температура 1200°C. Температурата на Кюри се намира в областта на стайната температура, като най – силно изразен фазов преход има при температура на спичане 1200°C. При останалите температури на спичане, стойностите на относителната диелектрична проницаемост са по- ниски и се наблюдава наличието на размит фазов преход.



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

В табл.2 са показани получените максимални стойности за ε_r и температурата на Кюри за материали от легиран с 0.1mol%SnO_2 бариев титанат, спечени при различни температури.

Таблица 2

$t_{спичане}$,[°C]	1050	1100	1150	1200	1250
Температура на Кюри,[°C]	24	24	25	29	33
ε_r	732	620	680	922	460

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получени и изследвани са сегнетокерамични материали на основата на предварително синтезиран бариев титанат с добавяне на легираща добавка от 0.05 и 0.1 mol% калаен диоксид SnO_2. Целта е да се установи влиянието на легиращата добавка върху свойствата на керамиката. Могат да се направят следните изводи:

- При ниски температури на спичане не се наблюдава относително свиване за материалите и от двата изследвани състава. При високи температури на спичане се наблюдава свиване на керамиката, като по-високи са стойностите за материалите с добавка 0.1mol%SnO_2;
- Получените стойности за плътността са близки и за двата изследвани състава;
- Фазовият преход и температурата на Кюри са изместени към температури близки до стайната. Изключение се наблюдава материалите от легиран с 0.05mol%SnO_2 синтезиран бариев титанат, спечени при температура 1250°C;
- За материали от двата изследвани състава, спечени при температура 1200°C се наблюдава ясно изразен фазов преход. Точката на Кюри за тези материали е при стайна температура;
- При ниски температури на спичане се получават по-високи стойности за относителната диелектрична проницаемост за материали от легиран с 0.1 mol%SnO_2 синтезиран бариев титанат;

ЛИТЕРАТУРА

[1] Devi S., Jain S, Jha A.K. Effect of sintering temperature on dielectric properties of tungsten doped barium titanate, Applications of Ferroelectrics, ISAF 2008. 17th IEEE International Symposium, Vol.1, 2008, pp.1-5

[2] Shi-Mei S.U., Liang-Ying Zhang, Hong-Tao Sun, Xi Yao. Preparation of porous $BaTiO_3$ PTC thermistors by adding graphite porosifiers, Journal of the American Ceramic Society, 77(8), 1994, pp.2154-2156

[3] Moulson A.J., Herbert J.M. Electroceramics: Dielectrics and Insulations, Wiley, 2003, pp.243

[4] Wu T., Pu Y, Gao P, Liu D. Influence of Sr/Ba ratio on the energy storage properties and dielectric relaxation behaviors of strontium barium titanate ceramics. Journal Material Science, Vol. 24, 2013, pp.4105-4112

[5] Nenasheva E.A., Kanareykin A.D, Kartenko N.F, Dedyk A.I, Karmanenko S.F. Ceramics Materials Based on (Ba,Sr)TiO3 Solid Solutions for Tunable Microwave Devices. Journal Electroceramic, Vol.13, 2004, pp. 235-238.

[6] Gallego-Juarez J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Volume 22 (10), 1989, pp. 804-816

[7] Mudinepalli V.R., Feng L, Wen-Chin Lin, Murty B.S. Effect of grain size and ferroelectric properties of nanostructured $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ ceramics, Journal of Advanced Ceramics, Vol.4, 2015, pp. 46-53

[8] Yoshito I., Shimada S, Takahashi J, Inagaki M. Phase transition of $BaTiO_3$–$Ba_{1-x}Pb_xTiO_3$ composite particles prepared by the molten salt method, Journal of Material Chemistry, Vol. 7, 1997, pp. 781-785

[9] Elbasset A., Mrharrab L, Sayouri S. Dielectric properties of Ytterbium Yb^{2+} substituted barium titanate synthesized by sol-gel method, Journal of materials and Environment Sciences, Vol.8, 2017, pp. 520-525

[10] Kadira L., Elmesbahi A, Sayori S. Dielectric study of calcium doped barium titanate $Ba_{1-x}Ca_xTiO_3$ ceramics, International Journal of Physical Sciences, Vol.11, 2016, pp. 71-79

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

Постъпила на 15.12.2017г. **Рецензент**: проф. д-р Петър Наков

EVALUATION OF THE DEFECTS BY THE DISTRIBUTION OF PARTIAL DISCHARGES ON THE PHASE OF POWER SUPPLY VOLTAGE

Liliya Antonova, Petar Nakov, Victor Raychev

Abstract: *The distribution of the partial discharges by phase of the supply voltage assists in determining the type of defect and its localization, thus assessing the state of electrical isolation. The article discusses the patterns of partial discharge distribution and the recognition of various types of defects.*
Keywords: *Distribution of partial discharge, Phase-resolved partial discharge, statistical distribution*

1. INTRODUCTION

Partial discharges affect electrical insulation by destroying its molecules at the point of occurrence. The discharge intensity is formed by the applied voltage and the shape of the electrodes (the equability of the electric field). The place of influence of the partial discharges and their intensity determine the time of destruction and the occurrence of dendrites, a breakthrough trace.

It is especially important to determine the type of discharge (avalanche - 250 pC, striped - 2500 pC or leader > 10 nC) and the type of electrical insulation it is attacking. For polymeric insulations, the development of dendrites to breakthrough is from 1 to 2 years at partial discharges with an apparent charge of 50 ÷ 100 pC, and for mica insulations the discharges do not practically destroy the mica layer with an apparent charge of 1 ÷ 2 nC.

Partial discharges may occur in:

- a practically stable electric field in the electrical insulation - partial discharges in the volume of the electrical insulation;
- unstable electric field with high capacity - partial discharge on the surface;
- unstable low-capacity electric field - partial discharges of floating potential elements;
- highly unstable electric field - corona;
- a practically stable electric field between metal electrodes - partial discharges between metal parts - contact joints, free potential electrodes;
- partial discharges from other electrical equipment that generate electrical noise and electrical noise in switching processes.

2. METHODS FOR PARTIAL DISCHARGE RECOGNITION

In recent years, many researches have been carried out and a number of algorithms have been developed to automatically detect the signal of a separate partial discharge

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

of a given set of signals. The learning algorithm in the recognition process is a key factor for each method of classifying the discharge type. Preliminary information on the resistance of electrical insulation in the influence of partial discharges is essential to predict the resource of the electrical equipment.

Methods are being developed to determine the type of partial discharge sources, by statistical analysis of the distribution of partial discharges, by the phase of the supply voltage.

3. PARTIAL DISCHARGE ANALYSIS OVER THE SUPPLY VOLTAGE PHASE

The analysis begins by recording partial discharge signals measured by sensors and measuring devices with a wideband frequency range.

This analysis is based on the intensity of partial discharges which requires standardized measurement schemes to be used to compare the measurement results.

The main problems of the method of analysis are:

- the presence of electrical noise;
- multiple defects that cause partial discharges of the same size.

4. MODELS OF PARTIAL DISCHARGES FOR FOUR DIFFERENT TYPES OF DEFECTS

4.1 Corona discharge

These are discharges occurring near blades. They occur from high voltage elements or grounded parts.

If the blade is associated with a high potential, the Trichel impulses appear around the peak of the negative half cycle of the operation voltage. In the case of the ground side, the impulses of Trichel are in the positive half cycle of the operation voltage (Fig. 1).

The amplitude of the negative corona discharge is practically constant (see the monograph "Разряди" for more detail [1]).

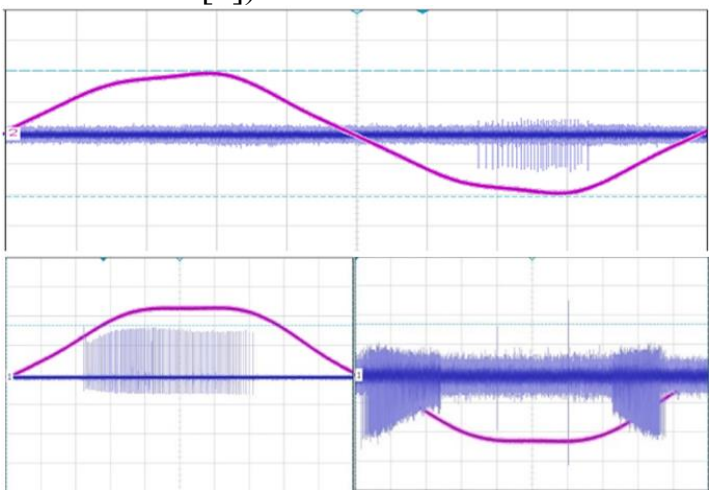


Fig. 1. Typical distribution of partial discharges by phase of the supply voltage from the point in the air for two voltage values

4.2 Partial discharges in the volume of electrical insulation

In Fig. 2, the internal partial discharges occur in the positive and the negative half-cycles, and the amplitude of the signal is statistically the same.

There may be differences between the magnitude of the discharge at the positive and the negative half-period depending on the geometry and the location of the defect.

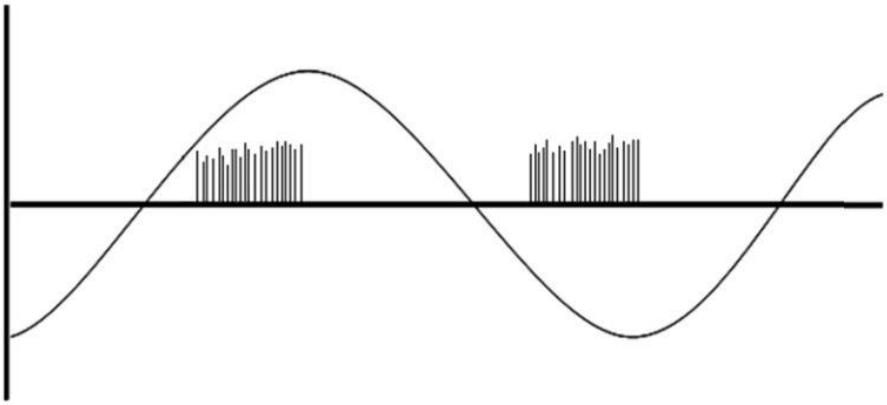


Fig. 2. Typical distribution of partial discharges by phase of supply voltage for internal discharge [2]

4.3Partial discharges on the dielectric surface

Fig. 3 illustrates that the amplitude of the partial discharges are changing and they appear shortly before the zero values of the operating voltage. Depending on the shape of the electrodes, the amplitudes in both positive and negative polarity are different.

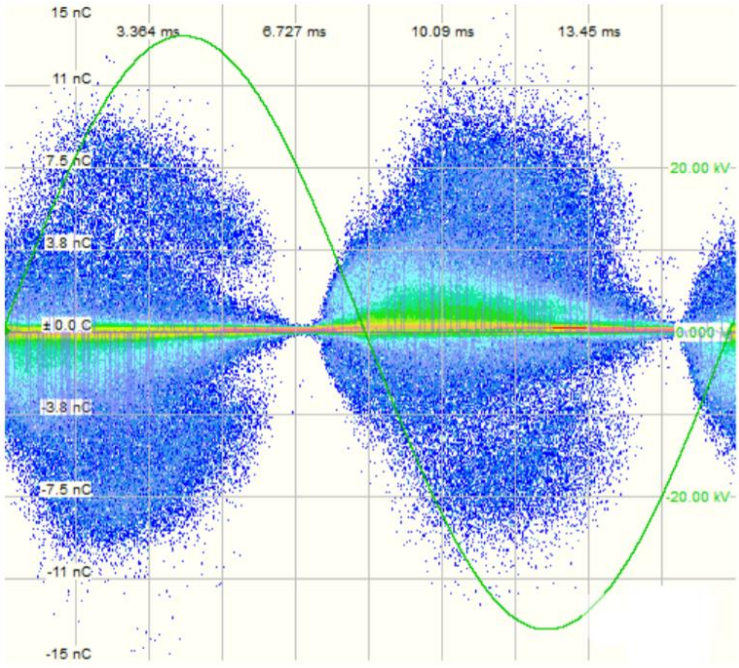


Fig. 3. Typical distribution of partial discharges per phase of supply voltage of discharges on the surface of electrical insulation

4.4 Partial discharge in a practically stable electric field

Partial discharges occur with approximately the same amplitude and their number is

small, up to 5-10 pulses for a half-period in the positive and negative half of the operating voltage (Fig.4).

The amplitudes of the partial discharge pulses depend on the magnitude of the defect longitudinally of the electrical insulation, and the apparent charge is larger for a larger area of the defect walls (greater capacity), perpendicular to the intensity of the electric field. The number of impulses increases at higher impulse voltage.

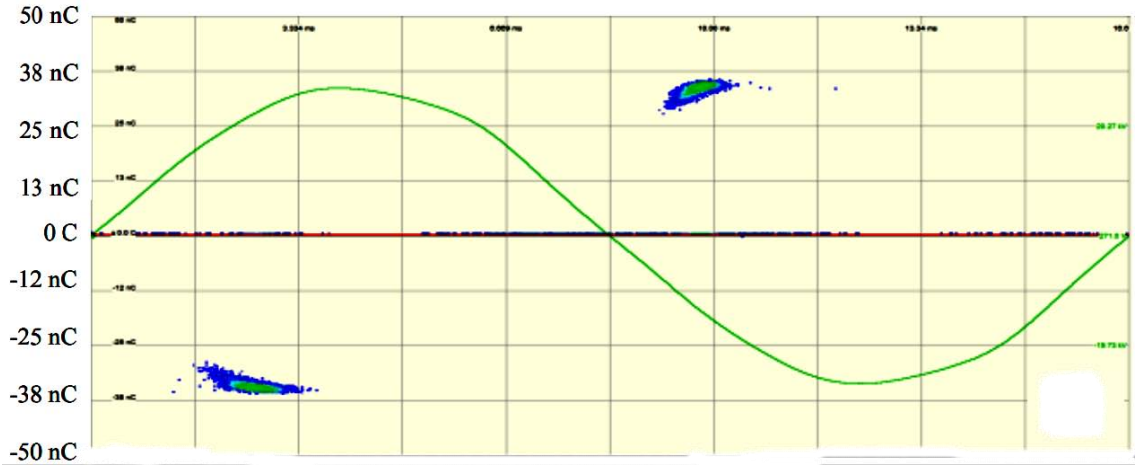


Fig. 4. Typical distribution of partial discharges over the phase of the supply voltage in a practically stable electric field

4.5Statistical distribution of a group of defects

Fig. 5 shows a record of measurement of a partial discharge of a three-phase transformer 400/110 kV.

Typical distributions of defects in a practically equal electric field and one source of surface discharges are observed.

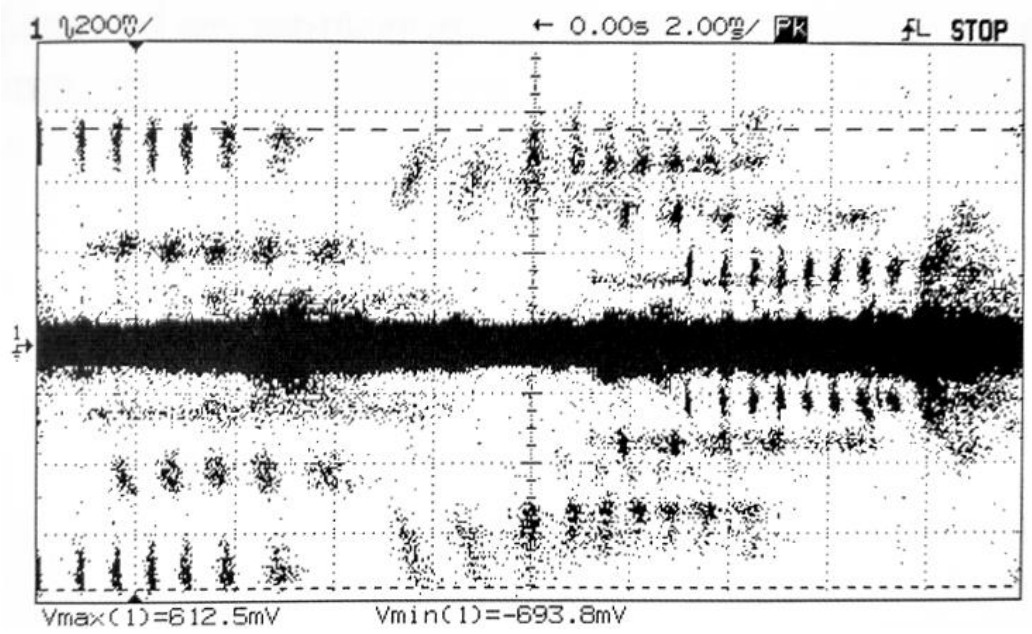


Fig. 5. Statistical phase distribution of the operating voltage of a three-phase power transformer [1]

5. TYPICAL STATISTICAL DISTRIBUTIONS

5.1 Partial discharge in an unstable field

It occurs with different amplitude in the positive and negative half-periods, but practically the same for each half-cycle. When the voltage increases, first appear pulses with small amplitude in a half-cycle and their number is large, over 50 pulses for a half-period. At a higher voltage value, pulses with 10 times greater amplitude appear in the other half of the voltage, but their numbers are 20-50 for a half-period. The partial discharge phase is in the range of 80-90 electrical degrees for the positive half-period and 260-280 for the negative half-period. When the voltage increases, the number and phase of the partial discharges change and the amplitude does not change substantially.

Type of defect: corona discharge in high voltage conductor or sharp metal grounded part; a blade penetration into a solid insulation or an unshielded sharp object in liquid insulation in a zone of great potential.

5.2 Discharge on dielectric surface

The amplitude of partial discharges changes over the phase of the operating voltage. As in the previous case there is a difference in amplitudes in the two half-periods of the voltage. The partial discharge waveform is different for the same defect because the stream discharge can develop into a leader for the high-intensity field of the electric field.

Type of defect: discharge on the surface of bushing insulators, cable joints, at the outlet of a form-wound stator coil from stator slot.

5.3 Discharges between contact surfaces

Fig. 5 shows a statistical distribution of phase-resolved partial discharge of applied voltage between electrodes in oil. The great proximity between the electrodes creates partial discharges with practically stable, equal amplitude in the two half-periods of the operating voltage. The number of pulses is the same, but they have less statistical dissipation (dispersion) in both amplitude and voltage phase.

Type of defect: Worn contact surface of switchgear, poor connection of electrostatic screens to grounding loop, floating potential electrodes, cracked weld of soldered conductive parts, interwoven short circuits, etc.

6. CONCLUSION

1. Determining the defect in the distribution of the partial discharges by phase of the supply voltage is a developing method that enables the impact of defects in electrical machines to be assessed without being decommissioned.
2. By applying the method it is possible to monitor the development of the defect / defects.
3. Provides for predicting the residual resource of the facilities.

REFERENCES

[1] Наков, П.: Разряди, 2017

[2] Bergius, Ossi: Implementation of On-line Partial Discharge Measurements in Medium Voltage Cable Network, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology 2011

Authors: Liliya Antonova, M. Eng., PhD student, Faculty of Electrical Engineering , Technical University of Sofia; **Petar Nakov**, Prof. PhD Eng., Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia; E-mail address: *pnakov@tu-sofia.bg* **; Victor Raychev**, M. Eng., Scientific and research sector, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia

Received 15 December 2017 **Reviewer:** Prof. PhD Valentin Kolev

МЕТОД И АЛГОРИТЪМ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ РЕЖИМА НА МАКСИМАЛНО НАПРЕЖЕНИЕ НА ОПЪН В ИЗОЛИРАНИ ПРОВОДНИЦИ ЗА МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Калоян Бурванов, Васил Захариев

Резюме: *За подобряване на сигурността на работа на въздушните електрически мрежи за средно напрежение в практиката на много страни се използват изолирани проводници и кабели. Те имат конструктивни особености и технически параметри, които изискват специфичен подход при електромеханичното им оразмеряване. В настоящия доклад е разработен универсален алгоритъм за търсене на изходния оразмерителен режим и са проведени примерни изчисления. Предложен е обобщен количествен критерий за определяне режима на максимално напрежение на опън. Изследвани са основните фактори, зависимости и технически съображения, влияещи върху електромеханичното оразмеряване на въздушни линии с изолирани проводници. Представени са примерни резултати от изчисления.*
Ключови думи: *изолирани проводници, избор на изходен оразмерителен режим;*

METHOD AND ALGORITHM FOR DETERMINING THE MAXIMUM TENSILE STRESS REGIME OF COVERED CONDUCTORS IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS

Kaloyan Burvanov, Vasil Zahariev

Abstract*: To improve the operational safety of medium voltage power grids, covered conductors and cables are used in many countries. They have constructive features and technical parameters that require a specific approach in their electromechanical dimensioning. In this report has been developed a universal algorithm for the searching if initial dimensional regime and sample calculations have been performed. A quantitative criterion for determining the maximum tensile stress regime is proposed. The main factors, dependencies and technical considerations influencing the electromechanical dimensioning of covered conductors for overhead lines are studied. Sample calculation results are provided.*
Keywords: *covered conductors, initial regime selection;*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съгласно Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии [4] във въздушните електропроводни линии (ВЕЛ) за средно напрежение (Ср.Н) могат да се използуват два вида изолирани токопроводящи сис-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

теми: въздушни линии с изолирани проводници (ВЛИП) и въздушни кабелни линии (ВКЛ). Първите се изпълняват с единични изолирани проводници за всяка фаза (известни като SAX проводници), вторите - с три еднофазни кабела, окачени на изолирано носещо въже.

Използването на ВЛИП и ВКЛ в мрежите за Ср.Н позволява значително да се намали разстоянието между фазовите проводници и кабели помежду им и спрямо носещите конструкции. Наличието на изолация изключва възможността от възникване на късо или земно съединение при допир между проводниците или между тях и заземени части.

Използването на изолирани токовопроводящи системи се препоръчва за:

- индустриални и вилни зони, крайградски паркове и места за почивка при въвода на линии в централните части на села и малки градове;
- гористи местности, овощни градини, залесени места с ценни дървесни видове, резервати и други защитени зони, земеделски земи с интензивно пръсково напояване;
- зони с интензивно ледообразуване;
- временно електроснабдяване на обекти при преминаване на електропровода в близост до строителната площадка.

Механичното оразмеряване на въздушните електропроводи с изолирани токопроводящи системи и арматурата за тях трябва да се извършва в съответствие с изискванията на [4].

Поради конструктивните си особености, поведението на ВЛИП и ВКЛ при различни електромеханични товарови режими се различават от това на масово използваните алуминиево-стоманени такива. Това налага специфичен подход при тяхното електромеханично оразмеряване. Изборът на изходен оразмерителен режим е обект на настоящото изследване.

В статията е разработен универсален алгоритъм и са проведени примерни изчисления за търсене на оразмерителния режим на максимално напрежение на опън при произволен брой възможни изходни режими. Получен е обобщен количествен критерий за определяне на изходния режим. Изследвани са основни фактори, зависимости и технически съображения влияещи върху електромеханичното оразмеряване на въздушни линии с изолирани токопроводящи системи. Представени са примерни резултати от изчисления, изводи и заключения, основаващи се на тях.

2. ИЗХОДНИ РЕЖИМИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ РЕЖИМА НА МАКСИМАЛНОТО НАПРЕЖЕНИЕ НА ОПЪН В ИЗОЛИРАНИ ТОКОПРОВОДЯЩИ СИСТЕМИ

Механичното оразмеряване на проводниците в нормален режим се извършва така, че да не се надвишават нормираните максимално допустими напрежения на опън (**σ**) при различни съчетания от климатични условия или режими. Опре-

делянето на напрежението при други условия – температура на въздуха (**Θ**) и натоварване от лед и вятър (**g**), за различни дължини на междустълбието (**L**) става с уравнението за състояние на проводниците [1]. Изходните изчислителни режими и модели за България са дадени в [4]. Независимо от голямото разнообразие на климатични условия в международната практиката и у нас се нормират три основни изходни изчислителни режима:

- режим на минимална температура – **TMIN;**
- режим на максимален товар – **GMAX**, който се среща в две разновидности:
  - максимален товар от лед и вятър – **GMAXL;**
  - максимален товар от вятър без лед – **GMAXW;**
- режим на средногодишна температура – **EDS;**

Тези изчислителни режими практически изчерпват голямото разнообразие от нормираните в различните страни съчетания от параметри, влияещи върху избора на изходен оразмерителен режим. По изключение, допълнителни условия могат да бъдат свързани с режими определени от допустима издържана сила на стълбовете на ВЕЛ (при реконструкции, преустройства или използване на унифицирани стълбове), провес на проводника при друг оразмерителен режим, изчислително механично натоварване в предавариен режим, с оглед ограничаване механичните въздействия от протичането на токове на късо съединение и т.н.

В практиката у нас се използват голи алуминиево-стоманени проводници и стоманени такива за мълниезащитни въжета, за които режимът **GMAXW** не е определящ. По тази причина, броя на възможните изходни режими за определяне на оразмерителния такъв е сведен до три, а определянето на оразмерителния режим на максимално напрежение на опън става чрез сравняването на големината на междустълбието с критичните междустълбия [1, 5].

При мрежите за Ср.Н изграждани с ВКЛ и ВЛИП [2], както и въздушно окачване на електронно съобщителни мрежи върху стълбове ниско напрежение [2, 3], е възможно изходният оразмерителен режим да се получи при режим на максимален вятър – **GMAXW**.

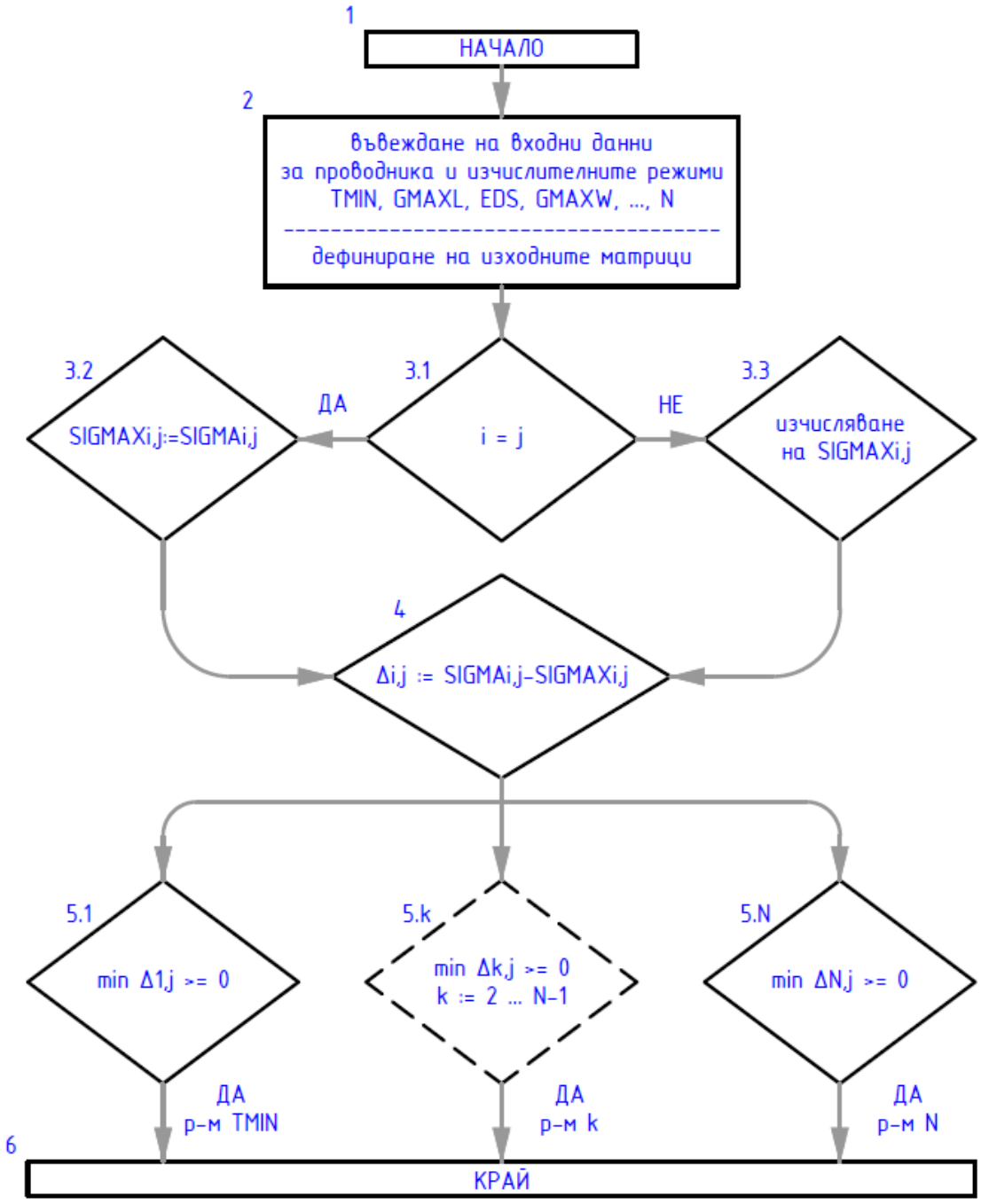
Във връзка с гореизложеното, предложеният в [1, 2] алгоритъм за търсене на изходния оразмерителен режим, чрез съпоставяне на критични междустълбия за повече от три възможни изходни режима става сложен за приложение и труден за автоматизиране.

За целта, по-долу е разработен алтернативен алгоритъм за търсене на изходния оразмерителен режим при произволен брой възможни режими.

3. АЛГОРИТЪМ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ РЕЖИМА НА МАКСИМАЛНО НАПРЕЖЕНИЕ НА ОПЪН В ИЗОЛИРАНИ ТОКОПРОВОДЯЩИ СИСТЕМИ

Разработеният алгоритъм се основава на многократно числено решаване на уравнението за състояние на проводниците и сравнение на получените резул-

тати с допустимите за всеки изчислителен режим стойности. Алгоритъмът и ред на основните операции в тяхната последователност е показан на фиг.2.1.



Фиг.2.1. *Алгоритъм за определяне режима на максимално напрежение на опън в изолирани токопроводящи системи*

За реализиране на приложна програма, входната информация се въвежда в три еднотипно форматирани квадратни матрици: на напреженията на опън $\sigma_{i,j}$, на температурите $\Theta_{i,j}$ и на относителните товари, $g_{i,j}$, а изчислителния резултат в една - $\alpha_{i,j}$, с брой на редовете и колоните равен на броя на изходните режими **N**. Форматът и общия вид на матрицата е показан в (2.1).

$$M_{i,j} = \begin{bmatrix} TMIN & GMAXL & EDS & GMAXW & ... & N \\ TMIN & GMAXL & EDS & GMAXW & ... & N \\ TMIN & GMAXL & EDS & GMAXW & ... & N \\ TMIN & GMAXL & EDS & GMAXW & ... & N \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ TMIN & GMAXL & EDS & GMAXW & ... & N \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Всеки ред на (2.1) съдържа възможните изходни режими.

Параметрите на изходния режим за решаване на кубичнто уравнение се взаимстват от елемента на главния диагонал на матриците (**i=j**), а тези на търсения – от съответния извъндиагонален елемент (**i,j**) на ред **i**.

С оглед намаляване на броя на изчислителните операции, стойностите на напреженията от главният диагонал на изходната матрица $\sigma_{i,j}$ се пренася директно в матрицата на изчислителните резултати - $\sigma x_{i,j}$, а запълването на извъндиагоналните елементи се пресмята по редове с помощта на уравнението за състояние на проводниците.

За намиране на изходния режим се използва нова матрица $\Delta\sigma_{i,j}$ - (2.2), чиито стойности са равни на числената поелементна разлика между тази на изходните $\sigma_{i,j}$ и изчислените $\sigma x_{i,j}$ напрежения в проводника,

$$\Delta\sigma_{i,j} = \sigma_{i,j} - \sigma x_{i,j} \quad (2.2)$$

По този начин оразмерителният изходен режим се определя от елемента на главния диагонал на реда, в който всички елементи са със стойност по-голяма или равна на нула.

За случаите, в които изчислителната стойност на дължината на междустълбието се изравнява с тази на някое от критичните междустълбия, са възможни две изходни напрежения за двата оразмерителни режима, при което програмата приема първия намерен такъв.

По така описания алгоритъм е съставена програма за търсене на изходния режим за всяка конкретна стойност на изчислителното междустълбие.

4. ОБОБЩЕН КОЛИЧЕСТВЕН КРИТЕРИЙ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИЗХОДНИЯ ОРАЗМЕРИТЕЛЕН РЕЖИМ НА МАКСИМАЛНО НАПРЕЖЕНИЕТО НА ОПЪН В ПРОВОДНИЦИТЕ

Ако за конкретен проводник, работещ при определени климатични условия, се построи в графичен или табличен вид зависимостта на дължината на изчислителното междустълбие **L** във функция от изходния оразмерителен режим, ще се получи обобщен количествен критерий, позволяващ бързото намиране на изходния оразмерителен режим без допълнителни пресмятания по време на проектирането.

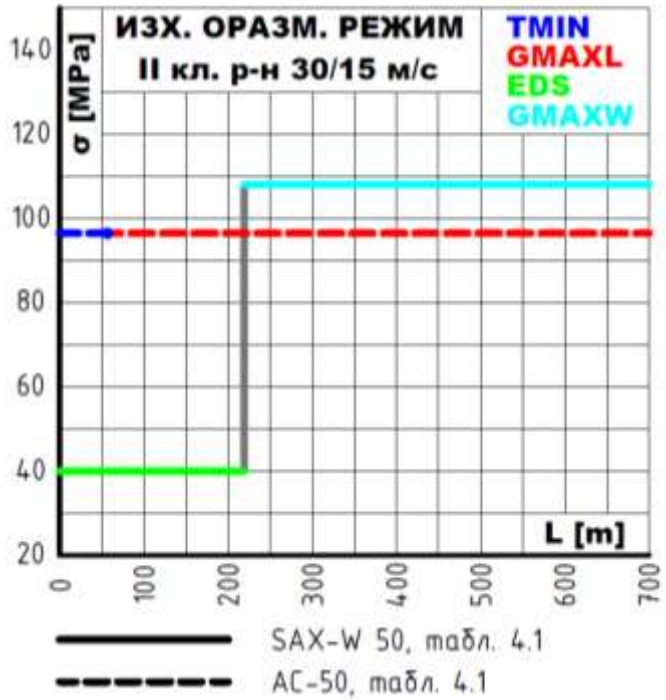
Примерен вид на такава зависимост, при четири възможни изходни режима (**TMIN, GMAXL, EDS, GMAXW**) е даден на фиг. 4.1. Тя е построена за два конструктивни типа проводници, по данните от табл. 4.1.

Таблица 4.1

		TMIN	GMAXL	EDS	GMAXW
AC-50	$\sigma[MPa]$	96,50	96,50	60,00	96,50
	$\Theta[^0 C]$	-30	-5	+10	+15
	$g*10^{\wedge -3}\left[N/(m*mm^2)\right][2]$ *II кл.р-н 30/15 m/s*	32,10	185,80	32,10	101,52
SAX-W 50 12/20kV	$\sigma[MPa]$, случай **b)**	108,00	108,00	40,00	108,00
	$\Theta[^0 C]$	-30	-5	+10	+15
	$g*10^{\wedge -3}\left[N/(m*mm^2)\right][2]$ *II кл.р-н 30/15 m/s*	39,10	117,11	39,10	135,39

Забележки: изчислителни параметри за:

- *AC-50[2]: S_{AC}=56,30 mm^2, E=82500 MPa, α=19,20*10^{-6} C^{-1};*
- *SAX-W 50[2]: S_{SAX}=50,30 mm^2, E=61000 MPa, α=23,00*10^{-6} C^{-1};*



Фиг.4.1. *Графично представяне на обобщен количествен критерий за избор на изходен оразмерителен режим за два типа проводници по четири изходни режима*

5. ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА НАПРЕЖЕНИЕТО В ПРОВОДНИКА В ИЗХОДНИТЕ РЕЖИМИ ВЪРХУ ИЗБОРА НА ОРАЗМЕРИТЕЛЕН ИЗХОДЕН РЕЖИМ

За избора на сечение на изолирания проводник се изхожда от условието за еквивалентност на допустимото токовото натоварване на кабела спрямо на това на възприетите за използване у нас алуминиево-стоманени проводници. За целта по долу в е дадена съответната сравнителна таблица:

Таблица 5.1

Условно сечение на проводника, mm^2	50	70	95
Допустим ток на неизолиран алуминиево-стоманен проводник, А	210	265	330
Допустим ток на изолиран проводник SAX-W 12/20kV, А	245	310	370

Допустимото механично напрежение за дадените в табл.5.1 сечения се определя

за следните случаи:

a) нормиран коефициент на сигурност спрямо разрушаващия товар на проводника [4] – (5.1);

$$\sigma_{SAX.ДОП} = \frac{k_Д.T_{SAX.разр}}{S_{SAX}} \qquad (5.1)$$

b) по-голям от нормирания коефициент на сигурност (по-висока сигурност) и максимална опънна сила равна на максималната за използваните стълбове или еквивалентния алуминиево-стоманен проводник [2] - (5.2);

$$\sigma_{SAX} = \frac{\sigma_{AC}.S_{AC}}{S_{SAX}} \le \sigma_{SAX.ДОП} \qquad (5.2)$$

c) по-голям от нормирания коефициент на сигурност (по-висока сигурност) и максимално прието напрежение в проводника 60÷80 MPa за режимите **TMIN**, **GMAX** и 30÷40 MPa за режим **EDS** [2] – (5.3);

$$\sigma_{SAX} \le \sigma_{SAX.ДОП} \qquad (5.3)$$

За отбелязване е изискването за защита на проводниците на ВЛИП от вибрации при напрежение в режим на **EDS** по-голямо от 40 MPa [4].

Изследванията са проведени за проводник с условно сечение 95mm^2 при четири възможни изходни режима (**TMIN, GMAXL, EDS, GMAXW**) и следните физико-механични и електромеханични параметри:

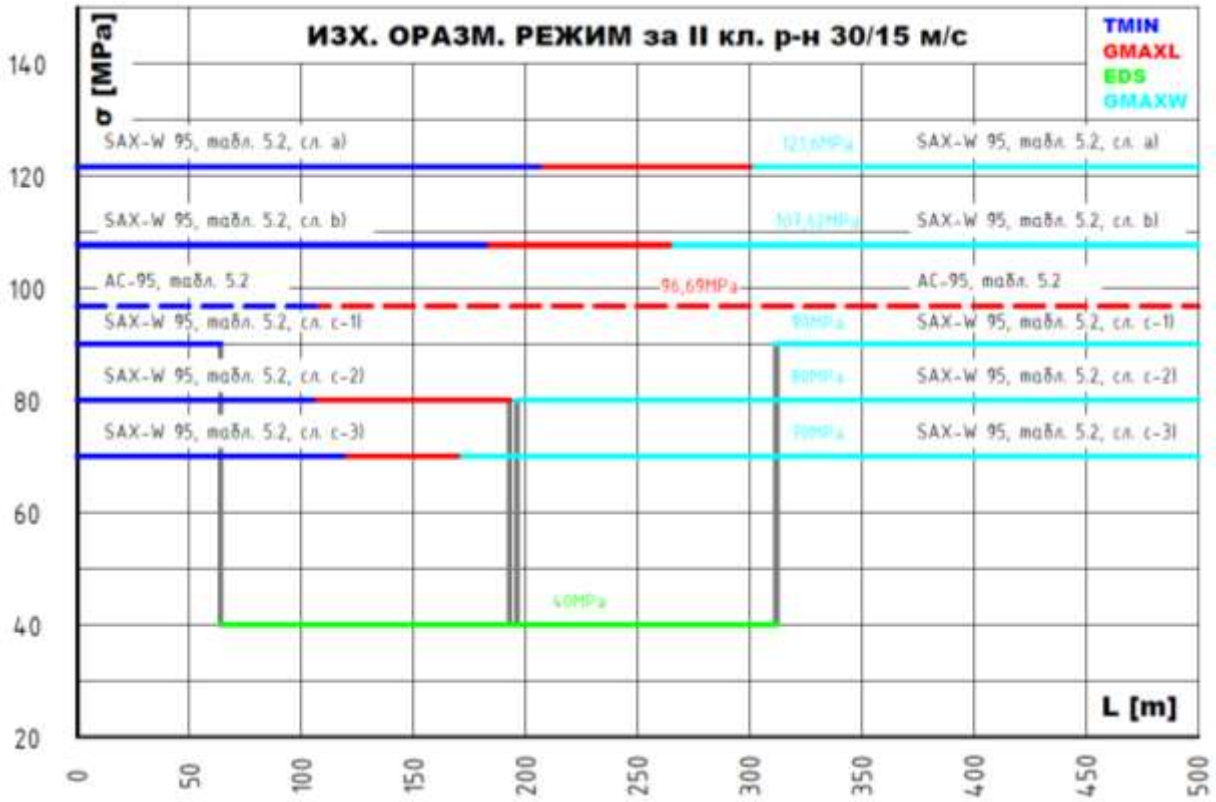
Таблица 5.2

		TMIN	GMAXL	EDS	GMAXW
	$\Theta[^0C]$	-30	-5	+10	+15
AC-95	$\sigma[MPa]$ [5]	96,69	96,69	60,00	96,69
	$g*10^{\wedge-3}[N/(m*mm^2)]$[5] *II кл.р-н 30/15 m/s*	34,02	103,71	34,02	65,78
	$g*10^{\wedge-3}[N/(m*mm^2)]$[5] *III кл.р-н 30/15 m/s*		153,08		
SAX-W 95 12/20kV	$\sigma[MPa]$, случай **a)**	121,60	121,60	91,20	121,60
	$\sigma[MPa]$, случай **b)**	107,62	107,62	66,78	107,62
	$\sigma[MPa]$, случай **c-1)**	90,00	90,00	40,00	90,00
	$\sigma[MPa]$, случай **c-2)**	80,00	80,00		80,00
	$\sigma[MPa]$, случай **c-3)**	70,00	70,00		70,00
	$g*10^{\wedge-3}[N/(m*mm^2)]$[2] *II кл.р-н 30/15 m/s*	34,30	77,41	34,30	88,46
	$g*10^{\wedge-3}[N/(m*mm^2)]$[2] *III кл.р-н 30/15 m/s*		122,95		

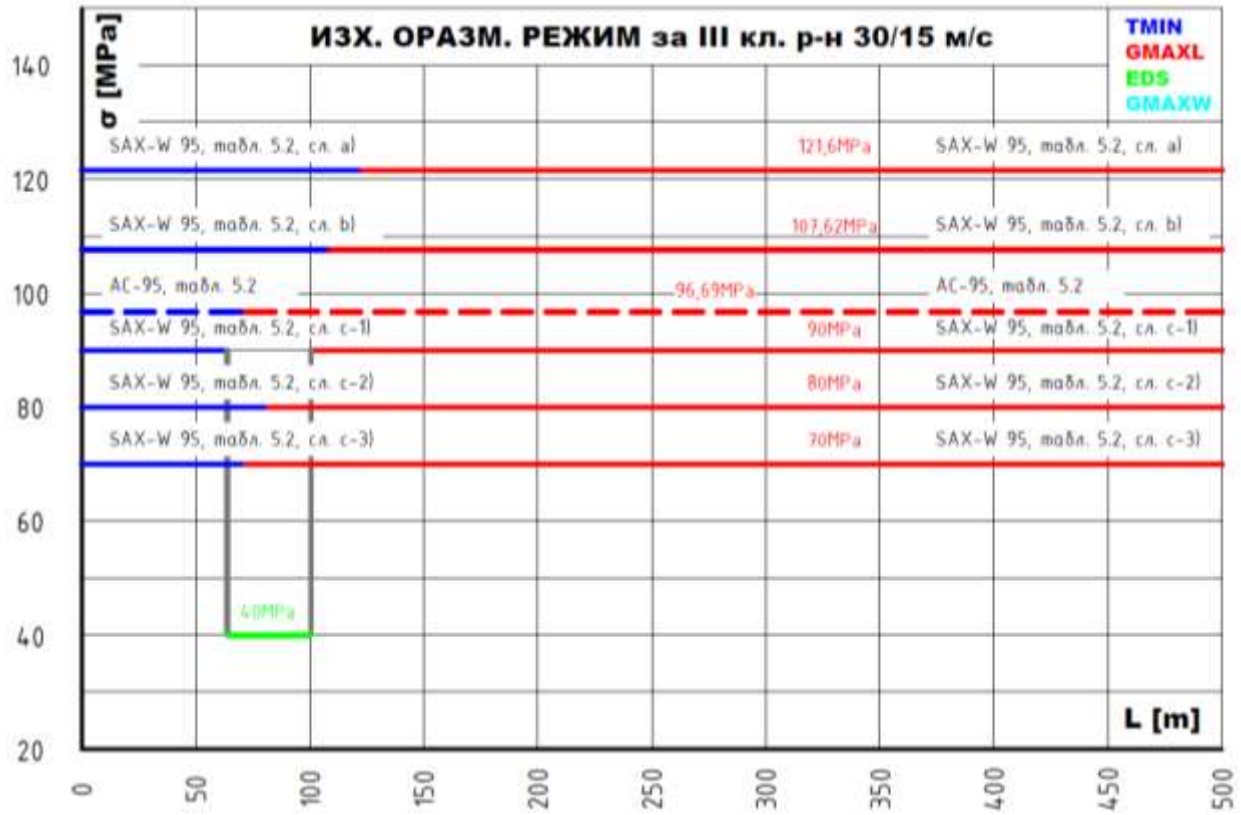
Забележки: изчислителни параметри за:

- *AC-95[5]: S_{AC}=111,30 mm^2, E=80975 MPa, α=19,19*10^{-6} C^{-1};*
- *SAX-W 95[2]: S_{SAX}=100,00 mm^2, E=61000 MPa, α=23,00*10^{-6} C^{-1};*
- *разрушаващ товар за SAX-W 95[2]:$T_{SAX.разр}$=30,4 kN;*

На фиг.5.1 и фиг.5.2, за така дефинираните изходни условия, в графичен вид е даден обобщеният количествен критерий за избор на изходния оразмерителен режим за двата разглеждани климатични района и конкретни ветрови натоварвания.



Фиг.5.1. *Графично представяне на обобщен количествен критерий за избор на изходен оразмерителен режим за проводници тип AC-95 и SAX-W 95 12/20kV по четири изходни режима за II кл.р-н 30/15 m/s*



Фиг.5.2. *Графично представяне на обобщен количествен критерий за избор на изходен оразмерителен режим за проводници тип AC-95 и SAX-W 95 12/20kV по четири изходни режима за III кл.р-н 30/15 m/s*

При изчислително междустълбие на АС-95 за II кл.р-н 30/15 m/s от 272m [5] за максималния провес се получават следните стойности:

Таблица 5.3

	AC-95	SAX-W 95 12/20kV				
изх. оразм. р-м	**GMAXL**	**GMAXL**	**GMAXW**	**EDS**	**GMAXW**	**GMAXW**
$\sigma_{MAX}[MPa]$	96,69	121,6 случай **a)**	107,62 случай **b)**	40,0 случай **c-1)**	80,0 случай **c-2)**	70,0 случай **c-3)**
$f_{MAX}[MPa](g_1,+40^0C)$	10,00[5]	5,76	6,79	8,94	9,93	11,54
$f_{MAX}[MPa](g_3,-5^0C)$	9,76[5]	5,38	6,24	8,22	9,19	10,80

Забележка: изчислителен товар за SAX-W 95[2]: $g_3=63,51*10^{-3}$ N/(m.mm^2);

При изчислително междустълбие на АС-95 за III кл.р-н 30/15 m/s от 225m [5] за максималния провес се получават следните стойности:

Таблица 5.4

	AC-95	SAX-W 95 12/20kV				
изх. оразм. р-м	**GMAXL**	**GMAXL**	**GMAXL**	**GMAXL**	**GMAXL**	**GMAXL**
$\sigma_{MAX}[MPa]$	96,69	121,6 случай **a)**	107,62 случай **b)**	90,0 случай **c-1)**	80,0 случай **c-2)**	70,0 случай **c-3)**
$f_{MAX}[MPa](g_1,+40^0C)$	9,96[5]	5,86	6,94	8,62	9,81	11,29
$f_{MAX}[MPa](g_3,-5^0C)$	9,93[5]	6,12	6,99	8,46	9,57	10,99

Забележка: изчислителен товар за SAX-W 95[2]: $g_3=106,62*10^{-3}$ N/(m.mm^2);

Габаритът към земя за ненаселени местности определен съгласно [4] е както следва:

- за ВЕЛ Ср.Н изпълнена с голи проводници - 6,0 m;
- за ВЛИП Ср.Н - 5,0 m;

6. АНАЛИЗИ НА РЕЗУЛТАТИТЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

За целите на настоящото изследване е съставен универсален алгоритъм, гарантиращ точно определяне и разграничаване на меродавните оразмерителни параметри за всякакви климатични условия на ВЕЛ. На негова база е съставена програма за определяне на изходния оразмерителен режим.

В резултат на изследванията е получен обобщен количествен критерий за избор на изходен оразмерителен режим измежду произволен брой възможни такива. Същият е изключително удобен инструмент в текущото проектиране на ВЛИП, чрез който точно, лесно и бързо се определя изходния оразмерителен режим на проводниците при съблюдаване на всички нормативни изисквания. Освен че пести проектантски труд, той намалява възможността за операторски грешки, водещи до механично натоварване на елементи на ВЛИП над допустимите.

С разработения графичен метод се постига оптимизация на изчислителния труд при електромеханичното оразмеряване на ВЛИП. Въз основа на предложеният метод може лесно да бъде определена областта на приложимост на всеки един от възможните изходни режими за всеки конкретен проводник поставен при определени климатични условия.

Направеното изследване за един конкретен изолиран проводник показва, че за тези проводници в определени случаи меродавният изходен оразмерителен режим настъпва и при максимално натоварване от вятър, което следва да се има предвид при механичното оразмеряване.

Очевидно е, че при механичното оразмеряване на ВЛИП, в зависимост от конкретните конструктивни характеристики на изолираните проводници, климатичните условия, в които работи ВЕЛ и конкретната стойност на приведеното междустълбие изходният оразмерителен режим варира измежду разгледаните по-горе четири изходни режима.
При прилагането на унифицираните за използване у нас стълбове Ср.Н за изграждане ВЛИП изходното напрежение следва да се определя съобразно издържаната надлъжна компонента на силата на стълба - съгласно (5.2).
За случаите на реконструкция на ВЕЛ със запазване на стълбовете по трасето натягането на изолираните проводници следва да се определя от максималния провес на проводника, като се изпълнява проверка спрямо допустимото натягане на еквивалентния неизолиран алуминиево-стоманен проводник - съгласно (5.2).
От проучването на практиките в другите страни и настоящия анализ може да се заключи, че оптималната работа на елементите на ВЕЛ се постига при максимални натягания на изолирания проводник в диапазона 60÷80 MPa за режимите на максимален товар и минимална температура и 40 MPa при средногодишна температура. В тези случаи не е необходимо осигуряването на защита на проводниците от вибрации, реализираните максимални провеси са съизмерими с тези на използваните у нас алуминиево-стоманени проводници, а изолираните проводници работят в условия осигуряващи им надеждност по-голяма от нормираната.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Генков Н. Т., В. Т. Захариев, Механична част на електрически мрежи, ТУ-София, 1993.
[2] Захариев В. Т., Наръчник за проектиране на механична част на въздушни електропроводни линии до 20 kV, издателска къща Св.Иван Рилски, 2016.
[3] Захариев В. Т., К. И. Бурванов, Оценка на механичното натоварване и свободния капацитет на стълбове за ниско напрежение, Годишник на Технически Университет - София, 2017,Том 67, книга 1: p. 43-51.
[4] НАРЕДБА № 3 / 2004г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.
[5] Наръчник за проектиране на електропроводни линии 110-750 kV, НИПИЕС "Енергопроект", 1986.

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

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Димо Стоилов

ИЗСЛЕДВАНЕ ТЕРМИЧНАТА УСТОЙЧИВОСТ НА АЛУМИНИЕВО-СТОМАНЕНИ ПРОВОДНИЦИ ПРИ КЪСИ СЪЕДИНЕНИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ ЗА ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ

Калоян Бурванов

Резюме: *В настоящата статия са разгледани изчислителни предпоставки и е разработен метод за проверка и избор на подходящо сечение на тоководящите проводници на електропроводите за високо напрежение по условие за термична устойчивост в режим на късо съединение. На база примерни изчисления е доказана необходимостта от преоценка на термичната устойчивост на фазовите проводници на съществуващите електропроводи 110kV и 220kV. Разработен е изчислителен модел за определяне дължината на реконструирания участък в случаите на констатирана недостатъчна термична устойчивост на фазовите проводници на съществуващите електропроводи.*
Ключови думи: *термична устойчивост, гол проводник, ток на късо съединение;*

STUDY OF THE ALUMINIUM-STEEL CONDUCTORS THERMAL WITHSTAND CAPABILITIES UNDER SHORT CIRCUIT CONDITIONS IN HIGH VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS

Kaloyan Burvanov

Abstract*: In current publication the calculation preconditions has been examinated and a method for checking and selection of appropriate bare conductor cross-section of the high voltage overhead power lines under thermal shot circuit conditions has been developed. Based on sample calculations, the need to reassess the thermal resistance of phase conductors of existing 110kV and 220kV power lines has been proven. A calculation model for determining the reconstructed length in cases of established insufficient thermal shot circuit resistance of the existing power line phase conductors has been developed.*
Keywords: *thermal effect, bare conductor, short circuit current;*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

За електрическите мрежи /ЕМ/ високо напрежение /ВН/ у нас, най-често, изборът на сечение за фазови проводници се определя от изискванията за пределно допустимо нагряване с отчитане на нормалните и следаварийни режими, както и ремонтните режими и възможните неравномерности за разпределение на токовете между отделните линии, секции на шини и др. Така избраните сечения се проверяват по условия за допустими загуби на напрежение и електрическа енергия, механична устойчивост, корониране и излъчвани радиосмущения [8].

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

В действащите нормативни документи [8] се налагат изисквания и условия за проверка, и по отношение за механичните ефекти от протичащите през тях токове на къси съединения /т.к.с./. В исторически план и впредвид нивата на т.к.с. в недалечното минало [3], тяхното влиянието върху избора на сечения за фазни проводници и тоководящи връзки в електрическата мрежа високо напрежение не е оказвало определящо влияние, поради което въпросът е слабо разгледан в българската литература.

В следствие натрупания дългогодишен експлоатационен опит, оптимизационни изследвания и унификации, най-масово приложение в практиката у нас са намерили следните типове алуминиево-стоманени проводници [1]:

Таблица 1.1

тип на проводника	110, kV	220, kV	400, kV
за въздушни линии в масовия случай	АС-185, АСО-400	АСО-500	2АСО-500, 3АСО-500 3АСО-400
за въздушни линии в редки случай	АС-150; АС-240; АС-300	АСУ-300	-
за разпред. уредби	АСО-500 с един до четири проводника на фаза		

С увеличаването на нивата на т.к.с. в електроенергийната система /ЕЕС/ на страната възниква необходимостта от оценка на съществуващите и оптимално оразмеряване на новоизползваните фазни проводници с отчитане на механичните ефекти от протичащите през тях токове на къси съединения /т.к.с./.

За целта по-долу е разгледан един от възможните случаи на влияние на т.к.с върху избора на фазни проводници, а именно този по условия за термична устойчивост /ТУ/.

2. ДОПУСТИМ ТОК НА ТЕРМИЧНА УСТОЙЧИВОСТ НА КОМБИНИРАНИ АЛУМИНИЕВО-СТОМАНЕНИ ПРОВОДНИЦИ

В действащата у нас нормативна уредба [8] липсва ясна методика за определянето на допустимия ток на термична устойчивост при протичането на т.к.с. през комбинирани алуминиево-стоманени голи проводници, а са заложени само лимитиращи условия и насоки за нейното определяне. Същевременно в непряко свързаната методика касаеща определянето на изходните изчислителни режими и условия при термично оразмеряване на мълниезащитните въжета /м.з.в./ [7] са посочени данни за допустимия ток на термична устойчивост с оглед използване на проводниците в ролята им на мълниезащитни въжета, без да е указан метода за тяхното получаване и съответната оценка относно неговата точност.

Съгласно [2,10,12,13] допустимата термична устойчивост от протичането на т.к.с. за дадена тоководяща част се определя от материалните константи на проводника, допустимата крайна температура и разчетните стойности на началната температура, големината на т.к.с. и времето за неговото протичане.

За извеждането на математическите модели посочени в [2,10,12,13] се правят някои опростяващи допускания, валидни и за разглежданията изложени по-долу. За отбелязване е факта, че метода изложен в стандарта [2] не отчита влиянието на стоманената част от сечението на алуминиево-стоманения проводник, което в определени случаи води до осезаема грешка и преоразмеряване [12,13].

По тази причина в [12] е предложен алтернативен изчислителен модел. За оценка разликата в резултатите, за типовете проводници намерили най-често приложение у нас (дадени в табл.1.1) са изпълнени сравнителни изчисления по двата метода. като за сравнение са посочени и наличните за тях едносекундни токове на термична устойчивост публикувани [7] и възприети за ползване при термичното оразмеряване на м.з.в. у нас. Допълнително са разгледани два сходни алтернативни метода за определяне на термичната устойчивост на комбинирани алуминиево-стоманени проводници. Резултатите от проведените изчисления са изложени в табл.2.1.

По отношение времето за протичане на т.к.с. е приета едносекундна референтна стойност.

За начална температура, към момента на настъпване на к.с. се приема 40^0C, която се обосновава с хипотезата за работа при максимална околна температура залегнала в [8] и факта, че в нормален режим всички електропроводи у нас работят натоварени под 60% от своята максимална преносна мощност. При необходимост от дефиниране на различен от предложения по-горе термичен модел, началната температура може да бъде определена съгласно [12] или друг национален или общоприет стандарт или методика.

Крайната температура, до която е допустимо загряването на алуминиево-стоманени проводници съгласно [2,8,12,13] е 200^0C. При по-високи температури в структурата на алуминия настъпват необратими изменения водещи до понижаване на неговите механични показатели, а гресиращата смазка на стоманената сърцевина се втечнява и изтича, което способства за по-бързото понижаване на корозионната устойчивост на стоманената сърцевина.

При така дефинираните изходни условия, за допустимата термична устойчивост на проводниците от табл.1.1 се получават следните стойности:

Таблица 2.1

изч. модел	I_{th}, kA / 1sec. (T_{kr}=1,00sec)				
	CIGRE [12] ≡ [13]	съгласно [7]	алтернативен метод - т.3 от наст. статия		IEC / EN [2]
тип на проводника [1]	метод D	-	метод F	метод G	-
- 1 -	- 2 -	- 3 -	- 4 -	- 5 -	- 6 -
АС-150 (C_S=5,56)	16,694	16,1	15,300	15,448	14,761
АС-185 (C_S=5,26)	20,544	19,8	18,749	18,956	18,052
АС-240 (C_S=5,52)	26,869	-	24,610	24,854	23,738
АС-300 (C_S=5,24)	33,499	-	30,562	30,902	29,423
АСО-300 (C_S=7,82)	31,779	31,3	29,777	29,869	29,024
АСУ-300 (C_S=4,11)	34,761	-	31,084	31,631	29,622
АСО-400 (C_S=7,91)	42,766	42,1	40,099	40,216	39,097
АСО-500 (C_S=8,07)	52,502	51,7	49,282	49,410	48,073

Забележки:

- *Съгласно [7], данните в колона 3 са получени при изчислителна началната температура от $30^0 C$.*
- *В колони 4 и 5 от табл.2.1 стойностите са получени по изложените в т.3 алтернативни методи.*
- *Оценка на точността на предлаганите алтернативни методи F и G е обект на отделно изследване, резултатите от което са обект на отделна публикация.*

3. АЛТЕРНАТИВЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТЕРМИЧНАТА УСТОЙЧИВОСТ НА КОМБИНИРАНИ АЛУМИНИЕВО-СТОМАНЕНИ ПРОВОДНИЦИ

Изследванията по-долу се провеждат за алуминиево-стоманени проводници с коефициент на състава на комбинирания проводник $C_S = S_{Al} \setminus S_{St}$ в диапазона 1÷10.

За изследването на термичната устойчивост на комбинирания алуминиево-стоманен проводник се изхожда от опростяващите допускания в *m.7.1* и *m.7.2* от стандарта [2] и материалните константи публикувани в *Annex A (normative)* от същия документ, дадени в табл.3.1.

Описание на използваните символни означения и тяхното значение са дадени в стандарта [2] и остават валидни за настоящите разглеждания.

Таблица 3.1

символ	мярка	алуминий, алуминиева сплав	стомана
c	$\frac{J}{kg.^0 C}$	910	480
d	$\frac{kg}{m^3}$	2700	7850
k_{20}	$\frac{1}{\Omega.m}$	$34{,}8.10^6$	$7{,}25.10^6$
α_{20}	$\frac{1}{^0 C}$	0,0040	0,0045

Допустимият ток на термична устойчивост се определя, както следва [2]:

$$I_{th} = S.K_{th} = S.\frac{1}{\sqrt{T_{kr}}}.\sqrt{\frac{k_{20}.c.d}{\alpha_{20}}.\ln\frac{1+\alpha_{20}.(\Theta_e - 20^0 C)}{1+\alpha_{20}.(\Theta_b - 20^0 C)}} \qquad (3.1)$$

За така дефинираните параметри, при начална температура $\Theta_b = 40^0 C$ и крайна допустима температура от $\Theta_e = 200^0 C$, при разчетно време $T_{kr} = 1{,}0\,\text{sec}$ се получават следните стойности за допустимият ток през отделните метали:

$$I_{th_Al} = S_{Al}.K_{th_Al} = S_{Al}.99{,}737 \qquad (3.2)$$

$$I_{th_St} = S_{St}.K_{th_St} = S_{St}.55{,}486 \qquad (3.3)$$

като максималната температура на загряване на стоманения проводник се приема по-ника от нормираната в [2,8] допустима, равна на тази на алуминиевия, с

цел да не се предизвика прегряване на алуминия в случая на комбинираната им работа и последващия топлинен обмен.
Ако се приравнят допустимият ток на стоманената и алуминиева части от комбинирания проводник се получава зависимостта:

$$C_S = \frac{S_{Al}}{S_{St}} = 0{,}556 \tag{3.4}$$

От друга страна ако приемем, че в процеса на загряване не се извършва топлообмен между двата метала, тока протичащ през комбинирания проводник се разделя през двата метала, а разпределението му става съобразно активните им съпротивления, то може да бъде изведена следната зависимост:

$$I_{th} = \left(1 + \frac{s_f}{C_S}\right).I_{th_Al} = \left(S_{Al} + s_f.S_{St}\right).K_{th_Al} \tag{3.5}$$

Интерес представлява влиянието на двата дефинирани безразмерни множителя – коефициента на състава C_S и коефициента на делене s_f върху допустимия сумарен термичен ток.
По отношение на C_S, е очевидно че:

- при коефициент на състава съгласно (3.4) ($C_S = 0{,}556$) токовете протичащи през двата метала ще предизвикат еднакво максимално загряване на металите, а плътностите на двата тока ще са равни на определените в (3.2) и (3.3) максимални такива.
- при нарастване на коефициента на състава на проводника ($C_S > 0{,}556$), протичащият ток през стоманената част ще е с по-малка плътност от максималната изчислена в (3.3) и няма да се загрее до максималната приета стойност. Стоманеното сечение ще се натоварва неефективно.
- при намаляване на коефициента на състава на проводника($C_S < 0{,}556$), протичащият ток през алуминиевата част ще е с по-малка плътност от максималната изчислена в (3.2) и няма да се загрее до максималната приета стойност. Алуминиевото сечение ще се натоварва неефективно.

На практика, за комбинираните алуминиево-стоманени проводници използвани у нас коефициента на състава се изменя в диапазона 1÷10, като по-малките стойности (най-често 1÷2) са характерни за специалните проводници използвани основно за мълниезащитни въжета, а по-големите (4÷8) за тоководящи елементи [4].
Коефициентът на делене s_f очевидно е функция на отношението на проводимостите на двата метала, като в зависимост от различието на температурите им се получават различни стойности.
В тази връзка могат да бъдат разгледани две хипотези:

- **случай (метод) F** - еднаква температура на двата метала при протичането на тока на късо съединение (консервативен случай) при който:

$$s_f \approx 0{,}203 \tag{3.9}$$

- **случай (метод) G** - различна температура на двата метала при протичането на тока на късо съединение.

За определяне на s_f по **метод G**, се правят следните допускания:

- по време на протичането на тока на късо съединение, между двата метала не протичат топлообменни процеси. Загряването на всеки от металите се обуславя от протичащия през него ток;
- за случая $s_{Al} \to \infty$, респективно $s_{St} \leftarrow 0$ (за случая прието за $C_S = S_{Al} \setminus S_{St} \geq 10$), целият ток протича през алуминиевата част на проводника, при което алуминиевата част се загрява до максималната допустима $\Theta_e = 200^0 C$, а стоманената не се загрява – т.е. $\Theta_{b_St} = 40^0 C$, при което:

$$s_f \approx 0{,}329 \tag{3.10}$$

- за случая $C_S = S_{Al} \setminus S_{St} = 0{,}556$ токовете протичащи през двата метала ще предизвикат еднакво максимално загряване на металите до максималната допустима температура $\Theta_e = 200^0 C$, при което:

$$s_f = 0{,}198 \tag{3.11}$$

- зависимостта $s_f(C_S)$ за диапазона $C_S = S_{Al} \setminus S_{St} = 10$ до $C_S = S_{Al} \setminus S_{St} = 0{,}556$ е линейна и се изменя в границите $0{,}329 \div 0{,}198$, при което определянето на s_f се извършва чрез линейна интерполация.

4. ВРЕМЕ ЗА ИЗКЛЮЧВАНЕ НА ТОКА НА КЪСО СЪЕДИНЕНИЕ

Върху определянето на термичната устойчивост на тоководящите елементи, каквито са алуминиево-стоманените голи проводници оказва влияние времетраенето за протичане на тока на късото съединение. Като такова в [8] се приема пълното време за изключване при действието на основната защита, което включва и собственото време на прекъсвача (времето от подаване на сигнал за изключване до окончателното изгасване на дъгата във всички полюси на прекъсвача). Когато к.с. е в мъртвата зона на релейната защита времетраенето на к.с. се определя като се има в предвид изключване при действие на резервната релейна защита. Разчетната продължителност на к.с. или пълното време на изключване на повреденото присъединение при к.с. е сума от времената на заработване на релейната защита и времето за изключване на прекъсвача. При повреда в някое присъединение трябва да заработи основната релейна защита с най-малко време и в случай на нейния „отказ“ трябва да заработи резервната защита с по-голямо време. Отчитайки малката вероятност за „отказ“ на защита, е прието при изчислението на термичната устойчивост да се работи с времето на основната защита. Съгласно [8] при изчисляване на термичната устойчивост на

проводниците при к.с., в качеството на оразмерително време трябва да се приеме сумата от времето за действие на основната защита (с отчитане наличието на автоматично повторно включване /АПВ/), монтирана на по-близкия до мястото на к.с. прекъсвач и пълното време за изключването му (вкл. и времето за гасене на дъгата). Допълнително е необходимо да се отчита влиянието на апериодичната съставка на тока на к.с. Съгласно [10], ако времето за изключване на тока на к.с. е равно или по-голямо от времето за затихване на апериодичната съставяща на тока на к.с., то последното се добавя към пълното време за изключване на повредата. В най-общия случай, за мрежите високо напрежение това става като към времето за изключване на к.с. се добави допълнително Ta=0,05sec.

На основание гореизложеното и с отчитане наличните в електроенергийната система устройства за релейна защита и комутационните особености на монтираните прекъсвачи е прието като най-малко време за оразмеряване по условия на термична устойчивост да се работи със следната стойност:

$$T_k = 2.(t_{изкл} + T_a) = 2.(0{,}130 + 0{,}05) = 0{,}36\,\text{sec} \qquad (4.1)$$

където с числото 2 се отчита наличието на АПВ.

5. ПРОВЕРКА ОТНОСНО ТЕРМИЧНОТО ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА Т.К.С.

Допустимият ток на термична устойчивост за полученото в (4.1) референтно време за изключване на к.с се определя съгласно (5.1)

$$I_{th}(T_k) = I_{th}(T_{kr})\sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} = 1{,}667.I_{th}(T_{kr}) \qquad (5.1)$$

В табл. 5.1 са дадени стойностите на издържаните токове на термична устойчивост съгласно колона 5 на табл.2.1 при времетраене на протичането на тока на к.с. от $T_k = 0{,}36\,\text{sec}$:

Таблица 5.1

изч. модел	$I_{th}(0{,}36\,\text{sec}) = 1{,}667.I_{th}(1{,}00\,\text{sec})$
тип на проводника [1]	метод G
АС-150 (C_S=5,56)	25,747
АС-185 (C_S=5,26)	31,593
АС-240 (C_S=5,52)	41,423
АС-300 (C_S=5,24)	51,504
АСО-300 (C_S=7,82)	49,782
АСУ-300 (C_S=4,11)	52,719
АСО-400 (C_S=7,91)	67,026
АСО-500 (C_S=8,07)	82,350

Ако за така направеното в табл.1.1 разпределение на използваните проводници по нива на напрежение сравним получените в табл.5.1 данни с перспективните стойности на токовете на к.с. на шини на опорните подстанции публикувани в [9], то се оказва, че не е осигурена нужната термична устойчивост на фазните проводници на ВЛ 110kV в следните случаи:

- за електропроводите изпълнени с проводници тип АС-150, присъединени

във възли на ЕМ 110kV с перспективни нива на т.к.с. над 25,7kA;
- за електропроводите изпълнени с проводници тип АС-185 (масовият случай), присъединени във възли на ЕМ 110kV с перспективни нива на т.к.с. над 31,6kA;
- за електропроводите изпълнени с проводници тип АС-240, присъединени във възли на ЕМ 110kV с перспективни нива на т.к.с. над 41,5kA;

Изложеното по-горе доказва необходимостта от детайлна оценка на термичната устойчивост на ВЛ 110kV и ВЛ 220kV присъединени в опорните възли на електрическите мрежи ВН.

Оценката следва да се изпълнява за всяко конкретно присъединение, съобразно изчислената стойност на тока на к.с. на шини в дадения възел и действителното време за неговото изключване. При защита на електропровода със защити със зоново действие, проверки следва да се изпълняват за всяка от зоните на действие на релейната защита.

За ВЛ 400kV критерият термична устойчивост не е определящо условие за избор на фазови проводници поради използването на снопови такива.

6. МЕРКИ ЗА ОСИГУРЯВАНЕ НА НУЖНАТА ТЕРМИЧНА УСТОЙЧИВОСТ

В случаите на констатирана по смисъла на т.5 от настоящата статия недостатъчна термична устойчивост могат да бъдат предприети следните основни мероприятия:

- Изменения в конфигурацията на мрежата и схемни решения водещи до намаляване на нивата на т.к.с. - детайлно разгледани в [3];
- Изменения в настройките на релейните защити на електропровода с цел намаляване пълното време на изключване на т.к.с.;
- Реконструкция на целия електропровод с проводници с по-голямо сечение, отговарящи на изискванията за термична устойчивост при к.с.;
- Частична реконструкция на подхода пред подстанцията с използването на проводници с по-голямо сечение, отговарящи на изискванията за термична устойчивост при к.с.;

За реализиране на последното е необходимо определянето на дължината на реконструирания участък.

Ако се изходи от уравненията за изчисляване на токовете на несиметрични к.с. по метода на симетричните съставящи [11] и уравнение (5.1), то за случаите на еднофазно и трифазо к.с. може да се изведе следната основна зависимост:

$$L = \frac{k.U_n}{I_{th}.z_L}\sqrt{\frac{T_k}{T_{kr}}} - \frac{Z_{SS}}{z_L} \qquad (6.1)$$

където:

I_{th}, T_{kr}, T_k – дефинирани по-горе;

U_n , kV – номинално напрежение на мрежата;

k – безразмерен коефициент имащ стойност 0,635 в случая на трифазно к.с и 1,905 в случая на еднофазно к.с.;

Z_{SS}, Ω – импеданс на шини на подстанцията за съответният вид к.с.;

z_L, Ω/km – импеданс на новоизграждания електропроводен участък за 1,0km дължина за съответният вид к.с.;

Както е известно [5,6], големината на номиналното напрежение Un варира в определени граници, поради което при извеждане стойността на коефициента k е отчетена възможността за неговото увеличаване с 10%.

По така описаното в (6.1) уравнение се получават различни стойности за дължината на ремонтирания участък за различните видове к.с., като за определяща се приема най-голямата от тях. При защита на електропровода със защити със зоново действие, проверки следва да се изпълняват за всяка от зоните на действие на релейната защита.

Пример за оценка на термичната устойчивост на ВЛ 110kV:

ВЛ 110kV "Странджа" 1x3x1AC-185+C-50 е връзката между п/ст „Марица Изток" (гр.Гълъбово) и ТЕЦ „Марица 3" (гр. Димитровград). Съгласно [9], за режим 2026г. в п/ст „Марица Изток" токът на трифазно к.с. е 34,28kA, а този на еднофазно – 35,96kA. В ТЕЦ „Марица 3" токът на трифазно к.с. е 19,25kA, а този на еднофазно – 15,05kA. При време за изключване на к.с. от 130ms по цялата дължина на електропровода и наличие на АПВ, разчетното време съгласно (4.1) е 0,36sec. Сравнение на допустимата (виж табл. 5.1) с изчислената на шини в п/ст стойности показва недостатъчна термична устойчивост на електропровода от страната на п/ст „Марица Изток". При z_{L1}=0,438 ∠69^0 Ω/km и z_{L0}=1,462 ∠78^0 Ω/km съгласно (6.1) може да се определи дължината на началния участък, в който при настъпване на к.с. фазните проводници ще бъдат термично претоварени, а именно L_{3p}=1,063km и L_{1p}=0,973km. За целта се предвижда реконструкция на началния участък на ВЛ с проводници тип АСО-400. При z_{L1}=0,368 ∠78^0 Ω/km и z_{L0}=1,268 ∠74^0 Ω/km за ВЛ с проводници тип АСО-400, съгласно (6.1) се получава L_{3p}=1,266km и L_{1p}=1,133km, т.е. началния участъка от п/ст „Марица Изток" с минимална дължина 1,3km следва да бъде изпълнен с фазови проводници тип АСО-400.

7. АНАЛИЗИ НА РЕЗУЛТАТИТЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

За определянето на допустимата термична устойчивост на алуминиево-стоманените проводници липсва утвърден изчислителен модел. Наличните изчислителни методи не дефинират с необходимата прецизност нейната големината, като съгласно литературата [12,13], в определени случаи това води до чувствително несъответствие с получени по експериментален път данни. За целта, за най-често употребяваните у нас проводници следва да се извършат експериментални изследвания за определяне на реалната стойност на термичната им устойчивост.

Някои от електропроводите 110kV, присъединени в опорните възли на енергийната ни система, работят с по-ниска сигурност от нормативно-изискуемата в следствие недостатъчната термична устойчивост на фазните им проводници, при което се повишава аварийността в мрежата 110kV и се създава опасност от настъпване на тежки системни аварии свързани със значителни икономически загуби.

За избягване на подобни сценарии, за електропроводите 110kV присъединени в

опорните възли на енергийната система е необходимо да се извърши подробен анализ и оценка по отношение на термичната устойчивост на фазните им проводници. За тази цел може да бъде използван изложения по-горе подход.
Оценката следва да се изпълнява за всяко конкретно присъединение, съобразно изчислената стойност на тока на к.с. на шини в дадения възел и действителното време за неговото изключване. При защита на електропровода с релейни защити със зоново действие, проверки следва да се изпълняват за всяка от зоните на действие на релейната защита.
При констатирана недостатъчна термична устойчивост на даден електропровод следва да се пристъпи към частичната му реконструкция в термично претоварения участък с оглед постигане на нормативно-определеното ниво на надеждност.
Задължително трябва да бъдат изпълнявани изчисления и проверки по отношение термичната устойчивост на фазните проводници на електропроводите високо напрежение, както по време на проектирането, така и в процеса на планиране развитието на електрическите мрежи ВН и периодично по време на тяхната експлоатация.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС 1133:1989 Проводници неизолирани алуминиеви и алуминиево-стоманени.
[2] 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).
[3] Бурванов К. И., Върху координацията на токовете на късо съединение с параметрите на електроенергийните обекти и съоръжения, ЕНЕРГЕТИКА, 2017,5: p. 41-51.
[4] Генков Н. Т., В. Т. Захариев, Механична част на електрически мрежи, ТУ-София, 1993.
[5] Добрилов Д., А. Цолов, Изследване факторите, влияещи върху напрежението в точките на присъединяване на малки ВЕЦ, IV Научна конференция "ЕФ 2012", 2012,Том 1: p. 21-30.
[6] Добрилов Д., А. Цолов, Особености при компенсиране на генерираната капацитивна енергия от кабелни линии средно напрежение, ЕНЕРГЕТИКА, 2013,3: p. 30-34.
[7] Методика за определяне на изходните изчислителни режими и условия при термично оразмеряване на мълниезащитните въжета на електропроводи високо напрежение. ЕНЕРГОПРОЕКТ, 2001.
[8] НАРЕДБА № 3 / 2004г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.
[9] План за развитие на преносната електрическа мрежа на България за периода 2017-2026г - проект. ЕСО ЕАД, 2017.
[10] Рожкова Л. Д., В.С.Козулин, Электрооборудование станций и подстанций, Энергоатомиздат - Москва, 1987.
[11] Христов К., Токове на късо съединение, Техника - София, 1971.
[12] CIGRE WG 22.12 Brochure 207: Thermal behaviour of overhead conductors. 2002. p. 1-40.
[13] WG 22.12 The thermal behaviour of overhead conductors. Section 4 : Mathematical model for evaluation of conductor temperature in the adiabatic state., ELECTRA, 1999,185: p. 75-87.

Автор: Калоян Бурванов, Технически Университет-София, E-mail address: *K_Burvanov@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Димо Стоилов

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА МРЕЖА С ПРИСЪЕДИНЕНИ ИЗТОЧНИЦИ НА ВЪЗОБНОВЯЕМА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ СЪС СОФТУЕР НЕПЛАН

Димитър Богданов, Тефик Фърладжов

Резюме: *В статията е представен примерен модел на електрическа мрежа с присъединени източници на възобновяема електрическа енергия, изпълнен със софтуерен продукт Неплан (NePlan). Свързването на нови генериращи мощности към съществуващи мрежи, изградени като разпределителни поставя някои задачи свързани с преоценка на загубите, проверка на преносната способност и избор на оптимални точки за присъединяване. Разгледани са загубите на мощност в електрическата мрежа и възможностите за компенсация на реактивната мощност.*
Ключови думи*: електрически мрежи, моделиране, софтуер, нови генератори, ВЕИ*

ELECTRICAL POWER GRID WITH CONNECTED RENEWABLE SOURCES OF ELECTRICAL ENERGY MODELING WITH NEPLAN SOFTWARE

Dimitar Bogdanov, Tefik Furladzov

Abstract: *In the paper is presented model of part of electrical power grid with connected renewable sources of electrical energy. The model is based on NePlan software. The connection of new generators to existing grids, which have been constructed in the past as typically distribution facilities, imposes tasks for re-estimation of the power loses, check of the transmission capability and selection of optimal connection points, etc. For the modelled case the power loses in the grid are estimated and the possibility for compensation of the reactive power.*
Keywords: *electrical networks, modeling, software, new generators, renewable sources of energy*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните десет години в България бяха изградени голям брой генериращи мощности, които попадат в категорията на възобновяемите източници а електрическа енергия, обобщавани често с абревиатурата ВЕИ.
Генериращите мощности изградени в България са от различен тип – фотоволтаични електроцентрали (ФвЕЦ), Вятърни електроцентрали (ВяЕЦ), водноелектрически централи (ВЕЦ), инсталации за биомаса и генератори задвижвани от

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

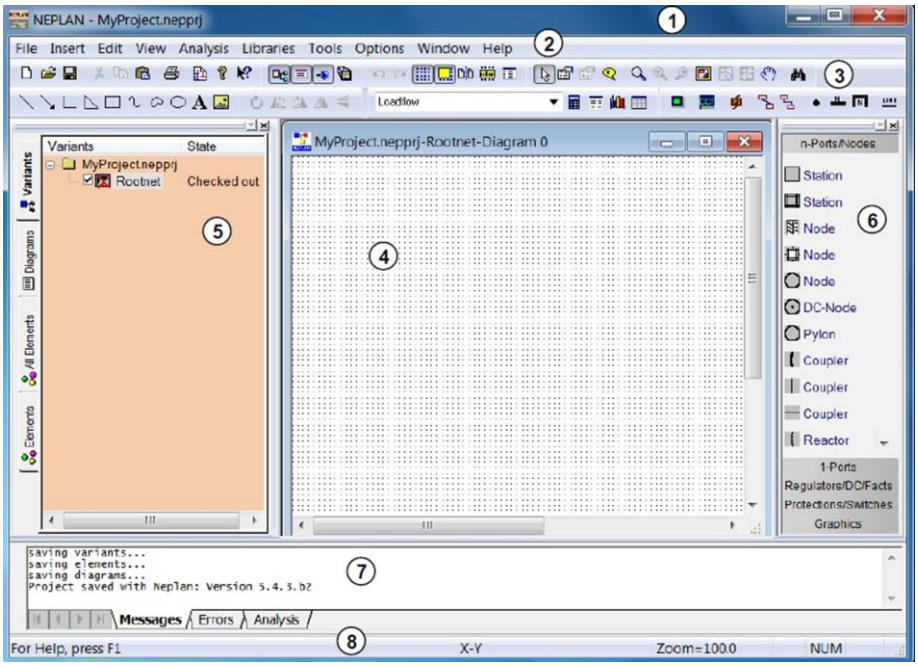
двигатели работещи с природен газ (метан). Присъединяването им се извършва най-често към съществуващи електропроводи и подстанции. Технологичните особености на тези обекти налагат преоценка на участъците от мрежата, към които са присъединени.

2. СОФТУЕР НЕПЛАН (NEPLAN)

Софтуерът NePlan е създаден за моделиране и изследване на електрически системи. Състои се от менюта и „прозорци“ с помощта на които потребителят има възможност за въвеждане на елементи и връзки, чрез които той може да създаде една електрическа система. Всеки един елемент има отделен “Диалогов прозорец“, в който потребителят може да въведе съответните номинални параметри на даденият елемент.

Продуктът разполага с “Analysis“- меню (лента с инструменти за изчислителни анализи), където потребителят може да изследва вече съществуващият модел.

Може да се изследват режими на: потокоразпределението, токове на к.с., динамични характеристики, изследване на защити, изследване на надеждността и др. Има функции за обвързване на обектите с реалното им физическо положение посредством Географски Информационни Системи (ГИС) и др. [1]



Фиг.1. Главен (Основен) прозорец на Неплан

3. КОНФИГУРАЦИЯ НА МОДЕЛИРАНА ЗОНА ОТ ЕЛЕКТРИЧЕСКА МРЕЖА

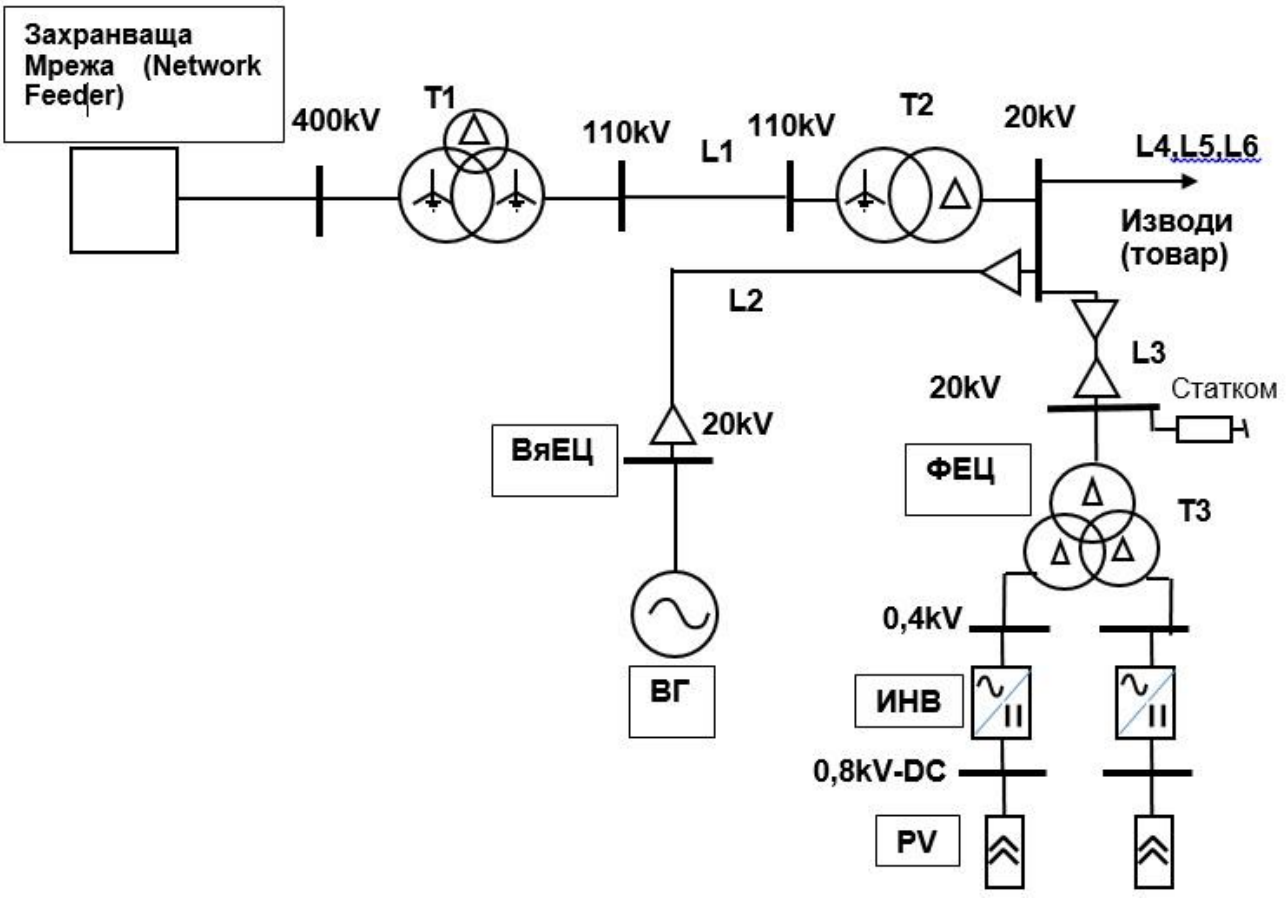
За съставяне на модел на част от ЕЕС са използвани елементи със следните параметри:

- Подстанция 400/110kV. На шини 400kV на подстанцията, която осигурява връзка към ЕЕС – Sk=1000 MVA.

- Трансформатор 400/110 kV Sn=100 MVA;
- Линия 110 kV - 100km към подстанция 110/20kV;
- Подстанция 110/20 kV;
- Трансформатор 110/20 kV, Sn=75 MVA;

Присъединени към шини 20kV:

1. Извод за потребители 15 MVAr (cos Ф 0.9) – к.л. 2km;
2. Извод за потребители 5 MVAr (cos Ф 0.9) – к.л. 5km;
3. Извод за потребители 10 MVAr (cos Ф 0.9) – к.л. 3km;
4. ФвЕЦ 12 MWp:
   - Централни инвертори тип: ABB PVS800-57 – 1000 kW – 12 бр.;
   - Повишаващ тр-р: тип: – 6 бр. (Сух повишаващ трансформатор с полимерна изолация);
   - Кабелни линии: до граница ФвЕЦ – 2 km, вътрешни линии – 4 km (до инверторните контейнери);
5. Ветрогенераторен парк 20 MW.
   - Ветрогенератор тип-E82 E2 с мощност P = 2000 kW – 10 бр.
   - Кабелни линии: до граница ВяЕЦ – 3 km, вътрешни линии – 0,5 km (м/у ветрогенераторите).



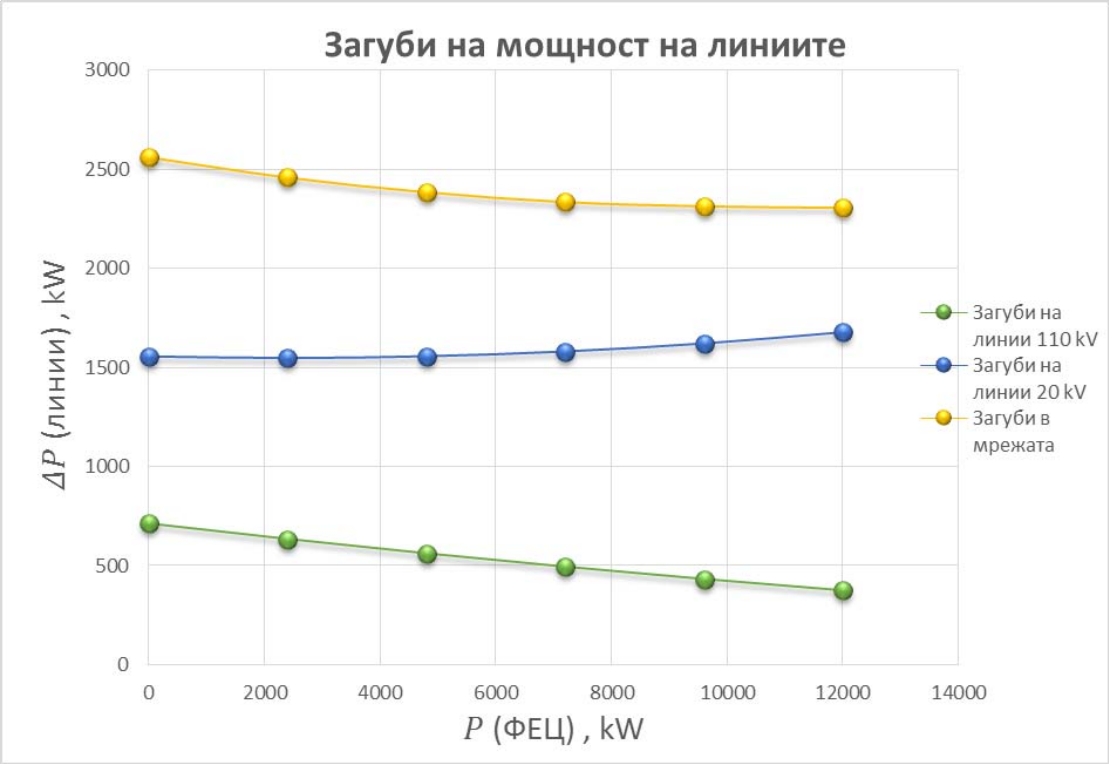
Фиг.2. Опростен модел на част от ЕЕС.

4. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАГУБИТЕ НА МОЩНОСТ В МРЕЖАТА

Резултатите от изследванията в табл.1 са получени в софтуерна среда Неплан, като загубите на активна мощност в електрическата мрежа се изменят в зависимост от генерираните мощности на ФвЕЦ

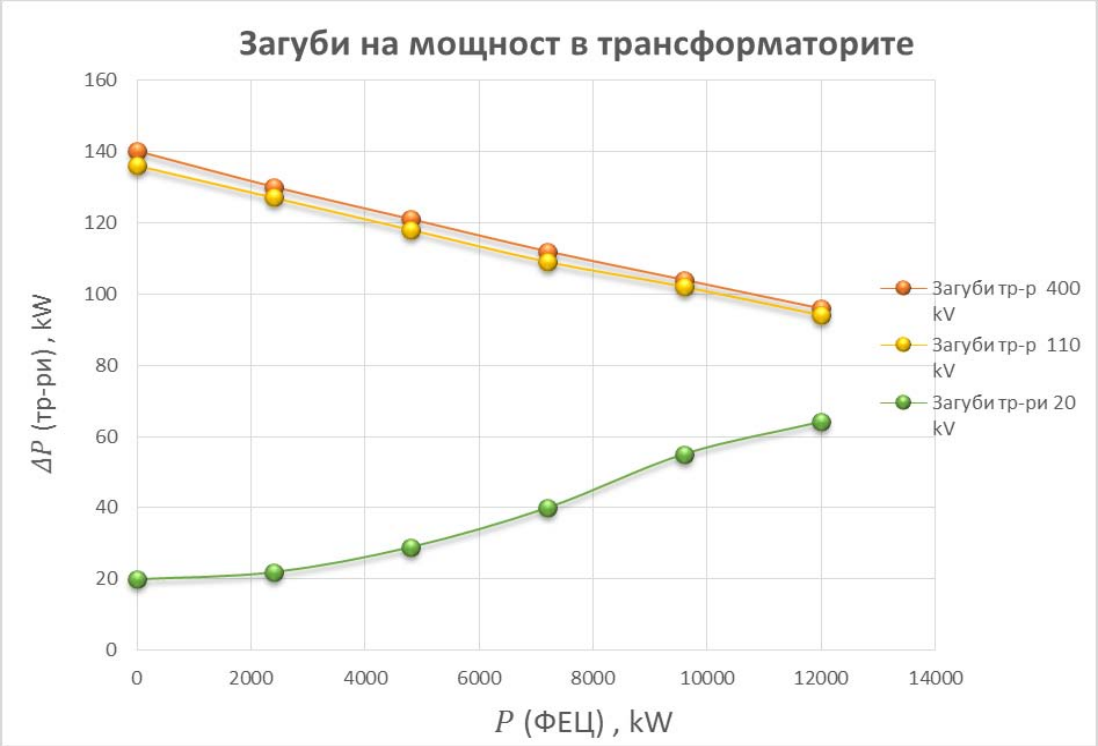
Табл.1

Активна мощност на ФвЕЦ	$P_{ФЕЦ}$	kW	0	2400	4800	7200	9600	12000
Загуби на мощност на линия 110 kV	ΔP_{110}	kW	710,6	632,6	560	492,7	430,4	372,9
Загуби на мощност на линии 20 kV	ΔP_{20}	kW	1553	1545	1554	1578	1619	1676
Загуби на мощност в тр-р 400/110	$\Delta P_{тр-р}$	kW	140	130	121	112	104	96
Загуби на мощност в тр-р 110/20	$\Delta P_{тр-р}$	kW	136	127	118	109	102	94
Загуби на мощност в тр-ри ФвЕЦ	$\Delta P_{тр-р}$	kW	20	22	29	40	55	64
Общи загуби на мощност в ел.мрежа	$\Delta P_{ел.мр}$	kW	2559,6	2456,6	2382	2331,7	2310,4	2302,9



Фиг.3. Загуби на активна мощност в линиите.

В разглеждания случай при по-голяма генерация на мощност от ФвЕЦ загубите в разпределителната мрежа намаляват. Като предпоставка може да се посочи производството на електрическа енергия близо до потребителите и преминаване през по-малко нива на пренос и трансформация.



Фиг.4. Загуби на активна мощност в трансформаторите.

5. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАГУБИ НА МОЩНОСТ В ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА МРЕЖА В ЗАВИСИМОСТ ОТ СЕЧЕНИЯТА НА КАБЕЛНИТЕ ЛИНИИ

В табл. 2. са представени резултати от изчисленията при сечения на кабелните линии в Неплан със съответствие с проектните изисквания за мрежата.

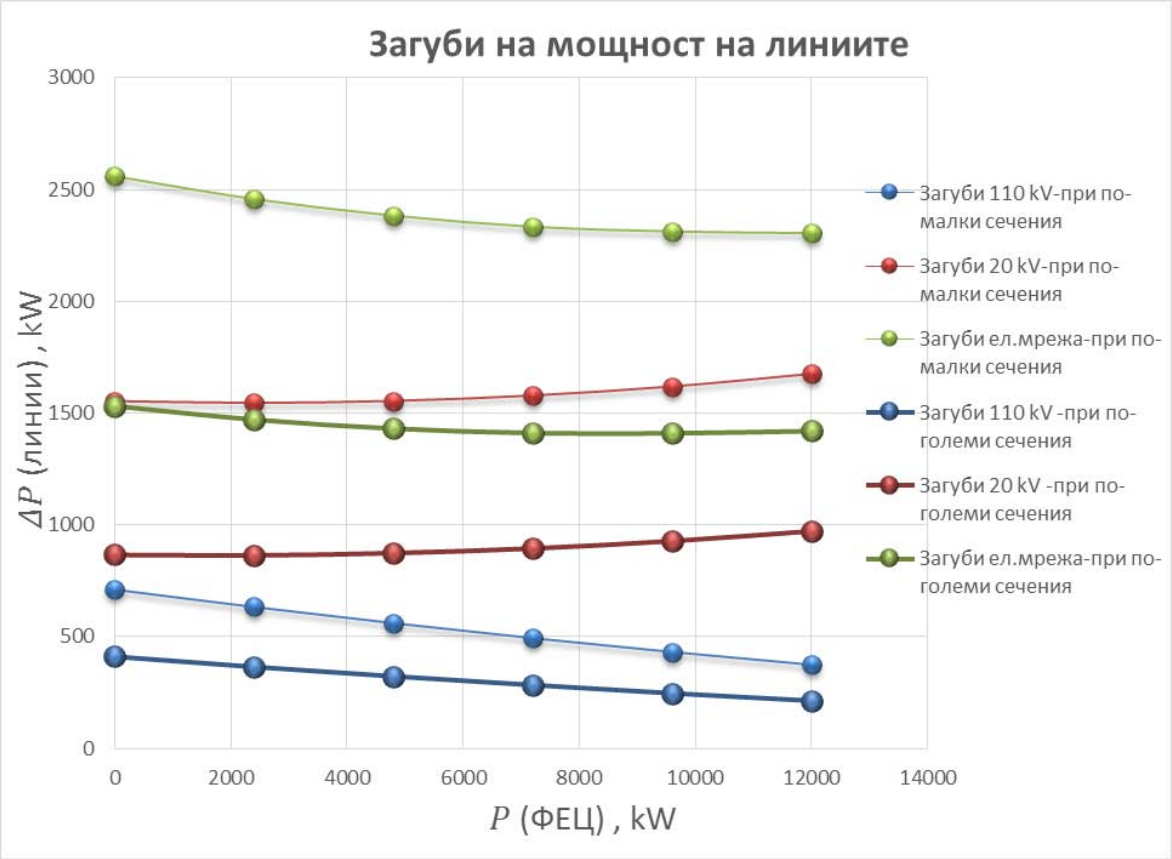
Табл.2.

Активна мощност на ФвЕЦ	$P_{ФЕЦ}$	kW	0	2400	4800	7200	9600	12000
Загуби на мощност на линия 110 kV	ΔP_{110}	kW	710,6	632,6	560	492,7	430,4	372,9
Загуби на мощност на линии 20 kV	ΔP_{20}	kW	1553	1545	1554	1578	1619	1676
Общи загуби на мощност в ел.мрежа	$\Delta P_{ел.мр}$	kW	2559,6	2456,6	2382	2331,7	2310,4	2302,9

В табл. 3. са представени резултати от изчисленията при увеличени сечения на кабелните линии (всички сечения са с 1 стъпка по-високи).

Табл.3.

Активна мощност на ФвЕЦ	$P_{ФЕЦ}$	kW	0	2400	4800	7200	9600	12000
Загуби на мощност на линия 110 kV	ΔP_{110}	kW	411	365	323	284	247	214
Загуби на мощност на линии 20 kV	ΔP_{20}	kW	866	864	874	895	928	972
Общи загуби на мощ-ност в ел.мрежа	$\Delta P_{ел.мр}$	kW	1532	1471	1431	1411	1410	1420



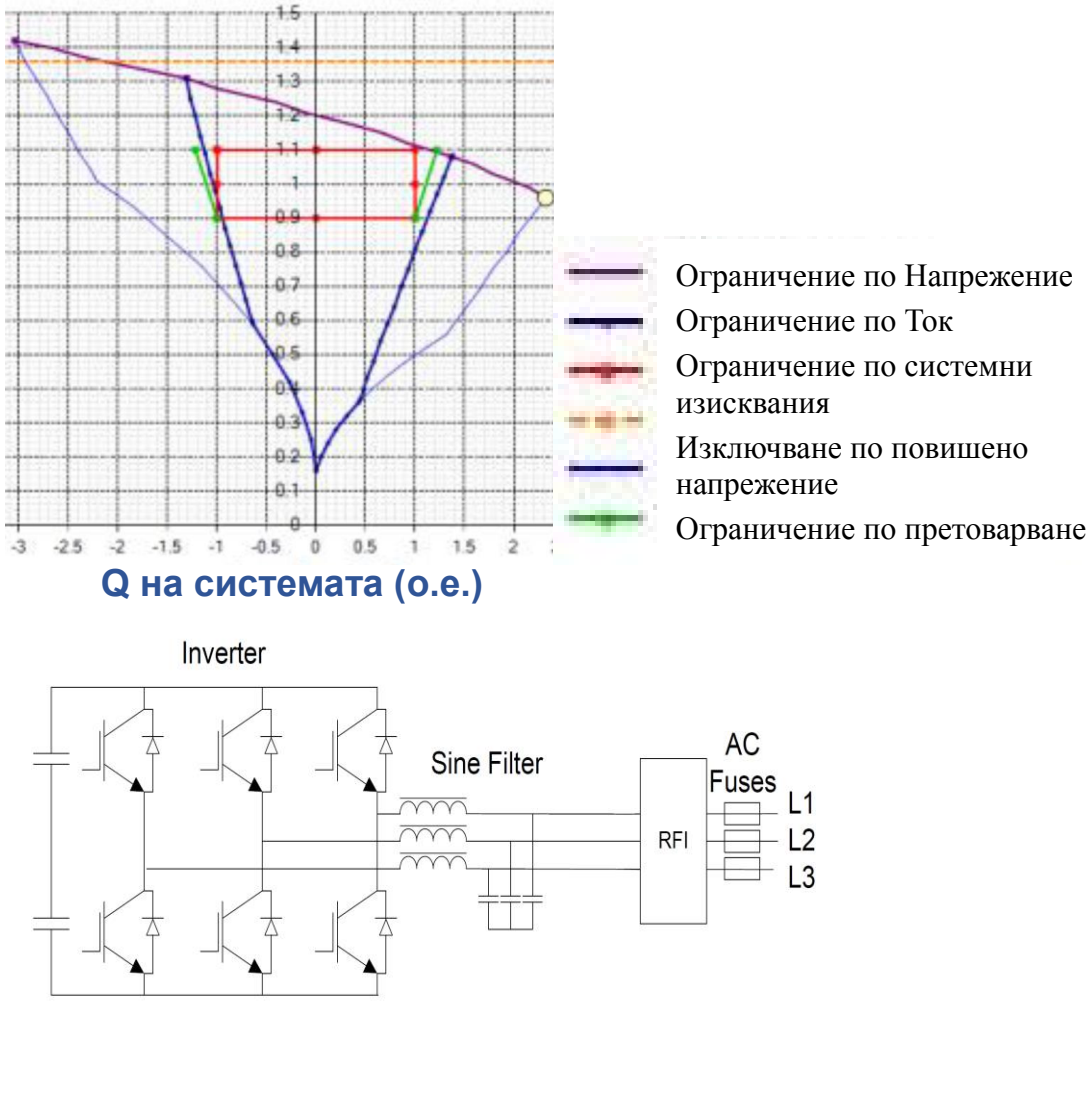
Фиг.4. Загуби на активна мощност в линиите.

Резултатите представени на графиката на фиг.4 могат да бъдат обяснени с факта, че при по-големи сечения активното съпротивление и импедансът на връзките намалява и активните загуби намаляват. Капацитетът на кабелните линии нараства поради по-високият специфичен капацитет, повишава се капацитивната мощност „генерирана“ от кабелите. Капацитетът на кабелите води до прехвърляне на реактивна мощност и може да доведе до допълнителни проблеми свързани с качеството на електрическата енергия [4,5].

6. ПРОБЛЕМИ СВЪРЗАНИ С ДОБАВЕНИТЕ РЕАКТИВНИ ЕЛЕМЕНТИ В ЕЕС

За целите на конкретното изследване е прието прилагане на компенсатор на реактивна енергия тип „STATCOM“ във възел от модела (фиг.5).

Статичният синхронен компенсатор (STATCOM), понякога описван като статичен синхронен кондензатор /Static Synchronous CONdenser/ (STATCON), е регулиращо устройство, прилагано в мрежи с променливо напрежение. Схемата на устройството е конверторна, като може да „черпи“ или „отдава“ реактивна енергия – да работи като „капацитет“ или „индуктивност“. Присъединяването на конверторния модул към мрежата е през трансформатор. Попада в категорията елементи на системите за гъвкав пренос на променлив ток (FACTS). Типично приложение на STATCOM за корекция на фактора на мощността, посредством компенсиране на реактивната мощност в определени точки на ЕЕС [2,3].



Фиг.5. Опростена схема и характеристики на STATCOM компенсатор.

Прилагането на STATCOM спомага за регулирането на напрежението на възлите в EEC. STATCOM се явява източник на напрежение, като за източник на напрежение се ползва кондензатор, работещ на постоянно напрежение. STATCOM има ограничени възможности да отдава в мрежата активна енергия.

За отдаване в EEC на активна мощност – на шини постоянно напрежение (DC) паралелно на кондензатора може да бъде свързана акумулаторна батерия. STATCOM има по-малки времеконстанти и респективно по-малки времена за реакция от статичните компенсатори на реактивна енергия от „класически тип“, които типично работят с тиристорни ключови елементи [5,6].

Бързодействието се осигурява от IGBT транзистори в конвертора на STATCOM.

При STATCOM има по-добро регулиране на изходната мощност при ниски стойности на променливото напрежение, тъй като има линейна зависимост между намаляването на реактивната мощност и намаляването на напрежението [7,8,9,10].

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Софтуерният продукт Неплан със значителния брой възможности, които предоставя позволява да се проектират и анализират електрически мрежи и системи. Софтуерът позволява да изследват техните режими по удобен и нагледен начин. Неплан е съобразен да работи с всички изисквания по Европейски (IEC) и Американски стандарт (ANSI).
От получените резултати можем да бъдат направени редица изводи:

При присъединяване на генериращи източници в близост до потребителите загубите на мощност в електропреносната мрежа намаляват, но следва да бъдат взети предвид параметрите на разпределителните мрежи, към които са присъединени съответните генерации. Трябва се направи и следното уточнение: загубите на мощност ще намаляват, ако сеченията на връзките на разпределителната мрежа са оразмерени за прехвърляне на мощностни потоци от крайни точки на мрежата към „по-горестоящи“ в разпределителната схема секции. Ако новите „разпределени“ генериращи мощности надхвърлят проектната мощност на съответните линии е възможно увеличаване на загубите, особено когато няма потребление в крайните точки.

При присъединяване на генерация към клонове от разпределителната мрежа, оразмерени за разпределителни функции е възможно в определени случаи загубите по преносните линии да намалеят, но поради малки сечения на съществуващите линии (СрН) загубите като цяло да се повишат.

При присъединяване на генерация от типа на ФвЕЦ и ВяЕЦ необходимостта от изграждане на кабелна мрежа за концентриране на произведената ел. енергия води до „генериране“ на капацитивна енергия. В режим на ограничени производство (ВяЕЦ), или при отсъствие на предпоставки за производство (ФвЕЦ нощно време) има предпоставки за повишаване на напрежението във възлите на ЕЕС. Следва да бъдат предвидени технически средства за ограничаване на „добавените капацитети“ – частично изключване на мрежата (където това е възможно) или предвиждане на средства за компенсация.

За компенсация на реактивната мощност, генерирана от кабелите в модела е използван статичен компенсатор тип „StatCom” – с реактивни елементи работещи на постоянно напрежение. Предимството на технологията е възможността за работа както за „положителна“, така и „отрицателна“ реактивна мощност, в зависимост от особеностите на режима. В перспектива технологията позволява и присъединяване на буферни акумулаторни батерии в постояннотоковата част на конвертора.

Разработеният модел може да се използва за моделиране на влиянието на генератори присъединени към разпределителни мрежи върху параметрите на режима, разпределянето на мощностните потоци и загубите на мощност.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ABB Инструкции за работа със софтуер Неплан, www.abb.com

[2] ABB, Statcom manuals and catalogs, Неплан, www.abb.com

[3] ABB. Michael Neutz, ***Power Quality Voltage Stabilisation for Industrial Grids and Wind Farms with STATCOM***, ABB Switzerland Ltd, MV Power Converters – Jornadas Técnicas ABB en Chile 2013

[4] Bhim Singh, Ambrish Chandra, and Kamal Al-Haddad, ***Power Quality problems and Mitigation Techniques***, First edition, 2015, John Wiley and Sons Ltd, West Sussex

[5] Nikolay Matanov, Ivan Angelov, ***Electrical loads and profiles of public buildings***, Proceedings of 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2017, pp 233-238

[6] Arindam Chakraborty, Sh. K. Musunuri, An. K. Srivastava and Anil K. Kondabathini, ***Integrating STATCOM and Battery Energy Storage System for Power System Transient Stability: A Review and Application***, Advances in Power Electronics Volume 2012 (2012), Article ID 676010

[7] G. M. Reddy, T. G. Manohar. ***Multi-Level Inverter Based STATCOM for Grid Connected Wind Energy Conversion System***. International journal of renewable energy research, Vol.7, No.1, 2017

[8] Mahammad A Hannan. ***Effect of DC Capacitor Size on D-STATCOM Voltage Regulation Performance Evaluation***, Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 12a/2012, pp 243-246

[9] Singh MD, Mehta RK & Singh AK: ***Current source converter based D-STATCOM for voltage sag mitigation***. Int. J. Simul. Multis.Des.Opt., 2015,6 A5

[10] L. A. Trujillo Guajardo, A. Conde Enríquez, Book Chapter: ***Wind Power Plants and FACTS devices influence in the performance of distance relays***, https://www.researchgate.net/publication/259099639

Автори: Димитър Христов Богданов, доц. д-р инж, Електротехнически Факултет, катедра „Електроенергетика”, Технически Университет-София, E-mail address: *dbogdanov@tu-sofia.bg* ; **Тефик Абдурахманов Фърладжов**, инж., E-mail address: *tefik.farladzhov@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: д-р инж. Никола Николов

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ ЗА ОПТИМАЛНО ОПЕРИРАНЕ НА МИКРОМРЕЖА

Кристиан Кадиев, Веселина Трашлиева, Димо Стоилов

Резюме: *Съставен е математически модел за изграждане на оптимален 24-часов график за производство, консумация, отдаване и акумулиране на електрическа енергия от управляеми и неуправляеми източници, товари и акумулиращи устройства. Използват се прогнозни графици за неуправляемите товари и източници на електроенергия и почасови стойности за покупка и продажба и от микромрежата енергия. За решаване на задачата се използва среда Matlab®.*
Ключови думи: *оптимално оперирање на микромрежа, оптимално акумулиране и произвеждане на електроенергия, оптимални стратегии за работа*

MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMAL OPERATION OF A MICROGRID

Kristian Kadiev, Vesselina Trashlieva, Dimo Stoilov

Abstract: *A mathematical model is developed for the evaluation of an optimal microgrid's power production, consumption and storage scheduling.. The input data consists of forecasted values for the fixed load of the microgrid, its photovoltaic installation's power generation forecasted schedule and hourly values for the purchase and sale price of electrical energy. The paper presents two scenarios for two different seasons presented by two distinct input datasets. The problem is solved in the Matlab® IDE.*
Keywords: *optimal operation of a microgrid, optimal power storage and production, optimal operation strategies*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Микромрежите могат да работят както в изолиран режим без връзка с мрежата, така и като обособен обект в локалната разпределителна мрежа [1,2]. Счита се, че подобна реализация на микромрежите ще бъде в основата на разпределителните мрежи на бъдещето и ако микромрежите оперират ефективно, то чрез тях ще се постигне ефективно разпределено производство (*distributed power generation*) [3]. Целите на такава реализация се описват с понятия като повишена енергийна ефективност, намаляване на загубите в мрежите, допълнително повишаване на ефективността чрез подходящо управление и мониторинг, комбинирано топло- и електропроизводство и др., като по този начин се постига намаляване

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

на парниковите емисии, подобряване качеството на услугата за снабдяване с електрическа енергия и надеждност на доставките [4].

Разглежданата тук постановка се отнася за микромрежа, разполагаща с управляеми и неуправляеми източници на електроенергия и консуматори, и акумулиращо устройство. Целта на задачата е определяне на оптимално съотношение между купуваната и отдавана към преносната мрежа електроенергия, така че паричните приходи да бъдат максимални.

Неуправляемите консуматори работят по известен товаров график.

Управляемите товари по време са 3 бр. – перална машина, миялна машина и помпа за вода. Под у*правляеми товари по време* следва да се разбира, че консумацията в единичния интервал на тези товари може да бъде диспечирана в интервалите на денонощието чрез въвеждане на допълнителни изкуствени двоични променливи, като по този начин, задачата спада към класа на задачите от смесено целочисленото програмиране[5-7]. Приема се, че всеки управляем консуматор се характеризира с определена (фиксирана) продължителност на единичния цикъл на работа.

Захранването на товарите се осъществява от 3 източника – фотоволтаична инсталация, бензинов генератор и обществената (външната) мрежа.

Фотоволтаикът работи по известни прогнозни данни за денонощие за съответния сезон. Той спада към *неуправляемите* източници на енергия като произведената енергия от него трябва да бъде консумирана, акумулирана в акумулаторна батерия или отдадена във външната мрежа в съответния времеви интервал.

Използването на бензинови генератори е скъпо и произведената от тях електрическа енергия обикновено е с много по-висока себестойност, отколкото енергията, която може да бъде закупена от мрежата. За *това тези управляеми източници* имат предимно резервираща функция.

Захранването от външната мрежа се изпълнява на двутарифен план. Известни са почасовите цени за продажба и покупка на отдаваната и консумираната енергия.

2. ФОРМУЛИРАНЕ НА МОДЕЛА

В модела се използват следните означения:

j - индекс за единичен времеви интервал;

Оптимизируеми (определяни) величини:

$P_{N,j}$ - закупена от външната мрежа електроенергия през интервал j;

$P_{S,j}$ - отдадена към външната мрежа електроенергия през интервал j;

$P_{PV,j}$ - генерирана електроенергия от фотоволтаика през интервал j;

$P_{G,j}$ - генерирана електроенергия от бензиновия генератор през интервал j;

$P_{a,j}$ - акумулирана енергия в акумулаторната батерия през интервал j;

$P_{Ga,j}$ - отдавана енергия от акумулаторната батерия през интервал j;

$P_{B,j}$ - налична енергия в акумулаторната батерия през интервал j;

$P_{nf,j}$ - консумирана енергия от управляемите товари през интервал j;

$v_{LM,j}$ - двоична променлива, която приема стойност 1 при работа на пералната машина през единичния интервал j и стойност 0 при изключена перална машина;

$v_{WM,j}$ - двоична променлива, която приема стойност 1 при работа на миялната машина през единичния интервал j и стойност 0 при изключена миялна машина;

$v_{WP,j}$ - двоична променлива, която приема стойност 1 при работа на водната помпа през единичния интервал j и стойност 0 при изключена водна помпа;

u_j - двоична променлива, която приема стойност 1 при акумулиране на енергия в акумулаторната батерия през интервала j и стойност 0 при отдаване на акумулирана енергия от батерията;

v_j - двоична променлива, която приема стойност 1 при отдаване (продажба) на енергия към външната мрежа и стойност 0 при закупуване на енергия;

$s_{LM,j}$ - двоична променлива, която приема стойност 1, когато пералната машина започва работния си цикъл в началото на интервал j;

$f_{LM,j}$ - двоична променлива, която приема стойност 1, когато пералната машина завършва работния си цикъл в началото на интервал j;

$s_{WM,j}$ - двоична променлива, която приема стойност 1, когато миялната машина започва работния си цикъл в началото на интервал j;

$f_{WM,j}$ - двоична променлива, която приема стойност 1, когато миялната машина завършва работния си цикъл в началото на интервал j;

Известни и прогнозирани величини:

η_B - коефициент на полезно действие на цикъла акумулиране – отдаване на акумулаторната батерия.

$P_{f,j}$ - консумирана енергия от неуправляемите товари през интервал j;

$P_{LM}^{\max}$ - консумация на пералната машина;

$P_{WM}^{\max}$ - консумация на миялната машина;

$P_{WP}^{\max}$ - консумация на водната помпа;

$P_a^{\max}$ - максимална мощност на зареждане на акумулаторната батерия;

$P_{Ga}^{\max}$ - максимална мощност на разреждане на акумулаторната батерия;

$P_N^{\max}$ - максимално количество електроенергия, което може да бъде закупено от външната мрежа съгласно договора за доставка на електроенергия;

$P_S^{\max}$ - максимално количество електроенергия, което може да бъде отдадено в мрежата съгласно договора за доставка на електроенергия;

$P_B^{\max}$ - капацитет на акумулаторната батерия;

$\hat{P}_{PV,j}$ - прогнозни денонощни данни за енергията, генерирана от фотоволтаичната инсталация, за съответния сезон;

$c_{N,j}$ - покупна цена на енергията от външната мрежа през интервал j;

$c_{S,j}$ - продажна цена на енергията към външната мрежа през интервал j;

c_G - специфична цена на енергията, произведена от бензиновия генератор;

При съставянето на модела е приета продължителност на единичния времеви интервал от 1 час. Оптимизацията се извършва за период от 24 часа, т.е. $j = \overline{1,24}$.

Целевата функция представлява общата оперативна печалба, представена като разликата между прихода от продажба на енергия на съответното разпределително дружество и оперативните разходи за закупуване на енергия от разпределителната мрежа и за собствено производство:

$$\max J = \sum_j c_{S,j} P_{S,j} - \sum_j c_{N,j} P_{N,j} - \sum_j c_G P_{G,j}, j = \overline{1,24} \quad (1)$$

при следните ограничения:

Балансови условия, осигуряващи баланса на консумираната и генерираната електроенергия във всеки интервал j:

$$P_{f,j} + P_{S,j} + P_{a,j} + v_{LM,j} P_{LM}^{\max} + v_{WM,j} P_{WM}^{\max} + v_{WP,j} P_{WP}^{\max} = P_{N,j} + P_{G,j} + P_{PV,j} + P_{Ga,j}, j = \overline{1,24} \quad (2)$$

Ограничения (3) определят количеството енергия, натрупана в акумулаторната батерия през всеки един единичен интервал j, отчитат загубите на енергия при цикъла зареждане-разреждане на батерията и гарантират, че от нея не може да бъде черпена енергия по-голяма от съхранената в дадения интервал:

$$\eta P_{a,j} - P_{Ga,j} + P_{B,j} - P_{B,j+1} = 0, j = \overline{1,24} \quad (3)$$

Ограничение (4) задава нулева начална стойност на енергията съхранена в батерията:

$$P_{B,1} = 0 \quad (4)$$

Освен ограничаване на съответните максимални стойности, чрез (5) и (6) се гарантира изискването да няма едновременно акумулиране и отдаване на акумулирана енергия:

$$P_{a,j} - u_j P_a^{\max} \le 0, j = \overline{1,24} \quad (5)$$

$$P_{Ga,j} - (1 - u_j) P_{Ga}^{\max} \le 0, j = \overline{1,24} \quad (6)$$

Освен ограничаване на количествата (7) и (8) гарантират изискването да няма едновременно продаване и закупуване на електроенергия от мрежата:

$$P_{N,j} - v_j P_N^{\max} \le 0, j = \overline{1,24} \quad (7)$$

$$P_{S,j} - (1 - v_j) P_S^{\max} \le 0, j = \overline{1,24} \quad (8)$$

Ограничения определящи продължителността на работния цикъл на управляемите товари:

$$\sum_j v_{LM,j} = d_{LM}, j = \overline{1,24} \quad (9)$$

$$\sum_j v_{WM,j} = d_{WM}, j = \overline{1,24} \quad (10)$$

$$\sum_j v_{WP,j} = d_{WP}, j = \overline{1,24} \quad (11)$$

Ограничения осигуряващи непрекъсваемостта на работния цикъл на пералната машина:

$$s_{LM,j} - v_{LM,j} \le 0, j = \overline{1,24} \quad (12)$$

$$s_{LM,j} - f_{LM,j} = v_{LM,j} - v_{LM,j-1}, j = \overline{1,24} \quad (13)$$

$$f_{LM,j} + v_{LM,j} \le 1, j = \overline{1,24} \quad (14)$$

$$s_{LM,j} + \sum_{k=j+1}^{j+d_{LM}-1} f_{LM,k} \le 1, j = \overline{1,24} \quad (15)$$

Ограничения осигуряващи непрекъсваемоста на работния цикъл на миялната машина:

$$s_{WM,j} - v_{WM,j} \le 0, j = \overline{1,24} \quad (16)$$

$$s_{WM,j} - f_{WM,j} = v_{WM,j} - v_{WM,j-1}, j = \overline{1,24} \quad (17)$$

$$f_{WM,j} + v_{WM,j} \le 1, j = \overline{1,24} \quad (18)$$

$$s_{WM,j} + \sum_{k=j+1}^{j+d_{WM}-1} f_{WM,k} \le 1, j = \overline{1,24} \quad (19)$$

Променливите имат следните граници на изменение:

$$0 \le P_{G,j} \le P_G^{\max}, j = \overline{1,24} \quad (20)$$

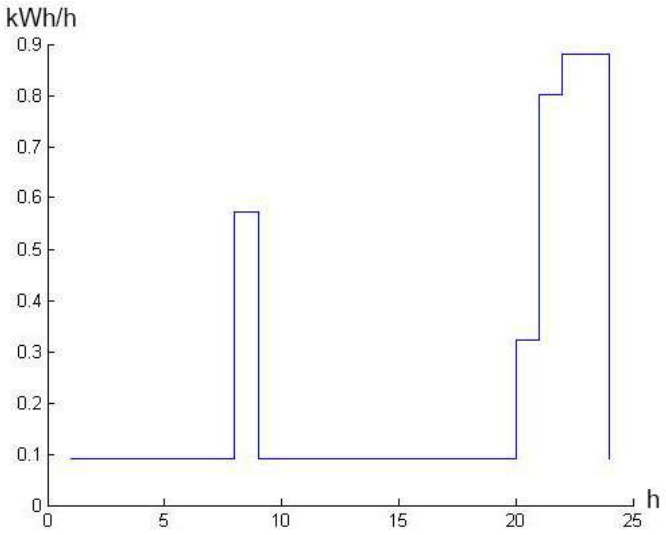
$$0 \le P_{PV,j} \le \hat{P}_{PV,j}, j = \overline{1,24} \quad (21)$$

$$0 \le P_{B,j} \le P_B^{\max}, j = \overline{1,24} \quad (22)$$

Така формулираният модел представлява задача на смесено целочисленото линейно програмиране с 384 променливи, 216 от които са двоични, и 340 ограничения – 100 ограничения тип равенство и 240 ограничения тип неравенство.

3. ИЗХОДНИ ДАННИ

Товаровият график на неуправляемия товар е показан на фиг.1. Управляемите товари се характеризират с постоянна (фиксирана) консумация и продължителност на работния цикъл, представени в табл.1.



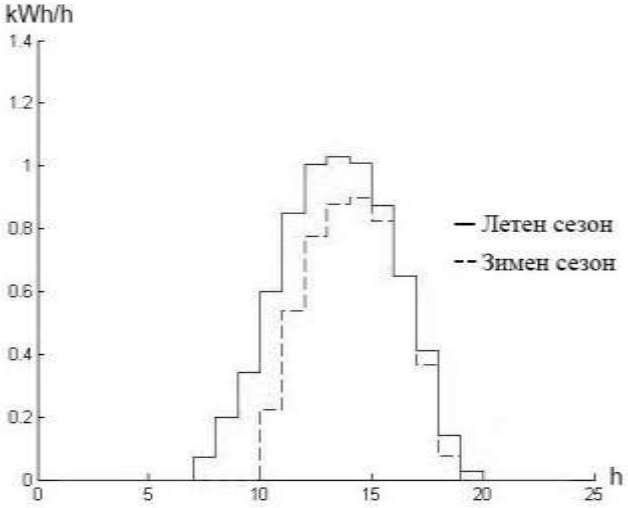
Фиг.1. Товаров график на неуправляемия товар на микромрежата

Табл.1.

Характеристики на управляемите товари

Управляем товар	Консумация	Продължителност на работния цикъл
Перална машина	0,75 kW	2 h
Миялна машина	0,525 kW	2 h
Водна помпа	0,0425	1 h

Фотоволтаичната инсталация работи според прогнозни данни за съответния сезон, представени на фиг.2.



Фиг.2. Прогнозни данни за енергията генерирана от фотоволтаика през съответния сезон

Цената на електроенергията, произведена от бензиновия генератор се приема за постоянна:

$$c_G = 0{,}6225 лв / kWh$$

Бензиновият генератор има максимална мощност:

$$P_G^{\max} = 3{,}5 kW$$

Електроенергията закупена от външната мрежа се таксува чрез двутарифен електромер. Цената е съответно:

$$c_{N,j} = 0{,}12936 лв./kWh, j \in [07:00ч.; 22:00ч.]$$

$$c_{N,j} = 0{,}0564 лв./kWh, j \in [01:00ч.; 06:00ч.] \cup [23:00ч.; 24:00ч.]$$

Цената, по която се извършва продажба на електроенергия към външната мрежа се приема равна на 80% от покупната цена, т.е.:

$$c_{S,j} = 0{,}8 c_{N,j}$$

Акумулиращото устройство има следните характеристики:

$$P_B^{\max} = 4{,}8 kWh$$

$$P_a^{\max} = 0{,}96 kW$$

$$P_{Ga}^{\max} = 1{,}6 kW$$

$$\eta_B = 0{,}86$$

4. РЕЗУЛТАТИ

Задачата се решава в средата Matlab®. Резултатите по представения модел за летен сезон са показани в табл.2. Използване на бензиновия генератор не се налага, т.е.:

$$P_{G,j} = 0, j = \overline{1,24}$$

Денонощната консумация на микромрежата е 7,7825 kWh. Произведената от фотоволтаичната инсталация енергия е 7,205 kWh, т.е. тя е не е достатъчна за покриването на нуждите на микромрежата. Останалото количество необходима електроенергия се закупува от външната мрежа през нощните часове, когато цената ѝ е по-ниска, и се акумулира в акумулаторната батерия. В този период работят и управляемите товари.

През дневните часове консумацията се покрива на първо място от фотоволтаичната инсталация. На фиг.3 е показано изменението на товара на микромрежата през денонощието. На същата фигура е представено и изменението на произведената електроенергия от фотоволтаика. Когато в даден интервал енергията произведена от фотоволтаика не е достатъчна за покриването на товара, той се покрива от акумулаторната батерия. Ако фотоволтаикът произвежда повече енергия от необходимата за нуждите на микромрежата, излишъкът се отдава на външната мрежа.

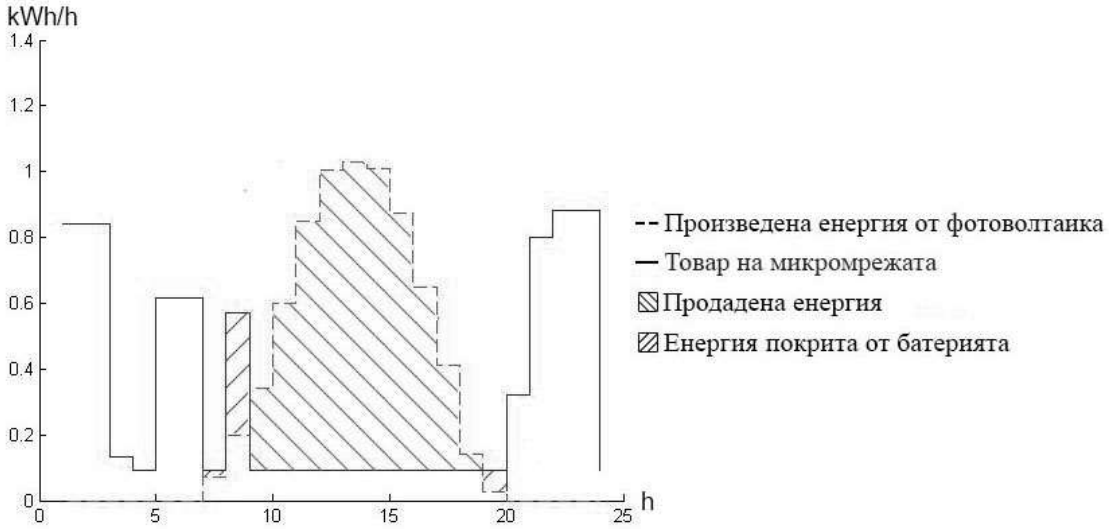
На фиг.4 е представен процесът на изменение на електрическата енергия запасена в акумулиращото устройство през отделните времеви интервали. В края на 6-тия интервал, т.е. в 06:00, е достигнат максималния капацитет на батерията от 4,8 kWh. В следващия 7-ми интервал цената на закупуване на електроенергия от външната мрежа нараства, тъй като се преминава в дневните часове на денонощието (т.е. на дневна тарифа). Част от енергията в батерията се запазва за по-нататъшното ѝ използване през периода между 18:00 и 22:00, когато слънчевата енергия е по-малко от товара, а цената за закупуване е все още висока. Остана-

лата в акумулиращите устройства енергия се отдава обратно във външната мрежа. Разликата между цените определени съответно от дневната и нощната тарифа е достатъчно голяма за да оправдае загубата на част от енергията при цикъла зареждане-разреждане на батерията, както и разликата между покупната и продажната цена.

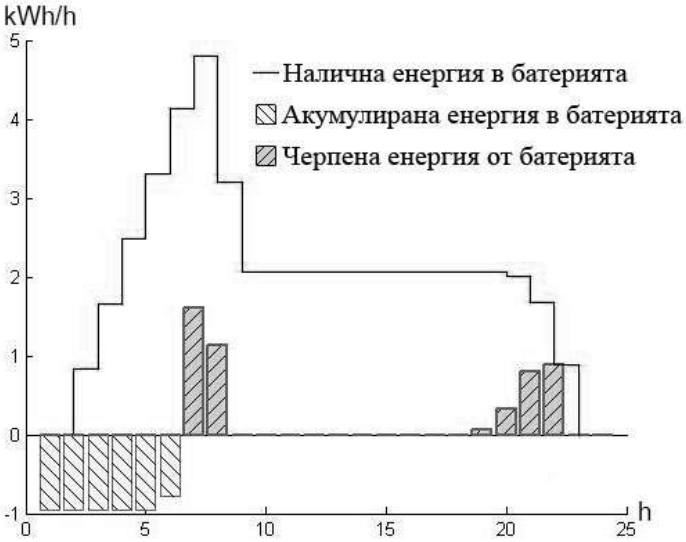
Табл.2.

Резултати за летен сезон

	j	$P_{N,j}$	$P_{S,j}$	$P_{a,j}$	$P_{Ga,j}$	$P_{nf,j}$
	-	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
Нощна тарифа	1	1.8012	0	0.9600	0	0.7500
	2	1.8012	0	0.9600	0	0.7500
	3	1.0937	0	0.9600	0	0.0425
	4	1.0513	0	0.9600	0	0
	5	1.5762	0	0.9600	0	0.5250
	6	1.3976	0	0.7814	0	0.5250
Дневна тарифа	7	0	1.5787	0	1.6000	0
	8	0	0.7587	0	1.1300	0
	9	0	0.2487	0	0	0
	10	0	0.5087	0	0	0
	11	0	0.7587	0	0	0
	12	0	0.9137	0	0	0
	13	0	0.9387	0	0	0
	14	0	0.9187	0	0	0
	15	0	0.7837	0	0	0
	16	0	0.5587	0	0	0
	17	0	0.3187	0	0	0
	18	0	0.0487	0	0	0
	19	0	0	0	0.0663	0
	20	0	0	0	0.3213	0
	21	0	0	0	0.8012	0
	22	0	0	0	0.8813	0
Нощна тарифа	23	0.8813	0	0	0	0
	24	0.0913	0	0	0	0



Фиг.3. Осъществяване на баланса между произведена, консумирана и отдадена електроенергия



Фиг.4. Изменение на електрическата енергия запасена в батерията

Стойността на целевата функция за летен сезон, изчислена по формула (1), е 0,186238 лв. Ниската стойност на оперативната печалба се дължи на факта, че микромрежата има по-висока консумация от енергията, която фотоволтаикът може да произведе. През зимен сезон, когато наличната слънчева енергия е още по-малко, целевата функция приема дори отрицателна стойност -0,085134 лв., т.е. микромрежата работи с разход от 0,085134 лв./ден.

Ако мощността на фотоволтаика се увеличи с 50%, приходите за летен ден се увеличават до 0,682489 лв.

От значение за стойността на целевата функция е и наличието на акумулиращо устройство. Така например, ако микромрежата не разполага с акумулаторна батерия, стойността на целевата функция е -0,005934 лв.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработеният математически модел представлява удобен инструмент за планиране и управление работата на микромрежа. Той позволява разработването на стратегии за управление на нефиксирано генериране, товари и акумулиране на електрическа енергия. Чрез него може да бъде направено сравнение между работата на микромрежа, характеризираща се с даден товаров график, и инсталирани фотоволтаична система и акумулиращо устройство с различни параметри и да бъде направена икономическа оценка на възвращаемостта на подобна инвестиция.

Въпреки че моделът е разработен за микромрежа с ниски стойности на консумацията и малък брой елементи, той може лесно да бъде доразвит за по-големи мрежи с голям брой консуматори и източници.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Hadjsaid N., Sabonnadiere J. C., SmartGrids, Willey – ISTE, 2012, ISBN 978-1-84821-261-9, 350 p.

[2] Galvin Electricity Initiative, What are Smart Microgrids?, available at http://www.galvinpower.org/ microgrids

[3] Lopes J., Madureira A., Moreira C., A view of microgrids, Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment Vol. 2, Issue 1, 2013, p. 86-103

[4] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Gerald B. Sheble, Power Generation Operation and Control, third edition, John Wiley&Sons 2014;

[5] Bradley S., Hax A., Magnanti T., Applied Mathematical Programming, 1977;

[6] Singiresu S. Rao, Engineering Optimization Theory and Practice, fourth edition, John Wiley&Sons 2009;

[7] Стоилов Д. Г., Янев К. И., Режими на електроенергийни системи, Технически университет – София, София 2011.

Автори: Кристиан Кадиев, бак. инж., E-mail address: *kadiev23@abv.bg*; **Веселина Трашлиева**, ас. маг. инж., катедра „Електроенергетика“, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vesselina.trashlieva@gmail.com*; **Димо Стоилов**, доц. д-р, катедра „Електроенергетика“, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *dstoilov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Рад Станев

ВЛИЯНИЕ НА ВЕИ ВЪРХУ СИГУРНОСТТА НА ЕНЕРГИЙНАТА СИСТЕМА НА БЪЛГАРИЯ

Борислав Бойчев

Резюме: *В доклада се разглежда влиянието на възобновяемите енергийни източници (ВЕИ) върху електроенергийната система на България чрез симулация в програмата Power World Simulator. Данните за системата се събират от мрежовия оператор - базата данни на България. Системата е изследвана със и без допълнителни възобновяеми източници и на тази основа е извършен сравнителен анализ на получените резултати в двата случая.*
Ключови думи: *сигурност, ВЕИ, електроенергийна система*

INFLUENCE OF RENEWABLE SOURCES OF THE SECURITY OF THE ENERGY SYSTEM OF BULGARIA

Borislav Boychev

Abstract: *In the paper the influence of renewable energy sources on Bulgaria's energy system through simulation in the Power World Simulator program, is considered. The system data collect by the network operator in the database of Bulgaria. The system is analyzed with and without additional renewable sources, and on this base the comparison of the respective results, is made.*
Keywords: *security, Renewable Energy Sources, power system*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременния свят търсенето на енергия е все по-нарастващо. Както големите градове стават митрополити и индустрията увеличава производството с бързи темпове и количеството консумирана енергия също се увеличава. Все по-вече и повече електрически уреди се включват към електрическата мрежа и нейната сигурност и безопасност и е застрашена. И все пак, всеки потребител изисква енергията да е с определени параметри - честота и напрежение. Неочакваното спиране на електрозахранването и неочакваните аварии може да причинят тежки финансови пречка за икономиката. Поради тези причини е необходим подробен анализ на извънредните ситуации. Винаги се изисква и извършва анализ за цялата система в голяма дълбочина. Всички нарушения при извънредни ситуации следва да бъдат анализирани, за да може системата да работи с пълен капацитет, защита и сигурност. От друга страна все повече започваме да преминаваме към възобновяеми енергийни източници като вятър, слънце, вода. Тези източници на енергия се използват все повече във всяка страна по света. Основ-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ният фокус на това изследване е акцентиран върху анализа на вятърни, водни и слънчеви генератори и върху това как те влияят на сигурността и безопасността на системата.

Един от най-големите отрицателни аспекти на възобновяемите енергийни източници е, че те не разполагат с фиксирана стойност за техния източник "гориво". Мощността на източника може да се промени във всеки един момент. При предаване на енергия към клиентите - домакинства или промишлени предприятия, мрежовия оператор е длъжен да осигури определено количество енергия с необходимото качество. Това е държавна регулация за защита на електрическите уреди. При определяне на специфична продукция на вятърни и соларни паркове, ЕСО увеличава сигурността на мрежата. ВЕИ централите може да не работят на 100 % от капацитета си, но пък финансовите загуби ще са далеч по-малки от евентуалните аварии в системата. Регулирането на този вид централи и добро усвояване на природните ресурси от по-голямата част на деня (в зависимост дали е вятърна или слънчева централа) позволява на операторите да бъдат направени по-предвидими товарите, за определен период и кое може да се покрие от ВЕИ централите. Този тип координация изисква много усилия от всички участници в мрежата, но в дългосрочен план резултатът ще бъде намаляване на разходите и по-високо ниво на сигурност. Напрежението в контролните точки е добър пример за това и въпреки че системата може да поддържа редовно захранване, дори ако напрежението е ± 5 %, това отклонение може да бъде балансирано от ВЕИ централите.

Осигуряване на качествено захранващо напрежение с ефективна стойност 230 *V* към консуматорите на електрическа енергия е от съществено значение както при промишлените, така и при битовите консуматори. Всеки от нас ежедневно се нуждае от постоянно захранване на осветлението в офиса, в жилището си или на друго работно място [8]; от постоянно захранване на електроуредите в дома си (хладилник, телевизор, пералня и т. н.); техниката на работното място или у дома – PC, принтери, скенери, DVD и т. н.

2. СИМУЛАЦИЯ НА ЕЛЕКТРОПРЕНОСНАТА СИСТЕМА НА БЪЛГАРИЯ

2.1. Събиране на данни

Необходимите данни за симулация на товара са събрани от ЕСО. Тази информация се публикува ежедневно и се събира в база данни. В края на годината, всички измерени данни се публикуват в годишен доклад. [3] [4] [5]

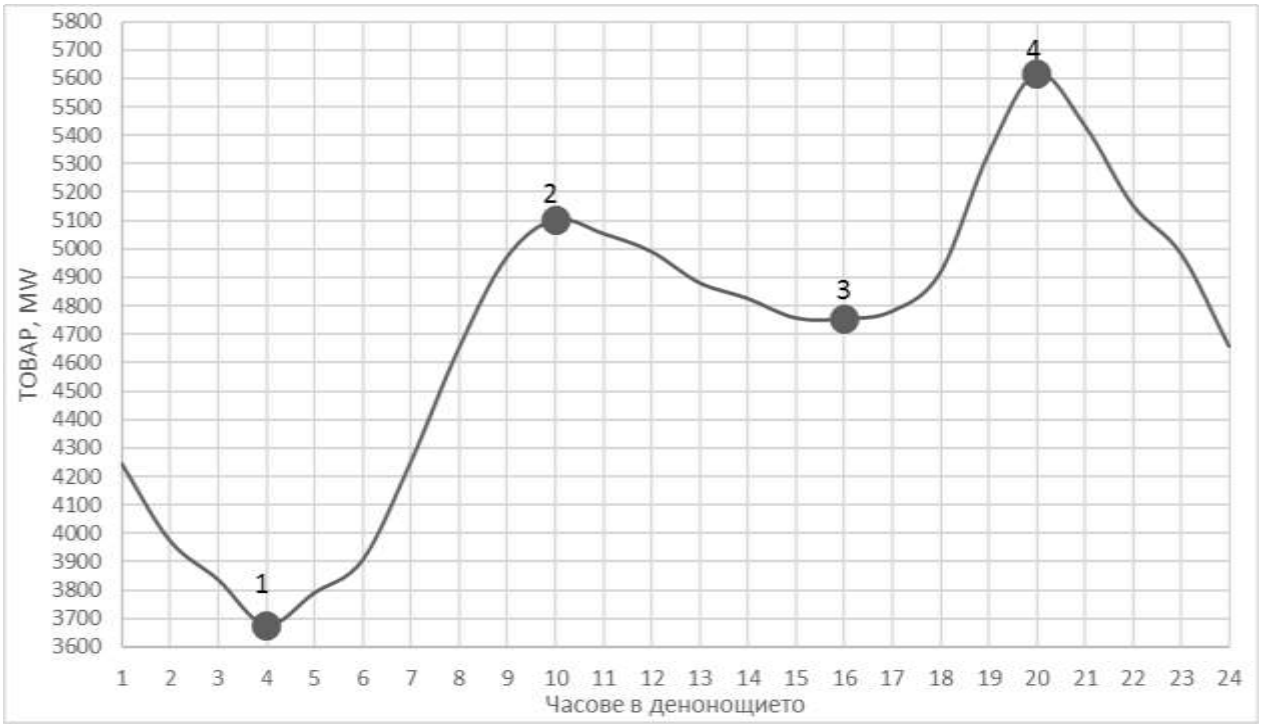
Периодът, използван в работата, е март 2015 г.

Формули (1) и (2) се използват за изчисляване на средната стойност на товара за всеки час на деня. "P_n" (n = 1 - 24) е часът от деня, за който се изчислява средната стойност $P_{n\text{-}avr}$.

$$P_{n\ avr} = \sum_1^{31} P_n / 31 \quad (1)$$

$$P_{1\ avr} = \sum_1^{31} P_1 / 31 \quad (2)$$

На фиг.1 е изобразена графика на средно натоварване за едно денонощие.



Фиг.1. Почасово разпределение на средното натоварване за едно денонощие

Четирите маркирани точки са точките, които са предмет на анализ в проекта. Това са два минимума и два максимума.

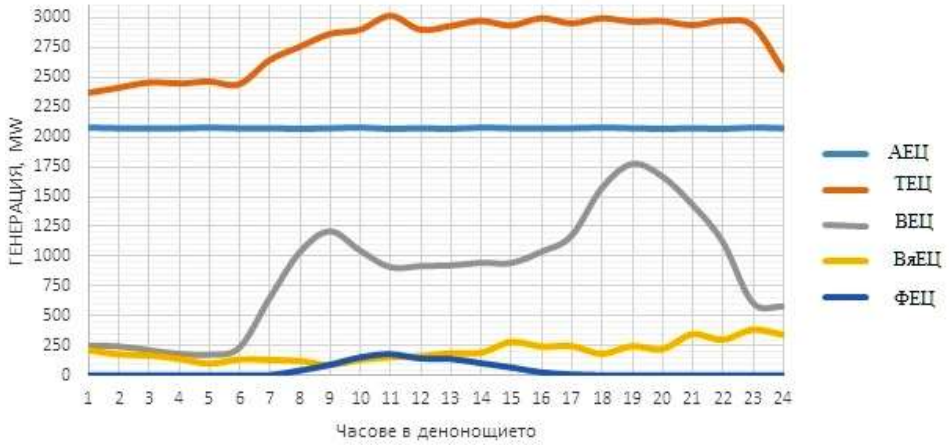
Точка 1 - Първият дневен минимум е в 04:00 часа. В този момент само базовия товар е налице. Той рядко се променя. На този етап няма почти никакъв битов товар.

Точка 2 - Първият дневен максимум е в 10:00 часа. В този момент товарът е предимно промишлен, като по-голямата част от хората са на работа и производството е с пълен капацитет.

Точка 3 - Вторият минимум е в 16:00 часа. Работният ден свършва на повечето места и хората се връщат у дома. В този момент двата промишлени и битови товара са ниски.

Точка 4 - Вторият максимум е в 20:00 часа. В този момент само някаква част от промишлеността работи, но битовият товар е най-голям.

На фиг.2 са показани обобщени данни от генерираната енергия от различни източници за едно денонощие.



Фиг.2. Електрическа енергия, генерирана от АЕЦ, ТЕЦ, ВЕЦ, ВяЕЦ и ФЕЦ за едно денонощие

2.2. Профили на генерираната енергия от различните видове източници

В реалната енергийна система съществуват много конвенционални централи. Те са групирани в 11 големи централи според географското местоположение и свързване към разпределителната мрежа. Някои от електроцентралите са свързани към преносната мрежа на 400 kV, а други - на 110 kV. Всички те са разделени на 6 различни вида:

- АЕЦ - една атомна електроцентрала - N1 (400 кV)
- ТЕЦ - четири топлоелектрически централи - T1-T4 (400 кV)
- ВЕЦ - три водноелектрически централи - H1-H3 (110 kV)
- ФЕЦ - една слънчева електроцентрала - S1 (110 kV)
- ВяЕЦ - една вятърна електроцентрала маркирана W1 (110 kV)
- ПАВЕЦ - една маркирана в PSH1 (400 kV)

Централите с възобновяеми горива се използват за проучване на ефекта, който те имат върху надеждността и сигурността на мрежата. [6][7]. Целта на настоящото изследване е подобряване на качеството на енергията, намаляване на загубите при преноса и подобряване на регулирането на напрежението.

2.3. Анализ

Мрежата се симулира и се анализира при две различни условия, всяка с 4 различни състояния. Първо, мрежата се симулира без никакви допълнителни ВЕИ генератори. Базовата мрежа се анализира в четирите основни точки с помощта на Contingency Analysis tool на Power World Simulator.

Във втората част на анализа се симулира т.нар. "оптимизирана мрежа", където се добавят много генератори, използващи възобновяеми източници на енергия в нивото на разпределение (20 kV). В този случай резултатът е подобряване на мрежата.[1][2]

Последната част на анализа е сравнение между резултатите от анализа на двете

извънредни ситуации. Резултатите са съпоставени по двойки - данните от анализа на базовата мрежа в 10:00 часа с данните от анализа на Contingency Analysis tool мрежа в 10:00 часа и т.н.

3. РЕЗУЛТАТИ

3.1. Анализ на базовата мрежа

За точката в 4:00 часа общият брой на нарушенията е 2.
За точката в 10:00 часа общият брой на нарушенията е 467.
За точката в 16:00 часа общият брой на нарушенията е 250.
За точката в 20:00 часа общият брой на нарушенията е 945.

3.2. Анализ на оптимизираната мрежа

За точката в 4:00 часа общият брой на нарушенията е 0.
За точката в 10:00 часа общият брой на нарушенията е 233.
За точката в 16:00 часа общият брой на нарушенията е 257.
За точката в 20:00 часа общият брой на нарушенията е 905.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качеството на електрическа енергия, доставяна до потребителите, и сигурността на мрежата за пренос и разпределение имат най-висок приоритет.
Необходимо е да се извършва задълбочен анализ на авариите и нарушенията и да се отстраняват всички предпоставки за настъпването им.

В разработката се анализира добавянето на ВЕИ в електроразпределителната мрежа. Мрежата е симулира чрез програмния пакет Power World Simulator.

Данните за моделиране на мрежата са взети от ЕСО.

Резултатите от симулацията показват, че присъединяването на ВЕИ подобрява общата производителност на системата. Това повишава нейното ниво на сигурност и надеждност.

Повечето части на системата са оптимизирани и са с намалени нарушения, но се наблюдават и райони, в които съществува увеличение на броя на прекъсванията и отклонения на напрежението.

Съществуват множество рискове и несигурност при присъединяването на все повече възобновяеми енергийни източници, но създаването на правилници и наредби, повече анализи и по-добро техническо изпълнение при присъединяването им могат да гарантират успешен плавен преход към зелена енергия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ciapessoni, E., *Effect of renewable and load uncertainties on the assessment of power system operational risk*, 2014, Durham: IEEE, pp. 1-6

[2] Castro, C., *Correctability of voltage violations in on-line contingency analysis*, Transactions on Power Systems, 2002, pp. 1651-1657

[3] http://www.tso.bg/default.aspx/loads/en

[4] http://www.tso.bg/default.aspx/page-707/bg

[5] http://www.tso.bg/default.aspx/operativna-spravka-za-energien-balans/bg

[6] Добрилов Д. , *Регулиране на нивото на напрежението в точките на присъединяване на малки ВЕЦ*, IV Научна конференция ЕФ 2012, Созопол, 28.09-01.10.2012 г., том 1, стр. 21-30

[7] Добрилов Д., А. Цолов, *Изследване факторите, влияещи върху напрежението в точките на присъединяване на малки ВЕЦ*, IV Научна конференция ЕФ 2012, Созопол, 28.09-01.10.2012 г., том 1, стр. 31-36

[8] Петракиева, С., Г. Георгиева-Таскова, З. Иванов, *Влияние на промяната на захранващото напрежение върху светлинния поток на разрядните лампи*, Годишник на ТУ-София, 2012, том 62, кн. 4, ISSN: 1311-0829, стр. 153-160 http://proceedings.tu-sofia.bg/volumes/Proceedings_Volume_62_book_3_2012.pdf

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

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Симона Петракиева

ОПТИМИЗАЦИЯ НА ИЗЧИСЛЕНИЯТА ЗА РАЗПРЕДЕЛИТЕЛЕН ТРАНСФОРМАТОР ЧРЕЗ АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЪВ FEMM С ПОМОЩТА НА LUA СКРИПТОВЕ

Виктор Захариев

Резюме: *Статията има за цел да демонстрира оптимизацията, по-бързото изпълнение, както и намаляването на времето за създаване на модели на разпределителен трансформатор, чрез употребата на Lua скриптове в програмната среда FEMM. Създадени са алгоритми базирани на Lua скриптове, които могат да бъдат използвани във FEMM. Базовият модел на разглеждания в статията разпределитен силов трансформатор е с намотки ниско напрежение свързани в схема двоен зиг-заг.*
Ключови думи: *FEMM; Lua скриптове; оптимизация; разпределителен силов трансформатор; THD.*

DISTRIBUTIVE POWER TRANSFORMER CALCULATIONS OPTIMIZATION IN FEMM USING LUA SCRIPT AUTOMATIZATION

Victor Zahariev

Abstract: *This paper presents the optimization, faster execution and the decrees of time needed for creating distributive transformer models using Lua scripts in the program environment FEMM. Algorithms are created based on Lua scripts that can be used in FEMM. The base model of the distributive power transformer used in the article has its low voltage windings connected in dual zig-zag.*
Keywords*: FEMM; Lua script; optimization; Distributive power transformer; THD.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

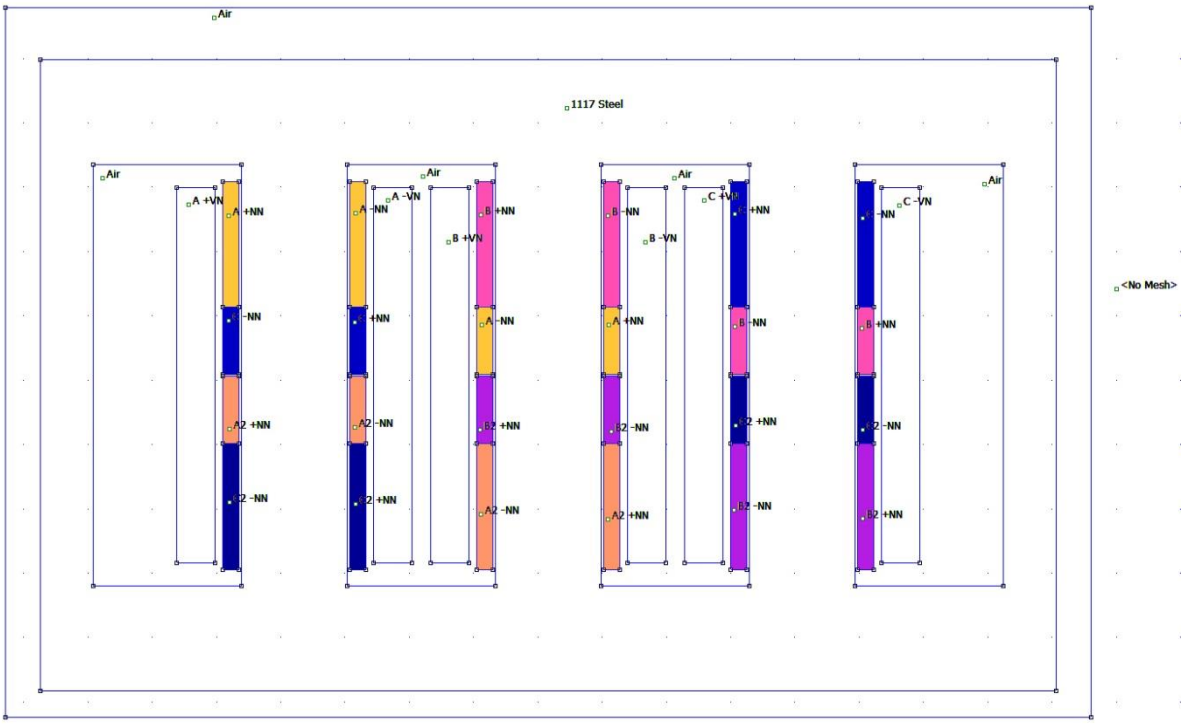
Създаването на точен модел на силов трансформатор е сложен процес която трябва да отрази реалните физически процеси протичащи в него. При създаването на модела трябва да се вземат в предвид стандартни изисквания, но също така и специфичните изисквания на клиента, както и различните условия на експлоатация.

Разпределителните трансформатори предназначени за работа във фотоволтаични електроцентрали имат своите особености. Специфичните условия са свързани с относително по-голямото количество хармоници създадени от силовите инвертори. Поради различното качество на инверторите трябва да се симулират входящи токове и напрежения с различен хармоничен състав. Тези различни входни величини, генерират голямо количество изходни данни, които също

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

изискват време за обработка. За намирането на най-добрата конструкция на трансформатор с вече определени основни размери е необходимо създаване на множество модели с различно съотношение между на броя на навивките в бобините участващи в създаването на една фаза. При този голям брой входни данни автоматизирането на въвеждането,създаването на съответстващи модели на трансформатора, създаването на скриптове води до значително намаляване на времето за изследване на един модел и премахва грешките при ръчно въвеждане на данните.



Фиг.1. Модел на трансформатора в FEMM.

Таблица 1

Параметри на моделирания разпределителнен трансформатор.

Трансформатор		
Параметър	Единици.	Стойност
Мощност	kVA	400
Брой ядра	-	3
Линейно напрежение НН (U_{l1})	V	400
Линейно напрежение ВН (U_{l2})	V	20000±5%
Честота	Hz	50
Схема на свързване НН	-	зиг-заг
Схема на свързване ВН	-	Δ
Охлаждане	-	Маслено
Напрежение късо съединение (u_k)	%	5
Загуби на празен ход (P_0)	W	1100
Ток на празен ход (I_0)	%	1.8
Загуби на късо съединение (P_k)	W	5000

Разглежданият модел на разпределителен трансформатор е съставен от 129 FEMM файла, всеки от които разглежда трансформатора в точно определен момент от време и в зависимост от генерираните данни от нас може да симулира различни режими на работа на трансформатора – под товар, на празен ход и късо съединение. Параметрите на модела на разпределителния трансформатор са

представени в табл.1, а цялостната структура на модела във FEMM на фиг.1.
Програмната среда FEMM притежава свой комплект от команди, които могат да бъдат използвани за създаване на скриптове с разширение ".lua" както и да поддържа повечето логически операции, с някои ограничения. В настоящата статия са представени два скрипта, като първият ще бъде наричан „InputScript" и е използван за генериране на модели във FEMM с желаните от нас входни данни, а вторият ще бъде наричан „OutputScript", който генерира изчислените изходени файлове.
Различните модификации на моделите за изследване се базират на предварително проектиран трансформатор с данни показани в табл.1 [5]. Разглежданият трансформатор е трифазен ядрен. Намотките ниско напрежение са свързани в схема зиг-заг. Всяка фаза от намотките ниско напрежение се състои от две бобини, като всяка от бобините може да бъде с различен брой навивки, като индуктираното общо фазно е.д.н. грабва да е константно. Индуктираните е.д.н. в намотките ниско напрежение са дефазирани по между си на предварително определен ъгъл. Изследването се прави като този ъгъл се изменя в границите между 0 и 60 електрически градуса. Намотката високо напрежение е свързана в схема триъгълник, за да се намалят допълнително третият и кратните на три хармоници. Схемата на трансформатора може да бъде видяна на фиг.1, а характеристиките във табл.1.
Зададените различни входни стойности се променят по амплитуда и хармоничен състав, който отговаря на дадени норми от стандарт IEEE 519-92 [4]. При разглежданите модели основно се наблюдава различният изходен хармоничен състав на потокосцепленията при различни зададени входни токови плътности.
При въвеждането на токовите плътности в блоковете на модела се подреждат по предварително определена последователност, показана на табл.2. Извеждането на данни след решаването на моделите става по същата последователност дадена в табл.2.

Таблица 2

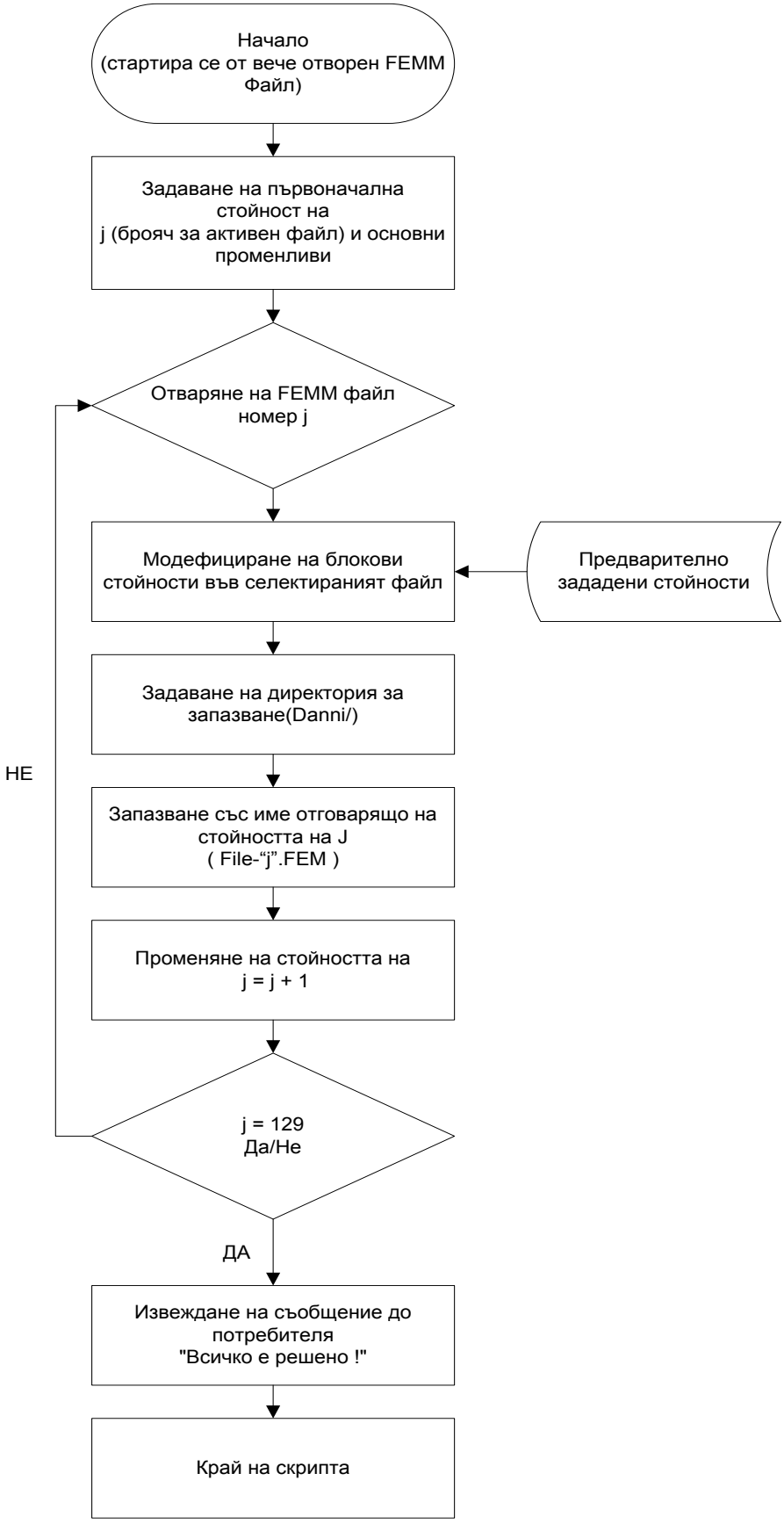
Подредба на токовите плътности при въвеждане и извеждане от модела.

A+NN	A-NN	C-NN	C+NN	A2+NN	A2-NN	C2-NN	C2+NN	B+NN	B-NN
A-NN	A+NN	B2+NN	B2-NN	A2-NN	A2+NN	C+NN	C-NN	B-NN	B+NN
C2+NN	C2-NN	B2-NN	B2+NN	A+VN	A+VN	B+VN	B+VN	C+VN	C+VN

2. СЪЩНОСТ

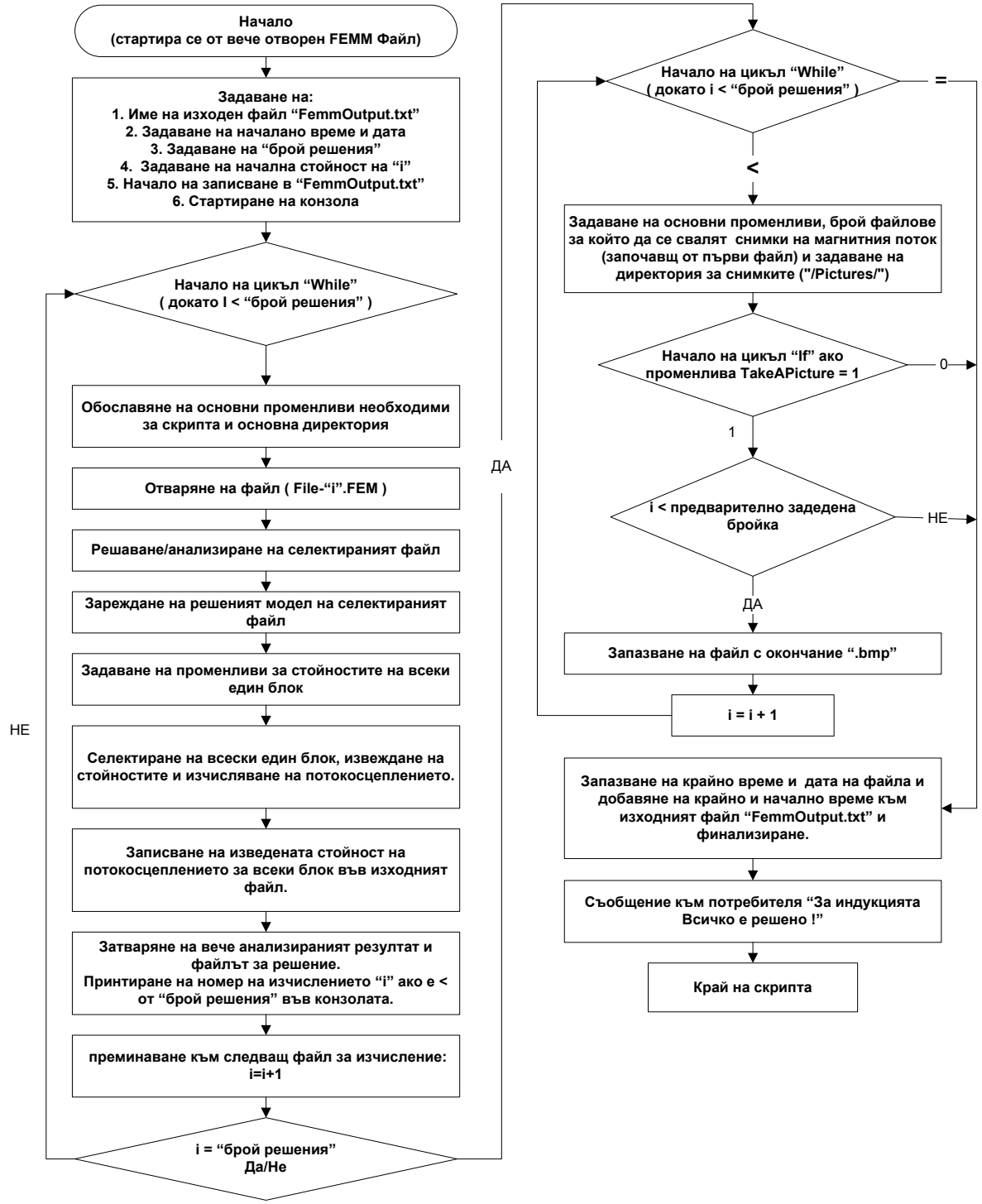
Процедурата за изследване на влиянието на ъгъла на дефазиране на е.д.н. между двете намотки ниско напрежение започва с определяне на входните моментни стойности на токовите във всички намотки.
Първият скрипт „InputScript", за да работи е необходимо да има минимум един FEMM файл, който да бъде използван за стартиране на скрипта и за генериране на другите файлове от него. Също така е необходимо да има създадена папка „Danni" в същата папка в която е FEMM файлът и Lua скриптът, който е стартиран. При стартиране скриптът започва да въвежда в отворен файл зададените

стойности в посочените от скрипта материални блокове и запазва вече готовите файлове. Пълната блокова схема на скрипта за въвеждане и генериране е даден на фиг.2.



Фиг.2. Блок схема на въвеждащият и генериращ файлове скрипт („InputScript“).

Вторият скрипт „OutputScript“ може да бъде стартиран само ако първият скрипт „InputScript“ вече е бил стартиран поне веднъж и е генерирал FEMM файлове. След това вторият скрипт започва да решава всеки модел в същата папка („Danni“), при което с всяко едно решение прави снимка на магнитните силови линии в решения модел.



Фиг.3. Блок схема на изчисляващият и извеждащ скрипт („OutputScript“).

Снимките на магнитните силови линии се запазват в предварително създадена папка „Pictures“ в същата директория, в която се намира и папка „Danni“. След решаването на всеки един от файловете потокосцепленията на всяка една на-

мотка се снемат и се записват в текстов файл с разширение „.txt“ наречен „FemmOutput.txt“, като стойностите се разделят една от друга със запетая. Пълната блокова схема на методиката на скрипта „OutputScript“ за изчисление и извеждане на вече създадени модели от първия скрипт „InputScript“ е даден на фиг.3.

Двата скриптови файла въвеждат, генерират, изчисляват и компилират данните от 129 FEMM файла, които обхващат интервала от време 0,02 секунди (времето необходимо за завършване на един период на синусоидална вълна при 50 Hz). Първият FEMM файл отчита амплитудата на синусоидата в момента от време 0 секунди (началната точка на синусоидата), всеки следващ отчита амплитудна стойност в следващ момент от време. Всяка следваща стойност на амплитудата на синусоидата е отместена във времето през 0,00015625 секунди. Първият файл (File-1.fem) и последният файл (File-129.fem) са началната и крайната амплитудна стойност на синусоидата и са с еднаква амплитудна стойност независимо от фазно отместване или различно наличие на хармоничен състав. За бързото и правилното изчисление на файловете за моделите сме ограничени от операционната среда, хардуер и/или от желаната точност. Желаният изчислителен интервал може и да надхвърля един период (0,02 секунди), но е необходима модификация на скриптовете и преизчисления на входните величини. Всеки модел във FEMM съдържа в себе си 30 блока описващи различните намотки и стойностите в тях. За решаването на един период с определен хармоничен състав е необходимо да се променят стойностите във всеки блок на всеки от 129-те файла, което означава, че трябва да се променят 129*30 = 3870 блокови стойности. Ако е необходимо ръчно да бъдат въведени тези стойности от човек (оператор), би отнело относително много време. При вече ръчно въведени стойности операторът трябва да стартира всеки един файл, за да се изчисли, след това да изведе необходимите ни изходни величини от същите тези 3870 блокове. При създаването на 129 файла ръчно е необходимо за един оператор да отвори FEMM > „Properties“ > „Material Library“ > „Model materials“ > блок за редактиране (материала) > копиране или въвеждане ръчно на стойности за токова плътност в полето ”Source current density”. Този алгоритъм трябва да се повтори за още 29 блока за създаването на един готов файл. Същият този процес е необходимо да се повтори още 128 пъти за целия период на синусоидата. След като са генерирани всичките 129 файла, те се решават и на всеки един от файловете е необходимо да се изведат стойностите за всеки един от 30-те блока.

При извеждането на стойности е необходимо да се отвори всеки един от 129-те изчислени FEMM файла и да се селектират във всеки 30-те материални блока, извеждайки интересуващите ни величини (в нашия случай потокосцепленията).

При всяка лека промяна в размерите на трансформатора и съответните входни данни, е необходимо да се повтаря целият процес по въвеждане, създаване, решаване и извеждане на стойностите за анализиране. Ако за всяка една модификация на един FEMM файл на един оператор му отнема една минута, за да бъдат зададени всички блокови стойности, една минута за изчисление на файла (което зависи от изчислителната ни машина и сложността на модела) и една минута за

да бъдат изведени и записани всички блокови стойности, то за изчислението на един пълен модел ще отнеме (1+1+1)*129=387 минути. Ако времето от 387 минути бъде намалено с 50%, то пак това време от 193 минути и 30 секунди означава, че за изчислението ще е необходимо един оператор да бъде физически и психически натоварен 3 часа и 13 минути.

Отчитайки факта колко е ценно работното време в днешно време не само като часова ставка, но и с ограничеността си от рамките на работното време за работен ден. Ето къде влиза в употреба оптимизацията на изчислителния процес посредством скриптове. Двата скрипта разглеждани в статията изискват по-малко от 2 минути за ръчно стартиране и по-малко от 30 минути за въвеждане, създаване, изчисление и снемане на получените резултати. Създаването и разработването на един правилно работещ Lua скрипт за работа във FEMM може да отнеме, както в разглеждания случай на двата скрипта, два-три месеца. При реален опит за въвеждане на един пълен модел на един оператор е необходимо минимум 2 часа и 50 минути за въвеждане, изчисление и генериране на изходните файлове с готови за анализиране данни.

При употребата на двата скрипта цялостното време се свежда до приблизително 30 минути.

При тази разлика във времето необходимо за ръчно въвеждане и времето необходимо за работа със скриптовете се вижда, че употребеното време при наличието на автоматизация е с до десет пъти по-кратко. По-кратко време означава, че за едно и също време може да се направят до десет пъти повече анализи на модели.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С помощта на програмируеми цикли в програмната среда FEMM и употребата на Lua скриптове се улеснява възможността за бързо променяне на входните величини в моделите, с което се дава възможност за изследвания с по-голям брой входни величини и по-голяма точност.

2. При употребата на скриптовете може да се намалят работните часове, които са необходими за анализиране ефектите върху трансформатор, захранен с токове съдържащи всички възможни хармонични комбинации описани в стандарта IEEE 519-92.

ЛИТЕРАТУРА

[1] “Harmonics, Transformers and K-Factors”, CDA Publication 144, September 2000

[2] Hemchandra Madhusudan Shertukde, “Distributed Photovoltaic Grid Transformers”

[3] Стандарт БДС EN 50160

[4] Стандарт IEEE 519-92

[5] „Разпределителени трансформатори за фотоволтаични електроцентрали“, Годишник на Технически Университет - София, т. 66, книга 1, 2016, стр. 137, ISSN 1311-0829

Автор: Виктор Захариев Захариев, инж. маг., катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *sun_goko@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Адриан Иванов

РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА ФОТОВОЛТАИЧНИ ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ С НАМОТКА НИСКО НАПРЕЖЕНИЕ ДВОЕН ЗИГ-ЗАГ

Радослав Спасов, Пламен Ризов, Виктор Захариев, Цветомир Стоянов

Резюме: *В настоящата статия се разглежда метод за намаляване на пети, седми и единадесети хармоници на тока разпространяващи се в електроснабдителната мрежа, генерирани от инверторитете на фотоволтаичните централи. Предлага се повишаващия трансформатор, който работи съвместно с инверторите, да е с две намотки ниско напрежение, свързани в зиг-заг и намотка високо напрежение, свързана в триъгълник. Намотките ниско напрежение са съставени от бобини с различен брой навивки. Изчислен е оптималният ъгъл на дефазиране на електродвижещите напрежения индуктирани в двете намотки свързани в зиг-заг, при който има максимално намаляване на висшите хармоници..*
Ключови думи*: хармоници, разпределителен трансформатор.*

DISTRIBUTIVE TRANSFORMER FOR USE IN PHOTOVOLTAIC ELECTRICAL POWER PLANTS WITH LOW VOLTAGE WINDINGS PLACED IN ZIG-ZAG PATTERN

Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Victor Zahariev, Tsvetomir Stoyanov

Abstract: *This article is a basic comparison and analysis of the difference in the harmonic output and the total harmonic distortion (THD) when the design and phase arrangement of the low voltage windings of a transformer as the transformer is supplied with different compilations of harmonic inputs taken from the standard. Calculating the optimal angle of phase shift between the windings present in the zig-zag.*
Keywords*: harmonics, total harmonics distortion, THD, transformer, distributive transformer.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Разгледан е разпределителен трансформатор за работа в фотоволтаични електроцентрали. Специфичните изисквания към тези трансформатори са свързани със съвместната им работа с инвертори, които в зависимост от техните качества генерират напрежение с различен хармоничен състав. Наличието на хармоници в захранващото напрежение (респективно в токовете) води до увеличаване на загубите в трансформатора, а от друга страна хармониците в изходното напрежение на трансформатора влошават качествените характеристики на подаваната електроенергия към разпределителната мрежа. Трансформаторът посредством намотките си високо напрежение е свързан към енергийната разпределителната мрежа, а първичната намотка е захранена с напрежение генерирано от инвер-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

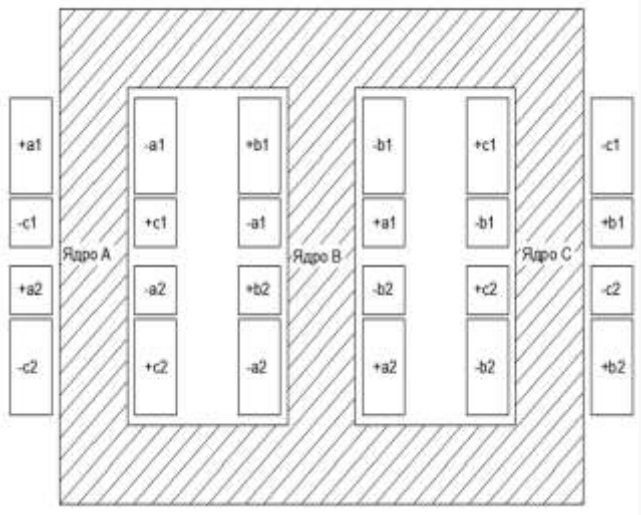
торна група, която от своя страна е захранена от преобразователните панели на фотоволтаична електроцентрала. Цялостната принципна схема на свързването на разпределителния трансформатор е показана на фиг.1.

Фиг.1. Принципна схема на свързването на разпределителния трансформатор

2. ТРАНСФОРМАТОР С ДВЕ НАМОТКИ СВЪРЗАНИ В ЗИГ-ЗАГ

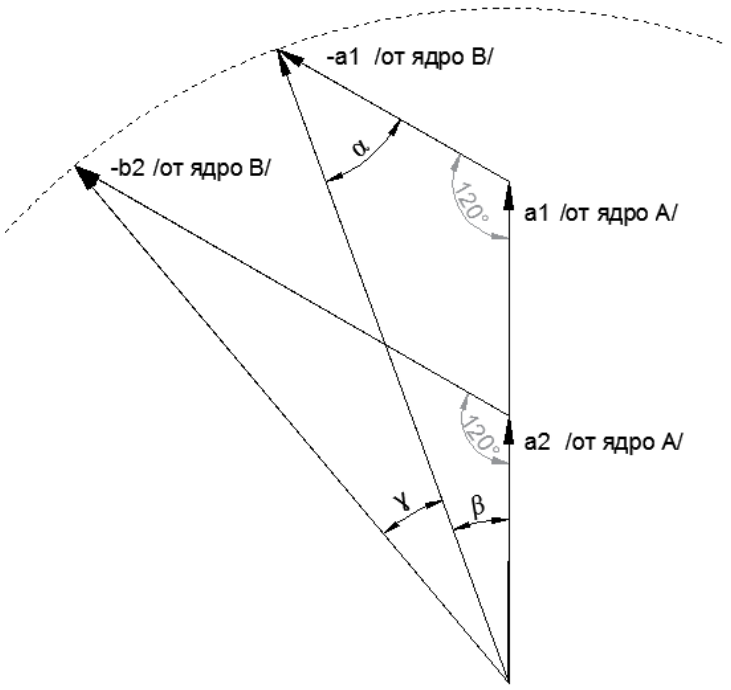
Предмет на изследване е конструкцията и схемата на свързване на намотките на разпределителен трансформатор, която би подобрила качеството на изходното напрежение.

В настоящата статия е представен трансформатор с две независими намотки ниско напрежение, свързани в схема зиг-заг. Главната особеност на изследваните намотки е, че броя на навивките на бобините, които формират една фаза не са еднакви. По този начин се осигурява дефазиране на индуктираните е.д.н. в двете намотки на произволен ъгъл (при захранване на първичната намотка от мрежата) или създаване на общо м.в.н. от двете намотки ниско напрежение, като тока в тях е на произволен ъгъл (при захранване от два инвертора). Принципната схема на свързване на намотките ниско напрежение е показана на фиг.2.



Фиг.2. Разпределение на фазите в намотките ниско напрежение за всяко ядро.

За определяне на броя на навивки за бобините ниско напрежение се изхожда от векторната диаграма показана на фиг.3.



Фиг.3. Векторна диаграма на индуктираните напрежения във фаза L1-1 и дефазирана фаза L1-2.

От векторната диаграма могат да се изведат следните зависимости:

$$\alpha + \beta = 60 \tag{1}$$

$$\gamma + 2\beta = 60 \tag{2}$$

където: γ е ъгъла на дефазиране; α и β са ъгли.

Следователно за зависимостите на ъглите в двата триъгълника от зададеният ъгъл на дефазиране са :

$$\alpha = 60 - \beta \tag{3}$$

$$\beta = \frac{(60 - \gamma)}{2} \tag{4}$$

За изследване на хармоничният състав на резултатното м.в.н. създадени от двете независими намотки ниско напрежение се използва следният алгоритъм:

1. Изчисляват се моментните стойности на токовете в двете намотки ниско напрежение в относителни единици, като големините на отделните амплитуди на хармониците са взети от таб.1. Табл.1 е от стандарт IEEE 519-1992 (“Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”). В табл.1 от стандарта са зададени определени стойности на THD при различните к-фактори. Тоталното хармонично изкривяване за тока се изчислява по зависимостта (5):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \tag{5}$$

където: I_1 е основният хармоник или първи; THD е тоталното хармонично изкривяване; n е номер на хармоника.

2. Сумират се м.в.н. от всички бобини обхващащи ядро А. Прави се Фурие-анализ на резултантното м.в.н. и се съпоставя хармоничния състав спрямо този, ако намотката ниско напрежение е например двуслойна цилиндрична.

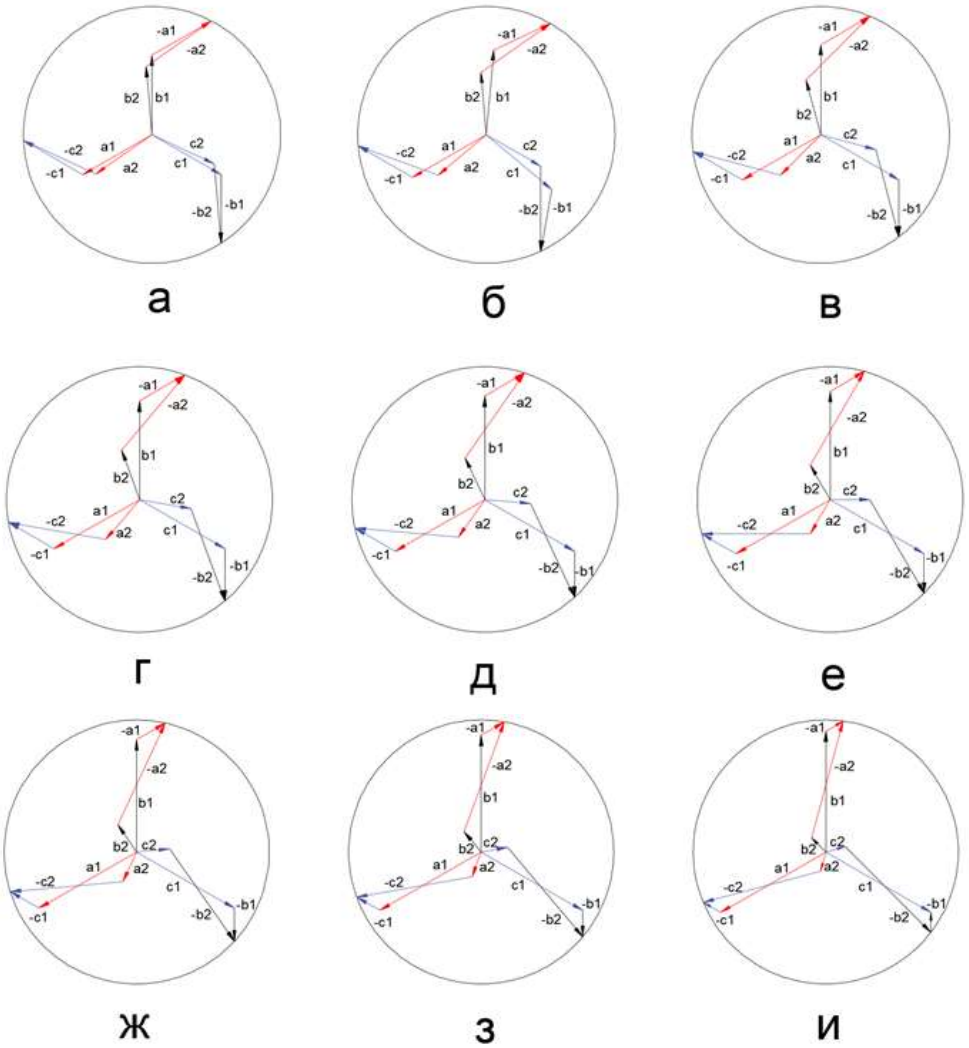
Таблица 1.

Таблица на стойностите на хармоничните изкривявания и амплитуди спрямо основния хармоник, К-фактор и THD

THD	0.136	0.194	0.241	0.281	0.35	0.413	0.443	0.472	0.501	0.529	0.585	0.641	0.727
K-factor UL	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	15	17	20
Over Rating	1.02	1.04	1.06	1.08	1.12	1.15	1.17	1.19	1.2	1.22	1.25	1.28	1.33
I1	0.991	0.982	0.972	0.963	0.944	0.924	0.914	0.904	0.894	0.884	0.863	0.842	0.809
I3	0.097	0.137	0.168	0.0252	0.238	0.275	0.291	0.307	0.322	0.336	0.363	0.388	0.423
I5	0.058	0.082	0.101	0.117	0.143	0.165	0.175	0.184	0.193	0.202	0.218	0.233	0.254
I7	0.042	0.059	0.072	0.083	0.102	0.118	0.125	0.132	0.138	0.114	0.156	0.166	0.181
I9	0.032	0.046	0.056	0.065	0.079	0.092	0.097	0.102	0.107	0.112	0.121	0.129	0.141
I11	0.026	0.037	0.046	0.053	0.065	0.075	0.079	0.084	0.088	0.092	0.099	0.106	0.115
I13	0.022	0.032	0.039	0.045	0.055	0.063	0.067	0.071	0.074	0.078	0.084	0.09	0.098
I15	0.019	0.027	0.034	0.039	0.048	0.055	0.058	0.061	0.064	0.067	0.073	0.078	0.085
I17	0.017	0.024	0.03	0.034	0.042	0.048	0.051	0.054	0.057	0.059	0.064	0.069	0.075
I19	0.015	0.022	0.027	0.031	0.038	0.043	0.046	0.048	0.051	0.053	0.057	0.061	0.067
I21	0.014	0.02	0.024	0.028	0.034	0.039	0.042	0.044	0.046	0.048	0.052	0.055	0.06
I23	0.013	0.018	0.022	0.025	0.031	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.047	0.051	0.055
I25	0.012	0.016	0.02	0.023	0.029	0.33	0.035	0.037	0.039	0.04	0.044	0.047	0.051

3. Процедурата се повтаря за различни к-фактори / от 2 до 7/ и при различни ъгли на дефазиране на токовете в двете намотки ниско напрежение.

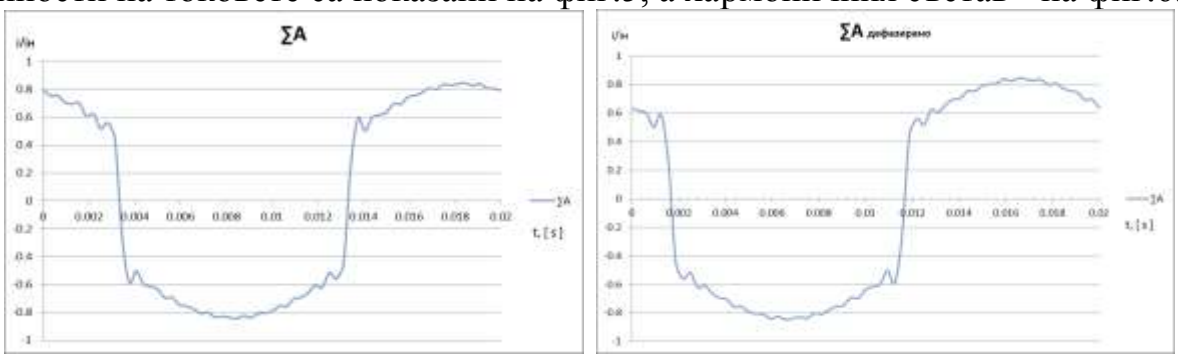
На фиг.4 са показани векторните диаграми на м.в.н създадени от намотките ниско напрежение при различен ъгъл на дефазиране на токовете.



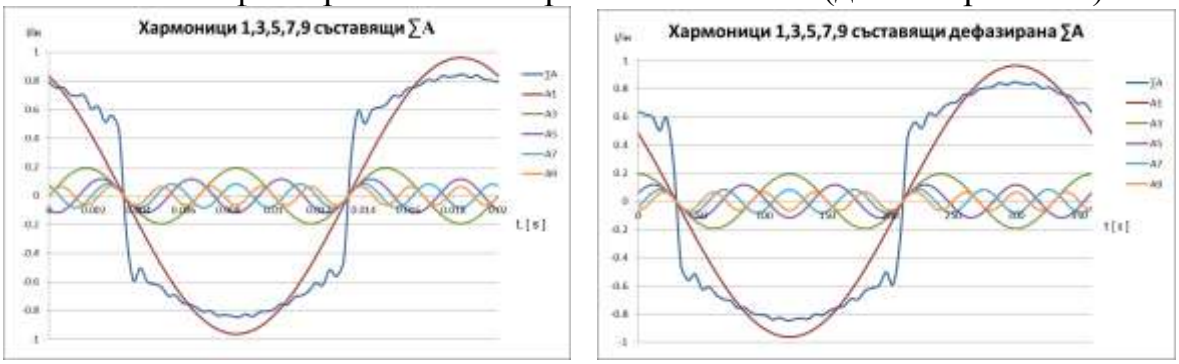
Фиг.4. Векторни диаграми при дефазиране на:
а = 5 [deg], б = 10 [deg], в = 15 [deg], г = 20 [deg], д = 25 [deg], е = 30 [deg], ж = 35 [deg], з = 40 [deg], и = 45 [deg].

3. РЕЗУЛТАТИ ОТ НАПРАВЕНИТЕ ИЗЧИСЛЕНИЯ И СИМУЛАЦИИ

Направени са симулации на работата на разпределителен трансформатор при захранване със симетрична система токове с к-фактор от 2 до 7. Моментните стойности на токовете са показани на фиг.5, а хармоничния състав - на фиг.6.

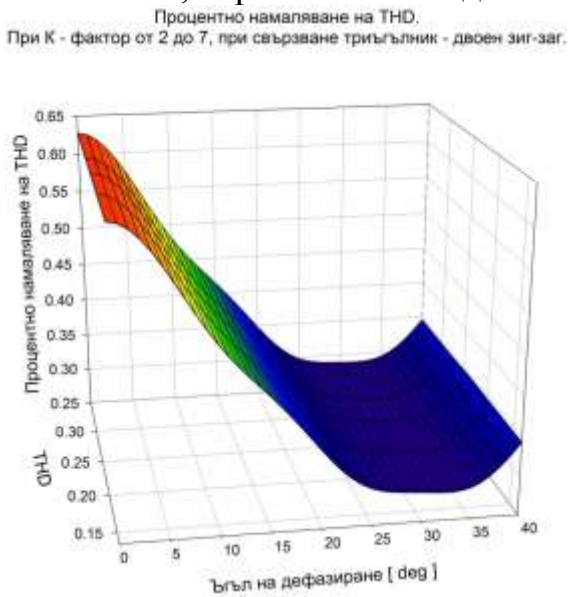


Фиг.5. Тока в относителни единици за фаза А и дефазираната фаза А - съставени за к-фактор 5 с пълен хармоничен състав (до 25 хармоник)

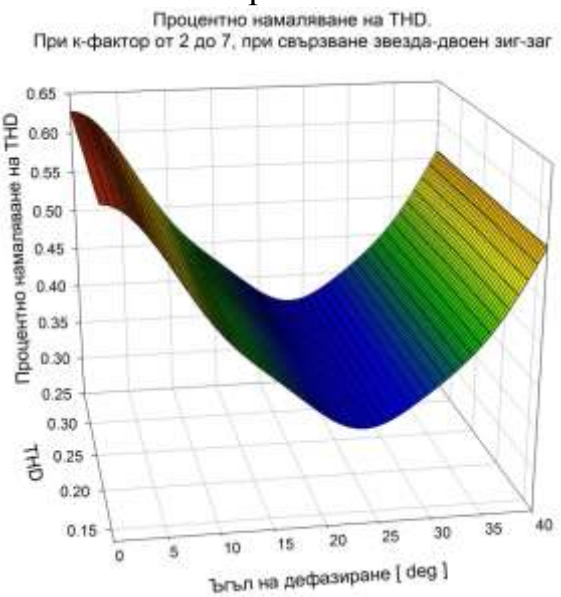


Фиг.6. Хармоничен състав на тока за фаза А и дефазирана фаза А съставена за к-фактор 5.

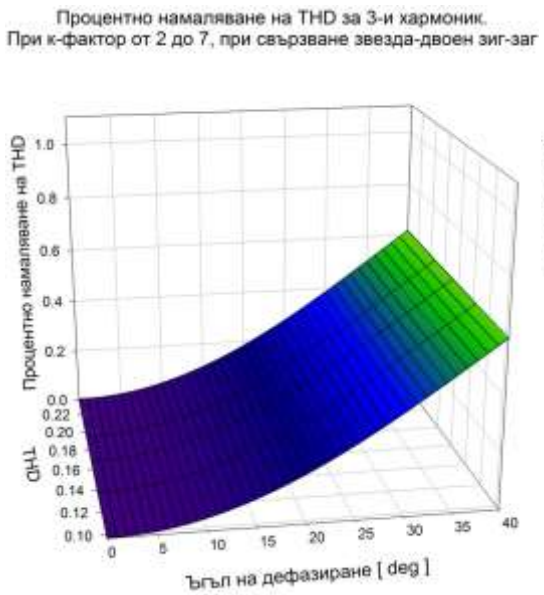
Всички резултати от изчисленията са представени на следващите фигури. Те показват процентното намаляване на THD на м.в.н. при трансформатор с две намотки зиг-заг, спрямо такъв с една намотка ниско напрежение.



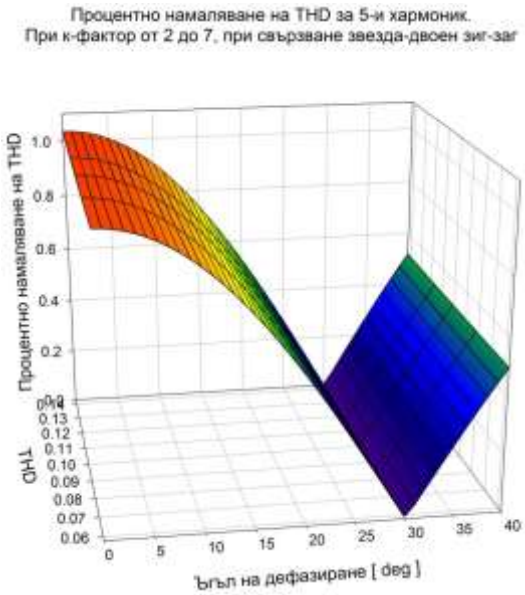
Фиг.7. Процентно намаляване на THD, при К- фактор от 2 до 7 при свързване триъгълник - двоен зиг-заг (без кратните на 3 хармоници).



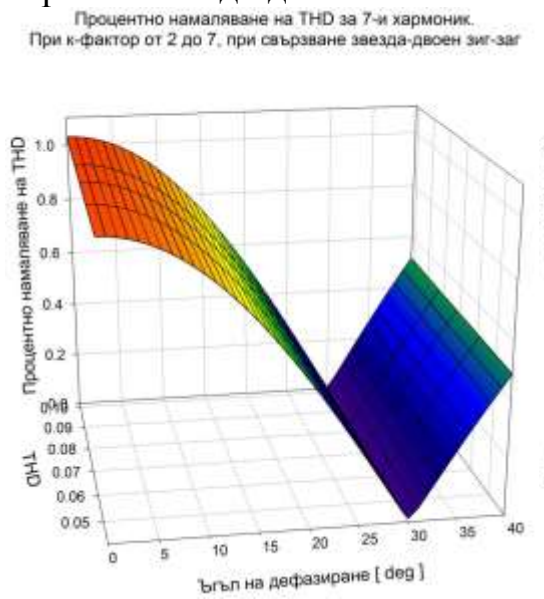
Фиг.8. Процентно намаляване на THD, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг (със кратните на 3 хармоници).



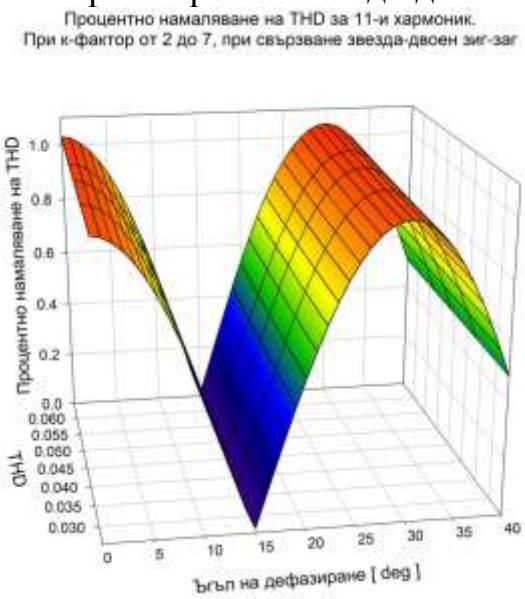
Фиг.9. Процентно намаляване на THD за 3-и хармоник, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг.



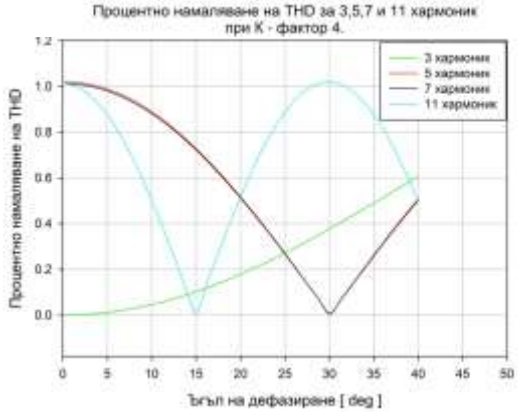
Фиг.10. Процентно намаляване на THD за 5-и хармоник, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг.



Фиг.11. Процентно намаляване на THD за 7-и хармоник, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг.



Фиг.12. Процентно намаляване на THD за 11-и хармоник, при К- фактор от 2 до 7 при свързване звезда-двоен зиг-заг.



Фиг.13. Процентно намаляване на THD за 3, 5, 7 и 11-и хармоник, при К- фактор 4 при свързване звезда-двоен зиг-заг.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. От резултатите на направените изследвания може да се направи извода, че намотката високо напрежение трябва да е свързана в схема триъгълник, за да се ограничат третите и кратните на три хармоници, тъй като подходящият ъгъл на дефазиране на токовете в двете намотки зиг-заг за максимално намаляване на 5 и 7 хармоници не ограничава третите.
2. При анализа на резултатите от фиг. 7 може да се препоръча дефазиране на токовете между двете намотки ниско напрежение от 30 градуса.

ЛИТЕРАТУРА

[1] “Harmonics, Transformers and K-Factors”, CDA Publication 144, September 2000

[2] Hemchandra Madhusudan Shertukde, “Distributed Photovoltaic Grid Transformers”

[3] Стандарт БДС EN 50160

[4] Стандарт IEEE 519-92

[5] Разпределителени трансформатори за фотоволтаични електроцентрали“, Годишник на Технически Университет - София, т. 66, книга 1, 2016, стр. 137, ISSN 1311-0829

Автори: Радослав Лазаров Спасов, доц. д-р, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *lrs@tu-sofia.bg*; **Пламен Миланов Ризов**, доц. д-р, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*; **Виктор Захариев Захариев**, инж. маг., катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *sun_goko@gmail.com*; **Цветомир Методиев Стоянов**, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *cmetodiev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Адриан Иванов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ТОВАРНИТЕ ПРЕВОЗИ С ЛОКОМОТИВИ SIEMENS TAURUS В БЪЛГАРИЯ

Георги Димитров, Иван Петров

Резюме: *В настоящата разработка са представени резултати от проведено изследване върху енергийното потребление на товарни влакове, обслужвани с локомотиви ES64U2 Taurus, произведени от фирма Siemens, в реални експлоатационни условия. В изследването са обхванати товарни влаковете, съставени от шестосни съчленени вагони за интермодални превози. Получените по експериментален път данни за са аналитично обработени и са представени в табличен вид. Въз основа на получените резултати е проведен анализ на основните енергийни показатели на изследваните товарни влакове, обслужени с локомотиви ES64U2 Taurus серия ÖBB 1116, като са формулирани конкретни изводи и препоръки.*
Ключови думи: *Електрически локомотиви, локомотиви ES64U2 Taurus, електроенергийно потребление, енергийна ефективност на товарни влакове*

RESEARCH ON THE ENERGY EFFICIENCY OF THE FREIGHT TRAINS WITH SIEMENS TAURUS LOCOMOTIVES IN BULGARIA

Georgi Dimitrov, Ivan Petrov

Abstract: *In this study are presented the results of research carried out on the energy consumption of the freight trains, serviced with locomotives ES64U2 Taurus, produced by Siemens AG, in real exploitation conditions. The research encompasses freight trains which composed of six-axles articulated wagons for intermodal transport. The experimentally received data are analytically processed and introduced in a table form. On the basis of the reached results is carried out an analysis of the main energy indicators of the researched freight trains, serviced with locomotives ES64U2 series ÖBB 1116, and particular conclusions and recommendations are made.*
Keywords: *Electric locomotives, Locomotives ES64U2 Taurus, Electric power consumption, Energy efficiency of freight trains*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

След либерализирането през 2004 г. на железопътните превози в България, към настоящия момент има лицензирани от ИА „Железопътна администрация” 17 железопътни превозвача, 16 от които с лиценз за превоз на товари. Реално товарни железопътни превози със значими обеми осъществяват само 6 от железо-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

пътните превозвачи, един от които е получилият лиценз през 2015 г. „Рейл Карго Кериър – България” ЕООД.
„Рейл Карго Кериър – България“ ЕООД е дружество, учредено през месец януари 2013 г., със 100% частна собственост. Едноличен собственик на капитала е „Rail Cargo Carrier Kft.”, Унгария. „Rail Cargo Carrier “ представлява производствена единица в рамките на Rail Cargo Group, като дружеството-майка за групата е „Rail Cargo Austria“ AG, която е член на австрийските железници ÖBB. В настоящия момент „Рейл Карго Кериър – България” ЕООД извършва транзитни товарни превози през България от Европа към Турция и Гърция, реализирани от над 20-22 чифта влакове на месец.
В настоящата разработка са представени резултати от проведено изследване в реални експлоатационни условия върху енергийното потребление на международни директни товарни влакове, возени от „Рейл Карго Кериър-България” ЕООД с локомотиви ES64U2 Taurus. Изследваните товарни влакове са съставени от специализирани шестосни съчленени вагони за превоз на интермодални транспортни единици тип **Sggmrss**. Въз основа на получените резултати е проведен анализ на основните енергийни показатели на изследваните товарни влакове, обслужени с локомотиви ES64U2 Taurus-серия ÖBB 1116 Taurus, като са формулирани конкретни изводи и препоръки.

2. ТЕХНИЧЕСКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЛОКОМОТИВИ SIEMENS ES64U2 TAURUS

Локомотивите ES64U2 Taurus са представители на фамилията EuroSprinter, произвеждани от Siemens Krauss-Maffei Lokomotiven GmbH, Мюнхен. Типът ES64U2 означава: ES - локомотив е от фамилията EuroSprinter, 64 - продължителна мощност 6400 kW и U2 - универсален за две системи на електрозахранване (15 kV, 16⅔ Hz и 25 kV, 50 Hz) [4, 5, 6]. Локомотивите са с модулно устройство, като всички основни компоненти и подсистеми са обединени в модули, които след произвеждането им се подлагат на детайлни лабораторни тестове за постигане на по-висока надеждност.

Тяговото електрозадвижване на локомотива е реализирано с два силови преобразувателя, конструирани като четириквадрантни изправители и инвертори с широчинно-импулсна модулация. Преобразувателите са изградени на базата на бързодействащи GTO тиристори, към всеки от които са свързани по два асинхронни тягови двигателя с единична мощност 1640 kW (фиг.1). Тъй като локомотивът е конструиран за движение с високи скорости – до 230 km/h (фиг.2), формата на челната секция осигурява ефективно аеродинамично разпределение на възникващото при движение въздушно налягане, респективно по-ниско съпротивление от въздуха. В табл.1 са показани основните технически характеристики на локомотивите ES64U2.

Конструирани с възможност да работят към две тягови електрозахранващи системи – 15 kV, 16⅔ Hz и 25 kV, 50 Hz, локомотивите ES64U2 изпълняват трансгранични превози през всички държави между Австрия и Турция.

Таблица 1

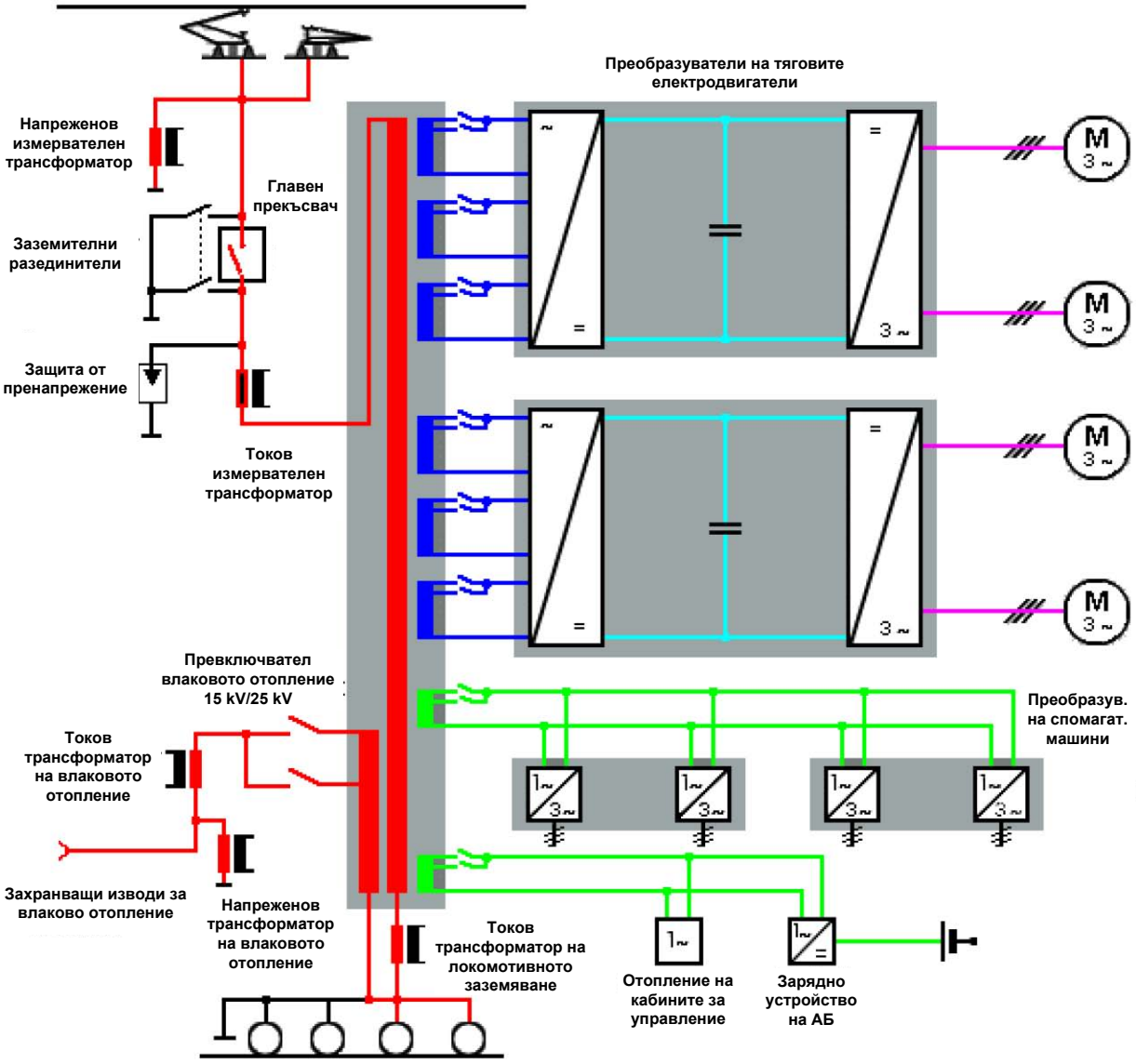
Технически характеристики на локомотиви Siemens ES64U2 Taurus

Модел локомотиви:	ES64U2 Taurus
Серия и брой за австрийските железници:	ÖBB 1116 001–282 (общо 282 локомотива)
Производител:	Siemens Krauss-Maffei Lokomotiven GmbH, München, Germany ÖBB TS Werk, Linz, Austria
Години на производство:	2000–2006
Колоосна формула:	Bo'Bo'
Минимални радиуси на вписване в криви:	100 m (при 10 km/h) 120 m (при 30 km/h)
Собствена маса:	86 t (с ETCS 88 t)
Маса на една колоос:	21,25 t (с ETCS 22 t)
Максимална скорост:	230 km/h
Захранващи контактни системи:	15 kV, 16,67 Hz 25 kV, 50 Hz
Часова мощност:	6,400 kW (15 kV / 25 kV ~) Краткотрайна мощност за 5 min: 7,0 MW (само за скорости 85–200 km/h)
Трайна мощност по окръжността на търкаляне на колелата:	6,400 kW (при 15 kV и 25 kV ~)
Максимална теглителна сила:	300 kN
Трайна теглителна сила:	250 kN (до 92 km/h)
Спирачна сила при електрическо спиране:	150/240 kN
Влакова спирачка, пневматична:	® KE-GPR-E mz (D) ep NBÜ-DB Luftpresser: Knorr SC-20-5-51
Диаметър на колелата нови/износени:	1150/1070 mm
Брой тягови двигатели:	4 броя трифазни асинхронни, четириполюсни
Тягови двигатели, модел и мощност:	1 TB 2824-0GC02, 1640 kW (1750 kW за 5 min)
Мощност и захранващи напрежения на влаково отопление:	900 kVA; 1 kV 16,67 Hz, 1,5 kV 50 Hz и 1 kV 50 Hz
Система за управление:	SIBAS 32

3. ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА И МЕТОД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА РАЗХОДА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ЛОКОМОТИВИ ES64U2 TAURUS – СЕРИЯ ÖBB 1116

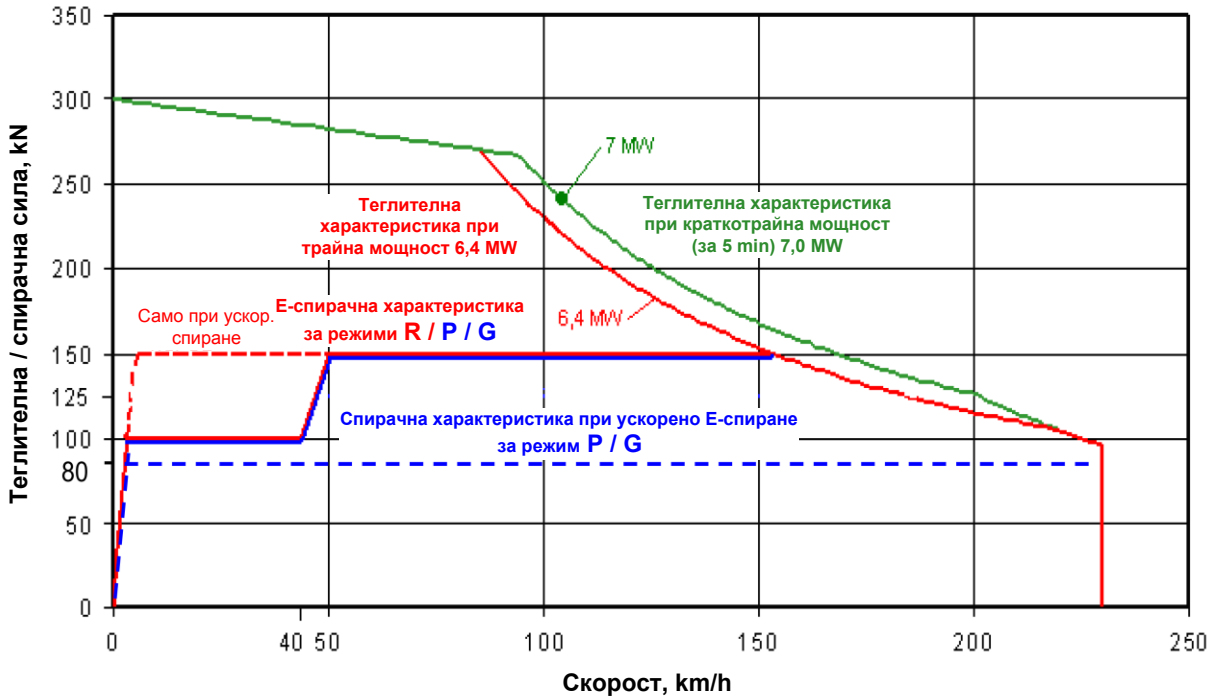
Локомотивите ES64U2 са оборудвани от производителя със средства за измерване на електрическата енергия. Схемата за измерване на електрическата енергия е индиректна, с използване на измервателни трансформатори за напрежение и ток, към които е свързан електромер за търговско измерване. Напреженовият и токовият трансформатори са свързани във веригата на първичната намотка на локомотивния трансформатор – фиг.1 и фиг.3. Напреженовият измервателен трансформатор е с преводно отношение 25000/166 V (за система 15 kV, 16⅔ Hz

– 15000/100 V). Токовият трансформатор е с преводно отношение 800/1 А. Електромерът е ЕМН на фирма ЕМН metering GmbH & Co. KG, Германия, който изцяло е базиран на електромер LEM EM4T, с клас на точност 0,5 (съгласно EN 62052-11).



Фиг.1. Блокова схема на главните електрически вериги на локомотив ES64U2 Taurus – серия ÖBB 1116

Електромерът модел EM4T е сертифициран и отговаря на всички изискванията на стандартите EN 50463-X (*Железопътна техника. Измерване на енергията на борда на железопътните превозни средства. Части 1÷5*) и EN 50155 (*Железопътна техника. Електронни устройства, използвани в подвижния железопътен състав*) за измерване на електрическа енергия на борда на електрически транспортни средства за постоянен и еднофазен променлив ток, като по този начин удовлетворява изискванията на Решение 2011/291/ЕО относно техническите спецификации за оперативна съвместимост (ТСОС) и в частност ТСОС „Локомотиви и пътнически подвижен състав”.



Фиг.2. Теглителна и спирачна характеристики на локомотиви ES64U2 Taurus – серия ÖBB 1116

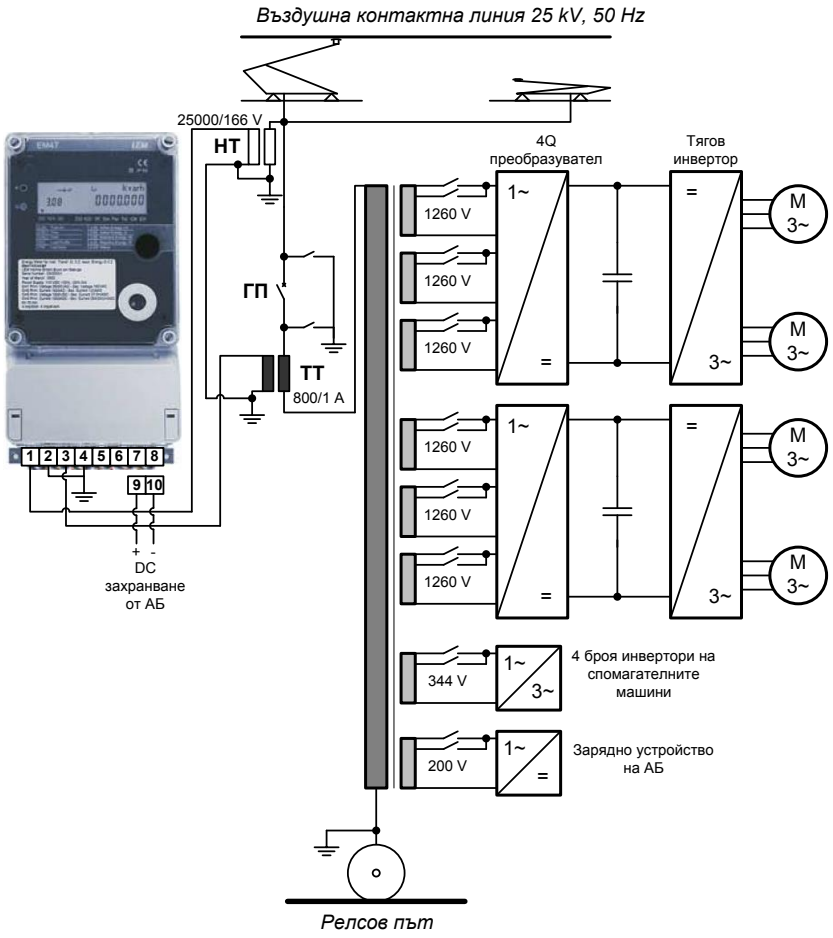
Данните от измерванията за консумираната от и върнатата в тяговата мрежа електрическа енергия се съхраняват в отделни регистри на вътрешната памет на електромера, като чрез допълнителен комуникационен хардуер е осигурена възможност за дистанционно четене на съхранената информация.
Получените чрез измервания данни за общия експлоатационен разход на активна енергия $+E_A$, kWh, респективно общата върната в тяговата мрежа активна енергия $-E_A$, kWh, не позволяват непосредствено да бъде извършен анализ за енергийната ефективност на превозите. Това налага получените данни да бъдат вторично обработени за целите на изследването.

Основните показатели, използвани при анализа на данните от изследването са следните:

Специфичен експлоатационен разход на енергия за ускоряване и тяга – e_T, Wh/t.km. Той се дефинира като отношение на общата консумирана от тяговата мрежа активна електрическа енергия $+E_A$, kWh и брутната превозна работа на обслужваните товарни влакове. За определянето на този показател се използва формулата:

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

където: $(+E_A)$ е измереният общ разход на активна електроенергия за определен период от време (една повеска), kWh; m_{br} – брутна маса на товарния влак, t; s – пробег на влака през периода (една повеска), за който е измерен разхода на електроенергия, km.



Фиг.3. Схема на свързване на измервателните средства в локомотиви ES64U2 Taurus – серия ÖBB 1116

Показателят, определен по (1), дава общата енергоемкост на извършената транспортна работа. В практиката този показател е основен и се използва за оценка на енергоемкостта на товарните превози.

Специфична енергия, върната в тяговата мрежа, при рекуперативно спиране – e_R, Wh/t.km. Този показател се изчислява по зависимостта:

$$e_R = \frac{1000.(-E_A)}{m_{br}.s} \tag{2}$$

Където $(-E_A)$ е стойността на върнатата в тяговата мрежа активна електроенергия за определен период от време (една повеска), kWh.

Специфичната нетна енергия за извършената транспортна работа по превозването на 1 тон товар на разстояние 1 km – e_N, Wh/t.km. Той се дефинира като отношение на разликата между общата консумирана от тяговата мрежа електрическа енергия и върнатата в нея енергия $[(+E_A)-(-E_A)]$, kWh и брутната превозна работа на обслужваните товарни влакове. Показателят се изчислява с използване на следната формула:

$$e_N = \frac{1000.[(+E_A)-(-E_A)]}{m_{br}.s} \tag{3}$$

Показателят, определен по формула (3), дава нетната енергоемкост на товарната превозна работа. Този показател няма реално практическо приложение у нас. Той се използва единствено за оценка на енергийната ефективност в точката на то-

коснемане на локомотивите.

Среден фактор на мощността – λ_{ave}. Този показател се изчислява по (4):

$$\lambda_{ave} = \frac{(+E_A)}{\sqrt{(+E_A)^2 + (+E_R)^2}} \qquad (4)$$

Където $(+E_R)$ е стойността на върнатата в тяговата мрежа активна електроенергия за определен период от време (една повеска), kVAh. С помощта на (4) се оценява качеството на електропотребление на електрическите локомотиви. В практиката този показател се използва при определяне на надбавките за лош фактор на мощност, прилагани към цената на използваната от даден локомотив трафична електрическа енергия.

Енергия за потегляне и ускоряване до дадена допустима скорост – E_a, kWh. С използване на методиките посочени в [1, 2], аналитично може да се изчисли електрическата енергия за потегляне и ускоряване на влака, до допустимата за даден железопътен участък скорост, по (5):

$$E_a = \frac{m_{br}.g.v_a^2}{2.3,6.10^6.\eta_{loc}}.\left[\frac{(\overline{w}_f + w_i)}{\bar{a}} + \frac{1}{\xi}\right] \qquad \xi = \frac{g}{1000.(1+\gamma)} \qquad (5)$$

където: m_{br} – брутна маса на товарния влак, t; g – земното ускорение, m/s^2; v_a е допустимата максимална скорост за междугарието, m/s; w_f – средна стойност на основното съпротивление на движение за скоростния диапазон $0 \div v_a$, N/kN (за изследваните товарни влакове и скорост v_a **= 16,67 m/s**, w_f **= 2,2 N/kN**); w_i – съпротивление от наклона, ‰; $\bar{a}$ – средна стойност на ускорението до скорост v_a, m/s^2 (за разглежданите влакове е приета стойност на средното ускорение $\bar{a}$ = **0,18 m/s^2**); η_{loc} – общ коефициент на полезно действие на локомотива (за локомотиви серия ÖBB 1116 $\eta_{loc} \approx 0,815$); γ – инерционен коефициент на въртящите се маси (за разглежданите влакове, теглени от локомотиви серия ÖBB 1116 $\gamma = 0,045 \div 0,05$). С помощта на (5) се изчислява допълнителната електрическа енергия за потегляне и ускоряване на влака при всяко извънредно спиране.

4. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ

В проведеното изследване са включени дванадесет товарни влака, извършвали превози в железопътния участък Каспичан-Карнобат-Тулово – по шест влака в двете направления. Експерименталните измервания са проведени за период от три месеца. Основните експлоатационни данни за железопътния участък и параметрите на изследваните товарни влакове са показани в табл.2 и табл.3. Резултатите за разхода на електрическа енергия (активна $+E_A$ и реактивна $+E_R$), върната в тяговата мрежа енергия (активна $-E_A$ и реактивна $-E_R$), масата и пробега на влаковете, както и стойностите на изчислените относителни енергии e_T и e_R и реализирания среден фактор на мощност λ_{ave} са показани в табл.4 и табл.5. С цел да се минимизира влиянието някои фактори с непостоянен характер (организация на движението; броя на вагоните; нетната маса на превозваните товари), получените енергийни данни са осреднени за изследваните влакове, извършвали превоз в едно направление. В табл.6 са показани средните стойности на енергийните показатели за изследваните товарни влакове.

Таблица 2

Експлоатационни данни за железопътния участък Каспичан-Карнобат-Тулово

Наименование на гарата	Надморска височина	Брой пътища	Допуст. скорост	Дължина на междугарието	Денивелация между гарите	Среден наклон	Макс. наклон (±), дължина
-	m	-	km/h	km	m	‰	‰/m
Каспичан	**94**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**
Провадия	34	2	80	30,051	-60	-2,00	-4,50/300
Синдел разпределителна	9	2	80	20,654	-25	-1,21	-10,20/931
Юнак	12	1	60	4,942	3	0,61	-4,00/500
Величково	36	2	80	16,870	24	1,42	11,20/3570
Дългопол	32	2	80	8,700	-4	-0,46	-3,70/700
Комунари	71	2	80	9,046	39	4,31	11,40/370
Аспарухово	96	1	80	3,339	25	7,49	11,20/470
сп, Струя	85	2	80	6,938	-11	-1,59	-10,00/740
Търнак	88	1	80	3,784	3	0,79	-0,5/300
Дъскотна	96	1	60	10,068	8	0,79	3,00/360
Люляково	142	1	60	11,277	46	4,08	10,00/920
Завет	156	2	80	5,973	14	2,34	11,00/310
Ведрово	214	2	80	5,774	58	10,05	12,00/1770
Подвис	309	1	60	10,281	95	9,24	12,00/1200
Лозарево	239	1	80	7,586	-70	-9,23	-11,40/615
Вълчин	191	2	80	6,443	-48	-7,45	-12,00/530
Карнобат	178	2	80	10,791	-13	-1,20	-10,00/
Църковски	152	2	60	13,012	-26	-2,00	-7,20/1760
Страланджа	148	2	80	13,338	-4	-0,30	-4,25/800
Зимница	158	2	80	7,546	10	1,33	-7,86/575
Желю войвода	140	1	80	9,593	-18	-1,88	-11,40/740
Сливен	229	1	80	14,419	89	6,17	15,10/395
Чинтулово	192	1	80	8,796	-37	-4,21	12,50/
Гавраилово	221	1	80	6,579	29	4,41	14,50/
Чумерна	239	1	60	10,966	18	1,64	13,40/
Шивачево	265	1	80	4,005	26	6,49	15,00/
Твърдица	339	1	60	12,323	74	6,01	15,00/700
Гурково	291	1	80	8,813	-48	-5,45	-14,20/254
сп, Николаево	271	1	70	3,721	-20	-5,37	-12,50/
Дъбово	319	1	80	12,706	48	3,78	16,00/
Тулово	**320**	**2**	**80**	**8,346**	**1**	**0,12**	**-15,00/346**

- начална/крайна гара - гари със задължително спиране

5. ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Резултатите от изследването позволяват да са направят следните изводи:

❖ Средният специфичен разход на енергия $\bar{e}_T$, Wh/t.km на изследваните товарни влакове, движили се по направление Каспичан-Карнобат-Тулово, е с около 2 Wh/t.km по-висок от този на влаковете, движили се в обратната посока Тулово-Карнобат-Каспичан. Това е следствие на преодоляваната абсолютна денивелация от +226 m между Каспичан и Тулово.

❖ Средната дял на върната в тяговата мрежа енергия $\Delta Er\%$ от влаковете движили се по направление Тулово-Карнобат-Каспичан е повече от два пъти по-голям от този на влаковете движили се по направление Каспичан-Карнобат-Тулово. Това е следствие на многото на брой наклони на спускане в това направление (табл.1) със стойности 10÷12‰ и дължини от 1000÷3500 m, при които регулирането на скоростта става с използване на електрическата рекуперативна спирачна система на локомотива.

❖ Високият среден фактор на мощността, реализиран при движението на изследваните влакове, е постигнат чрез прецизно управление на 4-квадрантните преобразуватели от системата за управление SIBAS 32. Подобни резултати са установени и при други тествани в България локомотиви с асинхронни тягови електрозадвижвания със сродно регулиране [1].

❖ За избягване на субективния човешки фактор, изследваните влакове са управлявани от един същ машинист, със стаж повече от 15 г. Индивидуалната техника на управление на влаковете от страна на машинистите може да окаже съществено влияние върху енергийното потребление, като отклоненията могат да достигнат до 15÷20% от оптималните стойности за този тип локомотиви.

Таблица 3

Експлоатационни параметри на изследваните товарни влакове

Локомотив Серия-№	Категория товарен влак	Направление	Разстояние	Брой вагони	Тип вагони	Нето маса	Бруто маса
			km	-	-	t	t
1116-024	МДТВ	Каспичан-Тулово	306,68	16	Sggmrss	579	1161
1116-025	МДТВ	Каспичан-Тулово	306,68	16	Sggmrss	796	1384
1116-027	МДТВ	Каспичан-Тулово	306,68	17	Sggmrss	417	999
1116-074	МДТВ	Каспичан-Тулово	306,68	13	Sggmrss	637	1121
1116-254	МДТВ	Каспичан-Тулово	306,68	15	Sggmrss	456	1002
1116-259	МДТВ	Каспичан-Тулово	306,68	17	Sggmrss	629	1242
1116-068	МДТВ	Тулово-Каспичан	306,68	17	Sggmrss	383	969
1116-071	МДТВ	Тулово-Каспичан	306,68	17	Sggmrss	362	954
1116-072	МДТВ	Тулово-Каспичан	306,68	17	Sggmrss	468	1056
1116-074	МДТВ	Тулово-Каспичан	306,68	17	Sggmrss	723	1329
1116-254	МДТВ	Тулово-Каспичан	306,68	15	Sggmrss	430	990
1116-255	МДТВ	Тулово-Каспичан	306,68	13	Sggmrss	197	709

Таблица 4

Данни от измерванията на разхода на енергия за изследваните товарни влакове по направление Каспичан-Карнобат-Тулово

Локомотив серия номер	Изминато разстояние	Брутна маса	Брой спирания	Техническа скорост	Измерени енергии				Дял на рекуп. енергия ΔEr%	Специф. тягов разход e_T	Нетен специф. разход e_N	Фактор на мощност λ_{ave}
					$+E_A$	$-E_A$	$+E_R$	$-E_R$				
№	km	t	-	km/h	kWh	kWh	kVAh	kVAh	%	Wh/t.km	Wh/t.km	-
1116-024	306,68	1161	10	56,97	5469	621	412	0	11,35	15,36	13,62	0,999993
1116-025	306,68	1384	10	59,36	6282	878	429	0	13,98	14,80	12,73	0,999995
1116-027	306,68	999	9	58,23	4778	559	352	0	11,70	15,60	13,77	0,999992
1116-074	306,68	1121	9	60,73	4994	766	394	0	15,34	14,53	12,30	0,999992
1116-254	306,68	1002	9	60,13	4536	667	284	0	14,70	14,76	12,59	0,999993
1116-259	306,68	1242	10	59,55	6029	656	317	0	10,88	15,83	14,11	0,999996

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното експериментално изследване дава възможност да се направи реална оценка на енергийната ефективност на експлоатираните от „Рейл Карго Кериър-България“ ЕООД локомотиви ES64U2 Taurus-серия ÖBB 1116.

Представените и детайлно анализирани данни за електроенергийното потребление на изследваните товарни влакове, показват безспорните предимства на локомотивите със асинхронни тягови електрозадвижвания и рекуперативни спирачни системи, регулирани с помощта на специализирани бордови компютри.

Таблица 5

Данни от измерванията на разхода на енергия за изследваните товарни влакове по направление Тулово-Карнобат-Каспичан

Локомотив серия номер	Изминато разстояние	Брутна маса	Брой спирания	Техническа скорост	Измерени енергии				Дял на рекуп. енергия ΔEr%	Специф. тягов разход e_T	Нетен специф. разход e_N	Фактор на мощност λ_{ave}
					$+E_A$	$-E_A$	$+E_R$	$-E_R$				
№	km	t	-	km/h	kWh	kWh	kVAh	kVAh	%	Wh/t.km	Wh/t.km	-
1116-068	306,68	969	10	58,05	4024	1111	353	0	27,61	13,54	9,80	0,999989
1116-071	306,68	954	6	58,23	3965	1089	365	0	27,47	13,55	9,83	0,999988
1116-072	306,68	1056	10	57,86	4326	1191	424	0	27,53	13,36	9,68	0,999989
1116-074	306,68	1329	9	60,53	5074	1576	449	0	31,06	12,45	8,58	0,999991
1116-254	306,68	990	13	55,76	4101	1129	344	0	27,53	13,51	9,79	0,999990
1116-255	306,68	709	9	55,59	3274	808	394	0	24,68	15,06	11,34	0,999982

Таблица 6

Средни стойности на енергийните показатели за изследваните товарни влакове

Направление на движение на влаковете	Изминато разстояние	Средна брутна маса	Среден брой спирания	Средна техническа скорост	Средни стойности на енергиите				Среден дял на рекуп. енергия ΔĒr%	Среден специф. тягов разход $\bar{e}_T$	Среден нетен специф. разход $\bar{e}_N$	Среден фактор на мощност λ_{ave}
					$+\bar{E}_A$	$-\bar{E}_A$	$+\bar{E}_R$	$-\bar{E}_R$				
	km	t	-	km/h	kWh	kWh	kVAh	kVAh	%	Wh/t.km	Wh/t.km	-
Каспичан-Тулово	306,68	1152	9,5	59,16	5348	691	365	0	12,92	15,14	13,19	0,999994
Тулово-Каспичан	306,68	1001	9,5	57,67	4127	1151	388	0	27,88	13,44	9,69	0,999989

Получените по експериментален път резултати за енергийните параметри на изследваните товарни влаковете, теглени с локомотиви ES64U2 Taurus-серия ÖBB 1116 дават основание да се препоръча на ръководството на „Холдинг БДЖ" ЕАД, при обоснована перспектива за развитие на държавния железопътен превозвач „БДЖ-Товарни превози" ЕООД, да предприеме действия по обновяване на локомотивния му парк, като всички експлоатирани в момента електрически локомотиви бъдат заменени със съвременни четириосни машини за скорост 160 km/h, с асинхронни тягови електрозадвижвания и рекуперативно спиране.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ангелов И., П. Матов, ***Анализи на тягов ток при локомотиви с асинхронни тягови двигатели***, Годишник на Технически университет - София, том 66, книга 1, 2016, стр. 353-354

[2] Българанов Л., ***Електрически транспорт***, София, 2009, стр. 135

[3] Българанов Л., Т. Йонов, ***Ръководство за проектиране по електрически транспорт***, София, 2001

[4] Деянов Д., ***Електрическият локомотив ES 64 U2 на Сименс***, Сп. Железопътен транспорт, бр. 3, 2006 г.

[5] Новкиришки П., ***Локомотивите TAURUS***, Сп. Железопътен транспорт, бр. 11-12, 2010 г.

[6] ***Bedienungsanweisung der Triebfahrzeugbaureihe*** **Dispolok ES64U2 (V2, V6, V7, V9) HUPAC ES64U2 (V3)**, SIEMENS Transportation Systems, Germany, 2007

Автори: Георги Иванов Димитров, асистент инж., кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков", E-mail address: *dimitrov_gd@mail.bg*; **Иван Петров Петров**, доц. д-р инж., кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков", E-mail address: *ivanpetrov60@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Иван Ангелов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ТОВАРОВИТЕ ГРАФИЦИ НА ПРЕДПРИЯТИЕ ОТ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАТА ПРОМИШЛЕНОСТ

Харалан Пенев

Резюме: *Характеристиките на електрическите товари и режимът им на работа определят видът на товаровите графици на различните стопански субекти, ефективното използване на електрическата енергия и смущаващите въздействия свързани с електромагнитната съвместимост (EMC). С развитието на технологиите и тяхната достъпност, технологичното оборудване в производствените предприятия се подменя като това изменя и характера на товарите. Това изисква периодични изследвания на електрическите товари. В този доклад е направена класификация на основните видове електрически товари в предприятие от електротехническата промишленост според предназначението им, смущаващите въздействия върху качеството на електрическата енергия и фактора на мощност. Определени са техните показатели (характеристики), коментирани са възникнали проблеми и методи за тяхното решаване. Резултатите получени от тези изследвания ще се използват за подобряване на фактора на мощност на предприятието. Могат да се използват и при проектирането на електрозахранването и при експлоатацията на подобни обекти.*
Ключови думи: *товарови графици, изчислителни товари, фактор на мощността, капацитивна мощност, реактори*

LOAD PROFILE PARAMETERS STUDY OF A FACTORY FROM THE ELECTROTECHNICAL INDUSTRY

Haralan Penev

Abstract: *The electrical loads characteristics and working rates defines the load profiles type of the various industrial sites, the electrical power effective usage and the electromagnetic compatibility (EMC). The technological equipment in the production plants is being renewed together with the technological development and accessibility. This requires periodic researches of the electrical loads. This report refers to the classification of the basic electrical load types in a factory from the electrotechnical industry based on their purpose, electromagnetic compatibility electromagnetic disturbance upon the electrical power quality and the power factor. Their characteristics are defined, the encountered issues had been subject of comments and decision-making methods are proposed. The results from these researches can be used both for electrical power supply design of similar objects, and for the operation of similar sites.*
Keywords: *load profiles, demand and peak loads, power factor, capacitive power, reactors*

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Разработката е на база изследване на товаровите профили на предприятие от електротехническата промишленост. Основната дейност в предприятието е монтажна с ръчни инструменти. Затова основните товари са системата за отопление и вентилация, осветителната инсталация, инсталация за поддържане в течно състояние на импрегнираща смола, помпи с честотно управление работещи на различни места в предприятието. Системата за ОВК е съставена от конвектори, газов котел за затопляне и водоохладителен агрегат с охладителна кула. Беше направен анализ на данните свалени от устройството за търговско измерване монтирано на основният захранващ електропровод. Установи се че предприятието връща реактивна енергия в мрежата в часовете, когато предприятието не работи.

2. КЛАСИФИКАЦИЯ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ТОВАРИ В ПРОИЗВОДСТВЕНИТЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Според предназначението си електрическите консуматори в сградите с производствено предназначение могат да се разделят на следните групи: за отопление, вентилация и климатизация (ОВК); за осветление; производствено оборудване; офис оборудване.

А. Електрически товари в системите за отопление и вентилация

В системите за отопление и вентилация има няколко основни вида електрически консуматори: помпи, вентилатори, компресори, задвижващи механизми, нагреватели и управляваща електроника. Помпите, вентилатори и компресорите най-често се задвижват от асинхронни двигатели (АД). Двигателите се захранват или директно или през честотни задвижвания. Честотните задвижвания са нелинейни товари за захранващата мрежа, като съвременните устройства са с вграден cosφ регулатор, който поддържа висок фактор на мощността (ок. 0.98 инд.). Нагревателите са активни линейни товари.

Б. Осветителен товар

За осветление в промишлените сгради се използват различни светлинни източници, но по принцип на работа са три: лампи с нажежаема жичка, газоразрядни лампи и светодиодни лампи. Тези с нажежаема жичка са активен линеен товар, но тяхното използване намалява, поради ниската им енергийна ефективност. Газоразрядните светлинни източници и светодиодните лампи се захранват или чрез конвенционални баласти (пасивни R, L, C елементи) или чрез електронни импулсни захранвания.

В. Производствено оборудване

В промишлените предприятия производственото оборудване основно бива: кранове, компресори, помпи и специализирани машини.

В разглежданото предприятие освен горе изброените има инсталирани линия за мокро боядисване, машини за производство на магнитопроводи и навиване на трансформатори, камери за импрегниране с епоксидна смола, пещи за изпичане на епоксидната смола.

Г. Офис оборудване (компютри, принтери, факсове и т.н.)

Съвременните електронни устройства се захранват чрез импулсни захранвания.

Начинът на захранване и управление на разгледаните консуматори определя ефективността им и електромагнитната им съвместимост. Основните групи електромагнитни смущения могат да се разделят на три групи:

- хармоници на тока и напрежението разпространявани чрез проводниците и генерирани от нелинейните товари (електронни преобразувания и газоразрядни лампи). Това са нискочестотни смущения под 9kHz [IEC 61000-2-5];
- високочестотни смущения - нежелани електрически сигнали, които се разпространяват по проводниците и по въздуха под формата на магнитни полета и радио вълни. Тези смущения се генерират от електронните захранвания, честотните преобразуватели и други електронни устройства. Честотата на тези смущения са от няколко kHz до повече от десетки MHz.
- факторът на мощност на захранващите устройства не е буквално смущение, но ще го разглеждаме тук, защото е важен показател за ефективността на използване на електрическата енергия.

3. ТОВАРОВИ ГРАФИЦИ

Товаровите графици носят информация която се използва при проектирането на електроснабдителните системи на различните обекти; за изготвяне на прогнозни графици; за анализ работата на консуматорите с цел подобряване режимите на работа (ефективно използване на електрическата енергия), откриване на повреди и др. За да се използва за практически цели информацията от товаровите графици се определят два вида величини – изчислителни електрически товари и коефициенти (бездименсионни показатели). Устойчив товаров график $P(t)$ с голяма продължителност може да се разтегли на m интервала с продължителност Θ минути и да се състави статистически ред от средни Θ товари: $P_{\Theta 1}, P_{\Theta 2}, \ldots\ldots, P_{\Theta i}, \ldots\ldots, P_{\Theta m}$. Когато групата е съставена от 6÷8 и повече еквивалентни броя консуматори [$n_e \geq (6 \div 8)$], средният Θ товар е случайна величина, която се подчинява на нормалния закон на разпределение и се характеризира с два показателя: математическо очакване $m_P = M[P_\Theta]$; средноквадратично отклонение σ_Θ [1].

В статията е изследвано предприятие от електротехническата промишленост. Заснети месечните товарови графици с интервал на записите 15 минути. На тяхна база са изчислени следните показатели (Табл. 1) [1,2,3,4,5]:

- средни товари - Pср, Qср ;
- средноквадратичен товар – Pср.кв, Qср.кв. ;

$$P_{ср.кв} = \sqrt{P_{ср}^2 + \sigma^2}, kW \quad (1) \qquad Q_{ср.кв} = \sqrt{Q_{ср}^2 + \sigma^2}, kVAr \quad (2)$$

- максимално-продължителни товари - Pм, Qм ;

- коефициент на максимума $K_м = \frac{P_м}{P_{ср}}$;
- коефициент на формата $K_ф = \frac{P_{ср.кв}}{P_{ср}}$;
- коефициент на използване $K_и = \frac{P_{ср}}{P_н}$;
- коефициент на търсене $K_т = \frac{P_м}{P_н}$;
- средноквадратично отклонение - $\sigma_\Theta = \sqrt{D\left[P_\Theta\right]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(P_{\Theta i} - \overline{P_\Theta}\right)^2}{m-1}}$. (3)

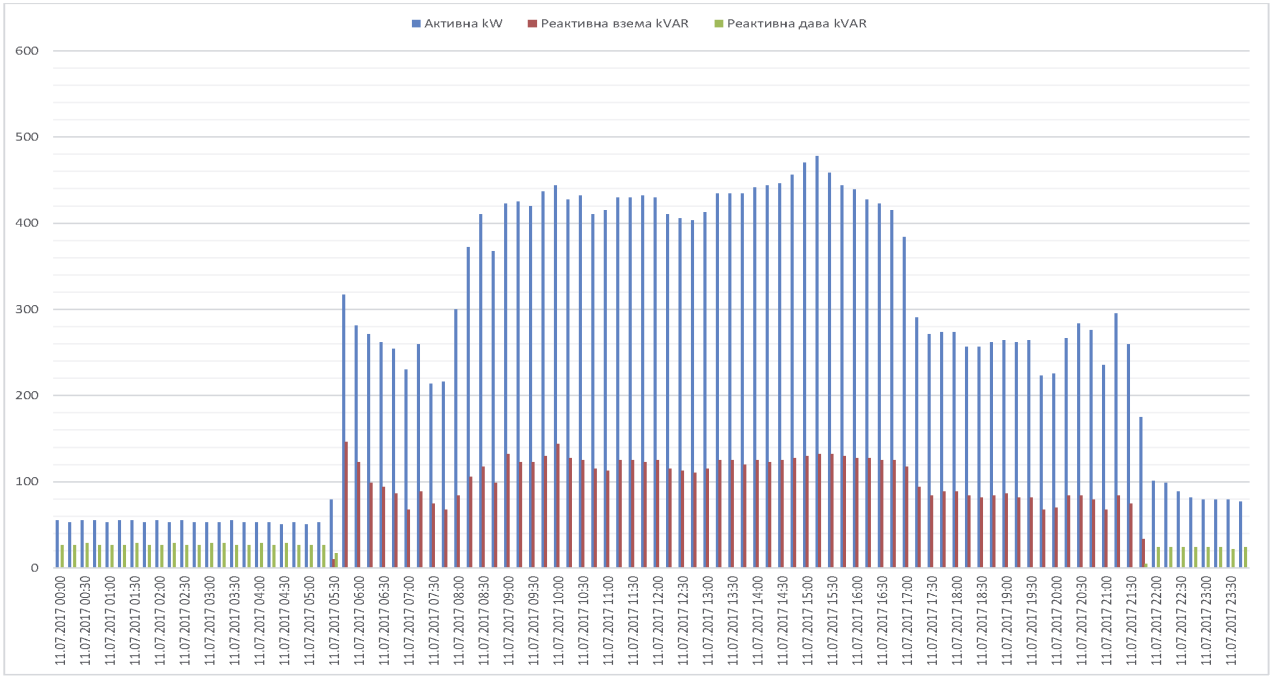
Таблица 1

Показатели на товаровите графици.

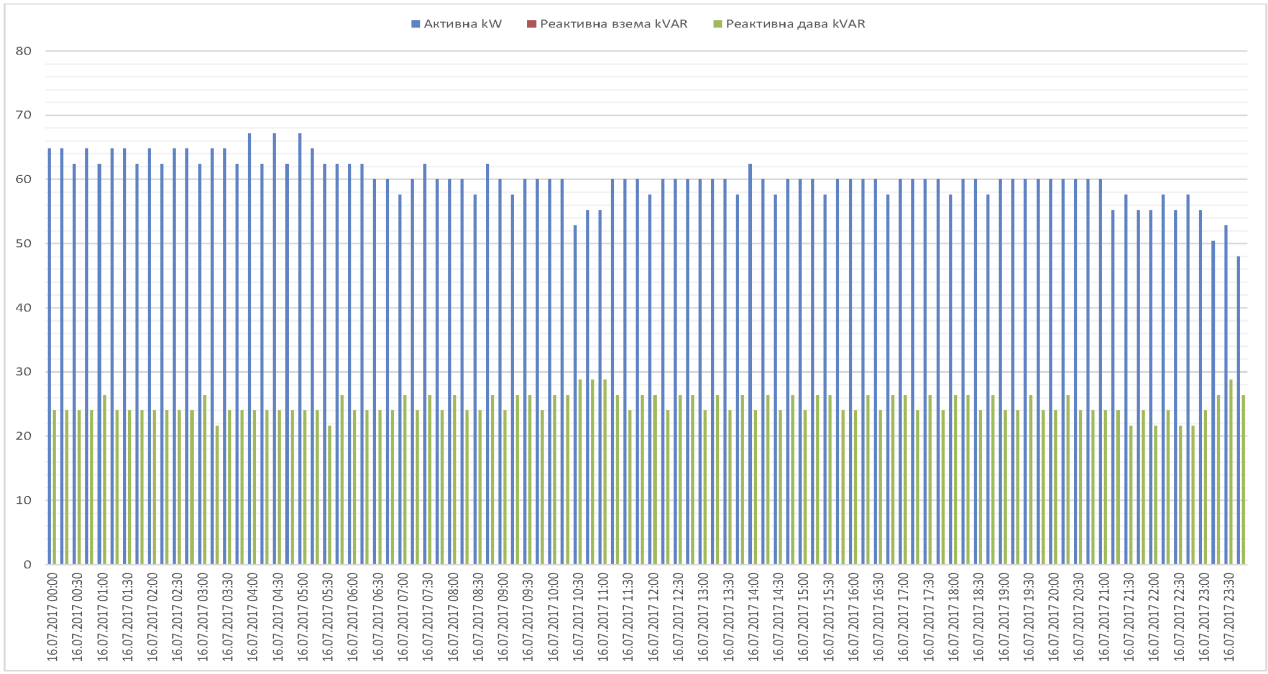
Показател	**Мерна единица**	**Стойност**
$P_{ср.}$	kW	169,91
$Q_{ср.}$ (инд.)	kvar	25,48
$Q_{ср.}$ (кап.)	kvar	16,42
$P_{ср.кв.}$	kW	214,64
$Q_{ср.кв.}$ (инд.)	kvar	133,60
$Q_{ср.кв.}$ (кап.)	kvar	132,17
$P_м$	kW	643,20
$Q_м$ (инд.)	kvar	216,00
$Q_м$ (кап.)	kvar	40,80
$\cos\varphi_{ср.}$ (инд.)	-	0,99
$\cos\varphi_{ср.}$ (кап.)	-	0,95
Км	-	3,79
Кф	-	1,26
Ки	-	0,09
Кт	-	0,33
σ_Θ	kW	131,14

4. ПРОБЛЕМИ И РЕШЕНИЯ

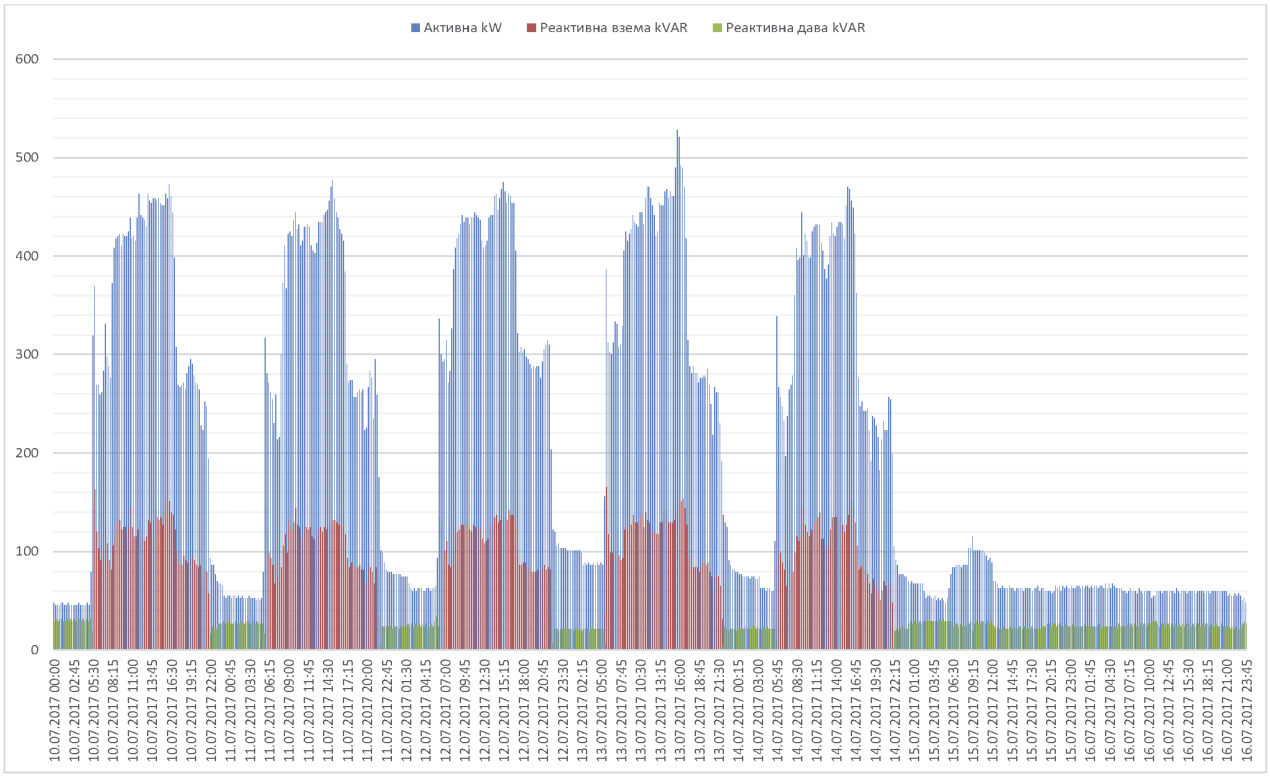
На базата на анализа на товаровите графици и техните характеристики се установи, че извън работно време, когато системата за ОВК на обекта е изключена реактивните товари имат капацитивен характер и се връща реактивна енергия в обществената мрежа (фиг.1.а, б, в). Това води до финансови санкции, според действащата тарифа за заплащане на електрическата енергия [8]. Това наложи проучване на вида на товарите в изследваният обект, схемите на захранване и изготвяне на баланс на реактивните мощности.



Фиг.1.а. Товаров график през работен (летен) ден



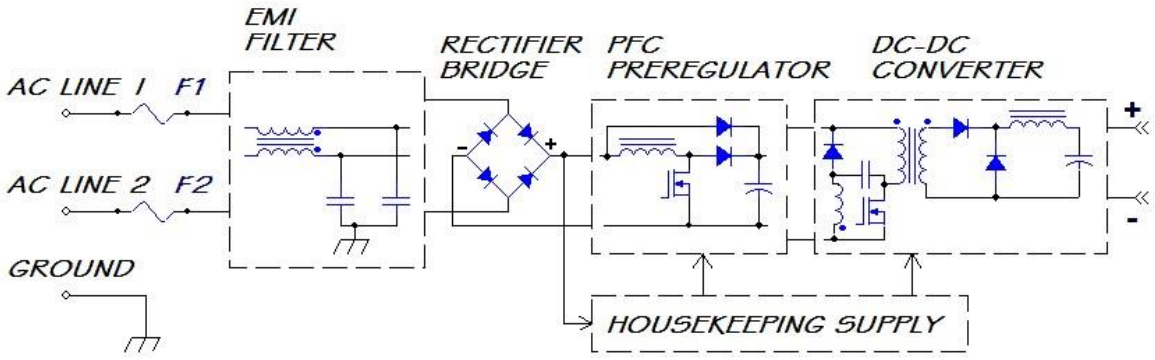
Фиг.1.б. Товаров график през работен (летен) ден



Фиг.1.в. Седмичен товаров график

Обследването на електрическите товари на предприятието установи, че:

- Предприятието се захранва с 20kV от собствен извод в една от градските подстанции 110/20kV. Захранването се осъществява с кабел САКЕкТ със сечение 185mm^2 и дължина 1000 m. Всички товари в предприятието са на ниско напрежение.
- За осветление се използват газоразрядни и светодиони осветители като и двата вида се захранват с електронни импулсни захранвания с вградена корекция на фактора на мощност (PFC) и филтър за електромагнитни смущения (EMI) - фиг.2 [6, 9]. Осветителният товар в предприятието е 42,8kW;



Фиг.2. Блокова схема на импулсно захранване

- Всички помпи са с честотни задвижвания;
- Най-големият товар с индуктивен характер се явява системата за ОВК. Като конвекторите са с обща мощност 42kW и работят целого-

дишно в работно време. Водоохладителният агрегат е с мощност 260kW като при по-горещо време към него се включва и водоохладителна кула с мощност 37kW. Конвекторите и водоохладителният агрегат са с директно захранване.

Наличието на EMI филтър и PFC ограничава разпространението на високочестотни смущения и намалява хармониците на тока (нискочестотните смущения), и поддържа висок фактор на мощност 0.97, но с капацитивен характер.

От месечния товаров график на реактивните товари се определи максималната капацитивна мощност на предприятието – Qmax=40.8kvar. През работно време конвекторите компенсират капацитивните товари. Основната част от този товар се дължи на захранващият кабел СрН. Кабелът е с дължина 1 km. Капацитетът на кабелът е C_0 = 0,285 μF/km. Реактивната мощност, която генерира кабелът се изчислява по формулата:

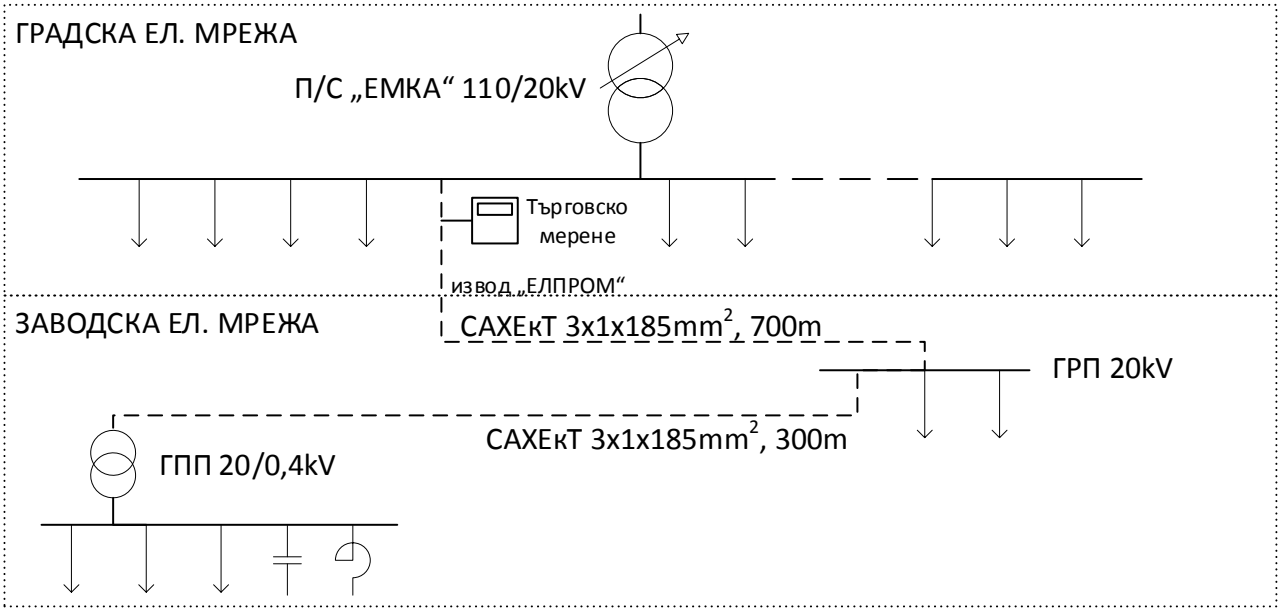
$$Qc = C_0.L.\omega.U^2,$$

където:

- C_0 е специфичният капацитет на кабела, F/m;
- L е дължината на кабела, m;
- $\omega = 2.\pi.f$ е ъгловата честота, Hz;
- U е номиналното напрежение.

Изчислената реактивната мощност на кабела е Qc = 35,81kvar. Измерената максимална стойност на реактивната мощност на кабела е Qc = 29,76kvar.

Осветителите в производствените помещения са общо 206 като всеки от тях е с мощност 210W. Чрез измерване се установи че всеки осветител генерира 45var капацитивна мощност. Това е общо 9,3kvar.



Фиг.3. Схема на електроснабдяване на предприятието.

За да не се връща реактивна мощност към мрежата ще бъде монтиран реактор с мощност 50kvar в ГПП (фиг. 3). Включването на реактора трябва да е с подходяща автоматика, тъй като не през цялото денонощие реактивният товар е капацитивен. В случая е целесъобразно управлението по мощност. Самото управление ще се извършва от наличен в подстанцията мултиметър, който ще включва реактора при товар по-малък от 150kW.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В съвременните промишлени сгради реактивните електрически товарите могат да се окажат с капацитивен характер, което изисква компенсиране с реактори. Това трябва да се има предвид още в етапа на проектиране, да се изготвя баланс на реактивните товари и да се предвиждат необходимите компенсиращи устройства (капацитивни и/или индуктивни) и подходяща автоматика.

ЛИТЕРАТУРА

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

[2] Willis H. Lee., ***Power Distribution Planning Reference Book,*** Marcel Dekker, 2004

[3] Short T. ***Electric power distribution handbook.*** CRC Press LLC. 2014.

[4] Grattieri W., A. Demouselle, T. Dunne, H.R. Hagmann, J.M.H. Kevers, S. Lindskoug, H. Ottosson, J.F. Reynaud, ***Electric Load Management in Industry,*** Leonardo-Energy, January 1996.

[5] Price P. ***Methods for Analyzing Electric Load Shape and its Variability***, Lawrence Berkeley National Laboratory, Publication number: CEC-XXX-2010-XXX, May 2010.

[6] Hesener A., ***Electromagnetic Interference (EMI) in Power Supplies,*** Fairchild Semiconductor Power Seminar 2010-2011.

[7] ABB **Switchgear Manual** 9th edition, p.101

[8] НАРЕДБА № 1 от 14 Март 2017г. ***за регулиране на цените на електрическата енергия***, Обн. ДВ. бр.25 от 24 Март 2017г.

[9] www.smps.us

Автор: Харалан Пламенов Пенев, маг. инж., докторант, катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт" (ECEOET), Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *haralan.penev@bg.abb.com*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: проф. д-р Стоян Стоянов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ, ПРОИЗВЕДЕНА ОТ ФОТОВОЛТАИЧНА ЦЕНТРАЛА

Светлана Цветкова, Ангел Петлешков

Резюме: *В доклада са дадени и анализирани резултати от изследване на характеристиките на електрическата енергия, произведена от фотоволтаична електрическа централа. Направен е анализ и сравнение на получените резултати за показателите за качество на електрическата енергия със нормативните документи.*
Ключови думи: *фотоволтаична централа, качество на електрическата енергия.*

STUDY OF THE ELECTRICAL ENERGY CHARACTERISTICS, PRODUCED FROM PHOTOVOLTAIC STATION

Svetlana Tzvetkova, Angel Petleshkov

Abstract: *The results from a study of the characteristics of electrical energy produced from photovoltaic station, are presented and analyzed in the paper. Also has been made a comparison of measured power quality indexes, relevant regulations.*
Keywords: *photovoltaic station, electrical energy quality.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Днес се обръща все по-голямо внимание на електрическата енергия, с която се захранват потребителите. За това е необходимо да се анализира всеки етап от производството и 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.
В разработката на статията са дадени и анализирани резултати от изследване на характеристиките на електрическата енергия, произведена от фотоволтаична електрическа централа. Направен е анализ и сравнение на получените резултати за показателите за качество на електрическата енергия със съответните нормативни документи [1, 2, 3, 4].

2. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ И ТОЧКА НА ИЗМЕРВАНЕ

Изследваният обект е фотоволтаична електрическа централа (ФВЕЦ) с мощност 5000 kVA, намираща се в близост до с. Сапарево. Връзката към електроенер-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

гийната система се осъществява чрез въздушна линия 20 kV и трафопост, в който са монтирани 5 броя трансформатори с мощност по 1000 kVA.

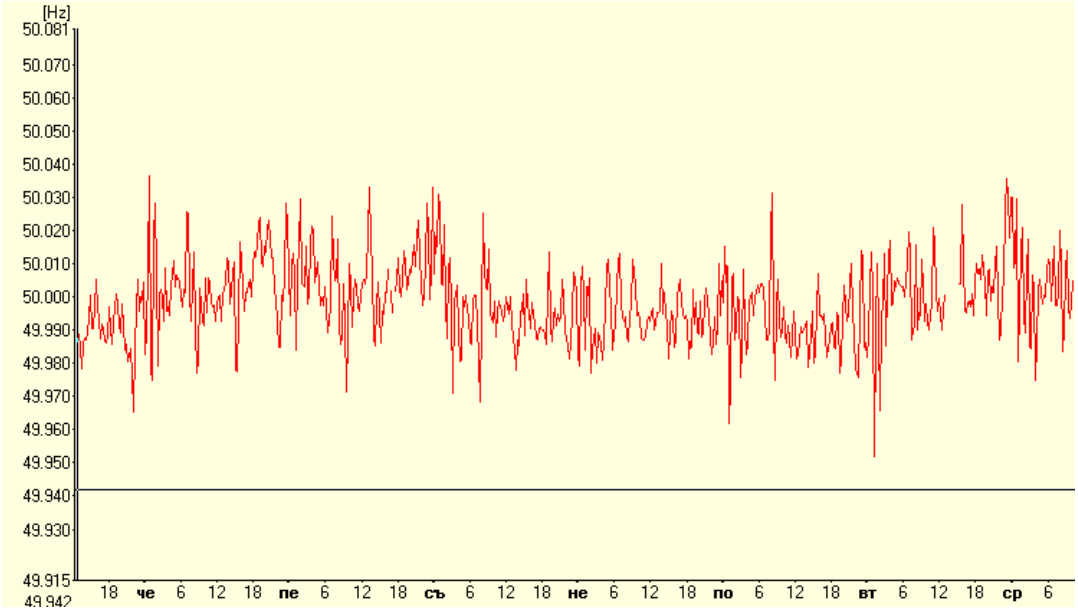
Измерванията са проведени на извод 20 kV [4, 5] с мултифункционален измервателен уред Meg31, който е присъединен към трите фази. Използваният уред дава възможност за измерване, изчисляване, запис и анализ на всички електрически величини и показатели за качество на електрическата енергия [1, 2].

Периодът на измерване е 1 седмица с интервал на осредняване на измерванията от 10 минути. Получената информация от измерванията е обработена със специализиран софтуер.

3. ИЗСЛЕДВАНЕ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Изследването е проведено в периода от 12:30 часа на 04.07 до 10:30 часа на 11.07.

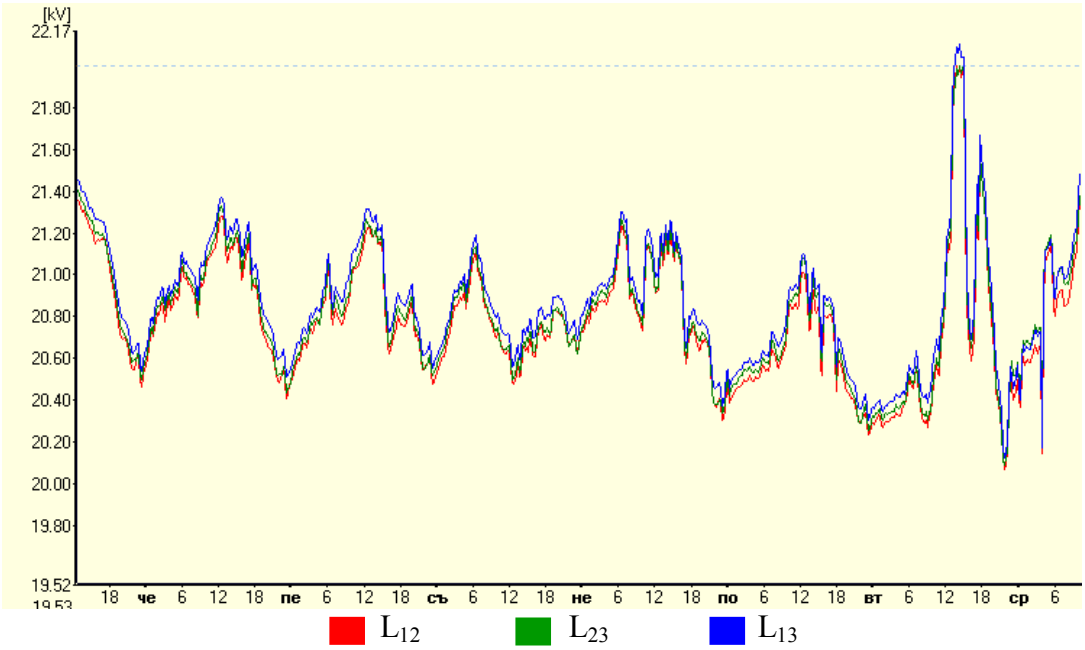
На фиг.1 е показана честотата на захранващото напрежение за периода на измерване - максимална стойност 50,05 Hz и минимална стойност 49,94 Hz. Максималното отклонение на честотата е −0,06 Hz или −0,12%ч. Следователно 100% от измерените стойности на честотата на захранващото напрежение напълно отговарят на нормата от 50Hz ± 1% (49,5 Hz до 50,5 Hz) за период от една седмица, дадена в [1, 3, 4].



Фиг.1. Честота на захранващото напрежение

На фиг.2 е показано изменението на ефективните стойности на трите напрежения на главното захранване на ФВЕЦ „Сапарево“ за периода на измерване - за фази L_{12}, L_{23} и L_{13}. В табл.1 са показани минималната, средната и максималната измерена стойност.

Максималните отклонения на напреженията са съответно: (-2%, 10,5%) за фаза L_{12}; (-1,5%, 10,5%) за фаза L_{23}; (-2%, 11%) за фаза L_{13}.

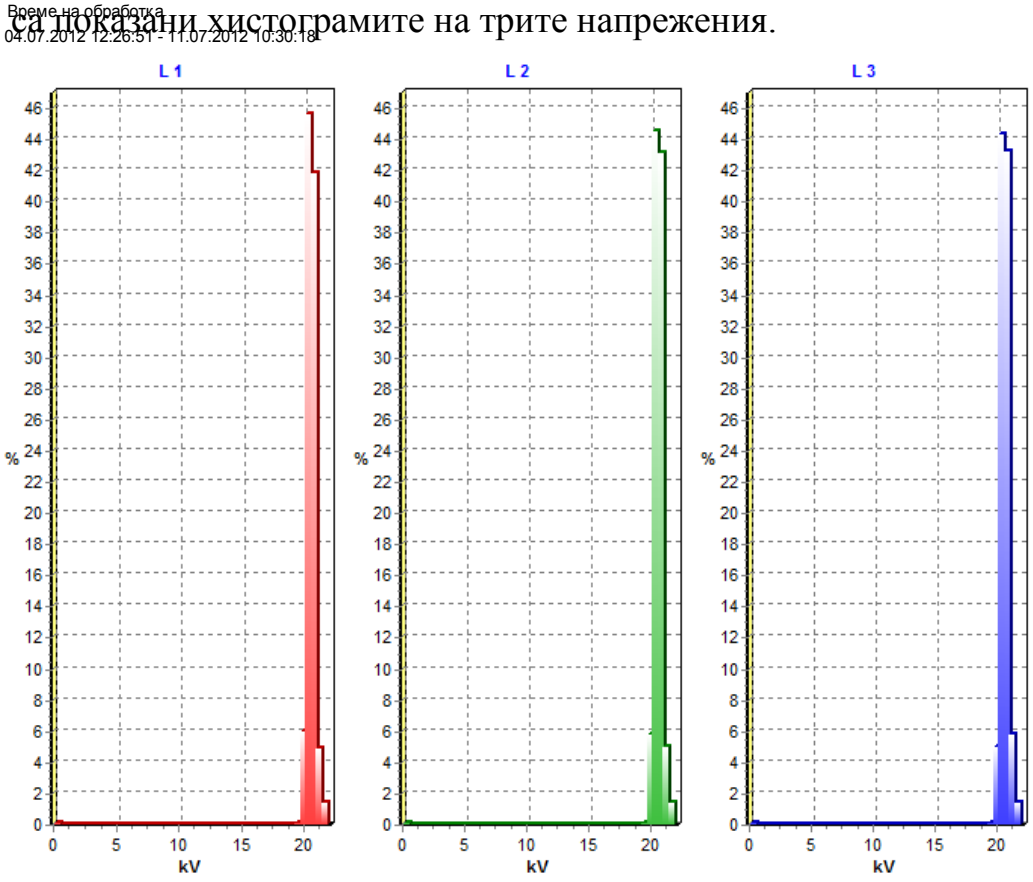


Фиг.2. Стойности на линейните напрежения.

Таблица 1

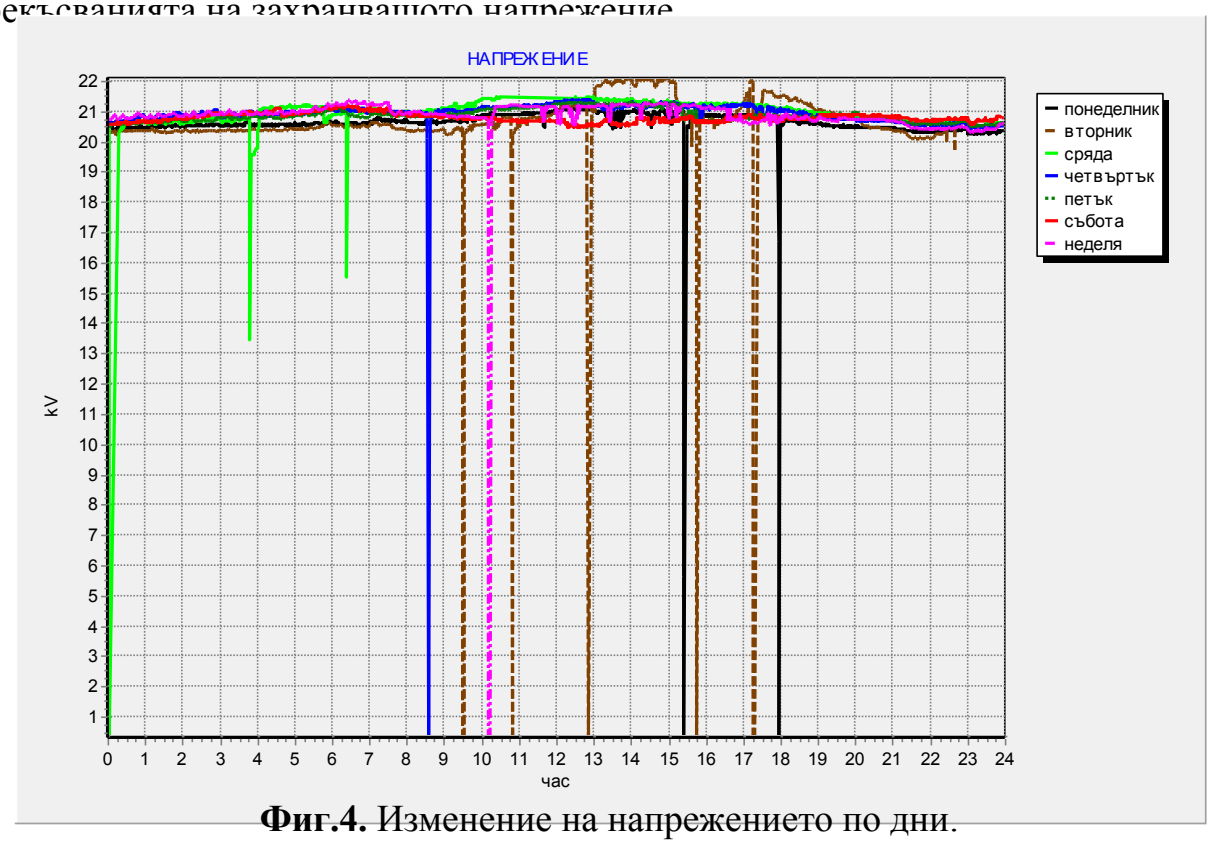
Величина	Фаза	Стойност минимална	средна	максимална
U, kV	L_{12}	19,6	20,8	22,1
	L_{23}	19,7	20,8	22,1
	L_{13}	19,6	20,9	22,2

На фиг.3 са показани хистограмите на трите напрежения.

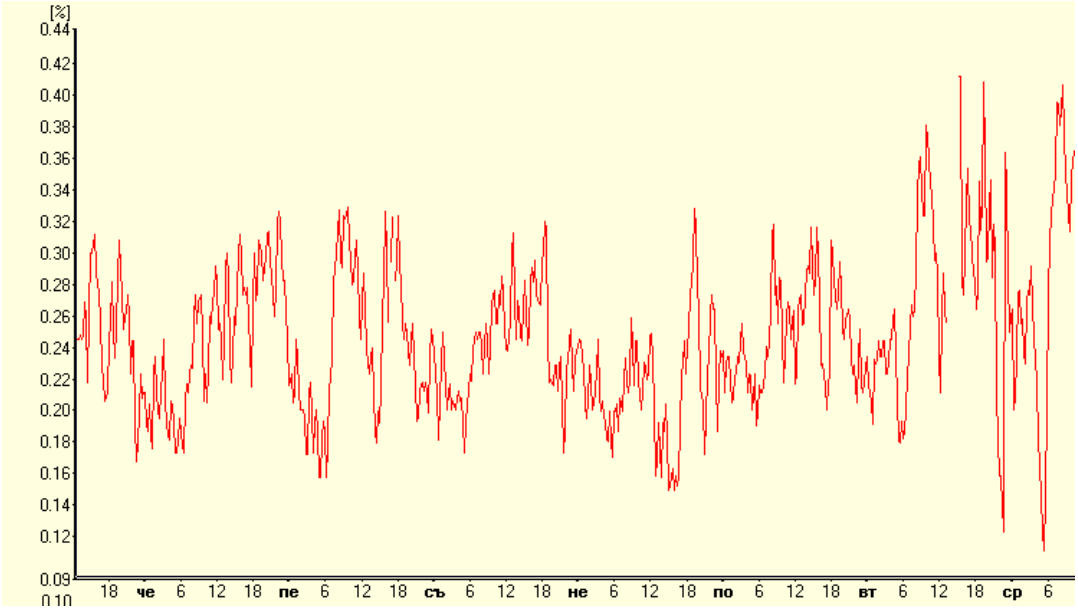


Фиг.3. Хистограми на напреженията.

При нормални условия на работа за всеки период от една седмица 95% от измерените стойности на захранващото напрежение трябва да бъдат в границите на $\pm 10\% U_H$, в случая между 18 и 22 kV. Вижда, че само в 0,2% за първото линейно напрежение, в 0,3% за второто линейно напрежение и в 0,9% за третото линейно напрежение, измерените стойности са извън допустимия диапазон. Следователно, стойностите на линейните напрежения в повече от 95% от периода на измерване са в допустимия диапазон, регламентиран в БДС EN 50160.
От фиг.4 може да се проследи по дни големината на напрежението и времето на прекъсванията на захранващото напрежение.



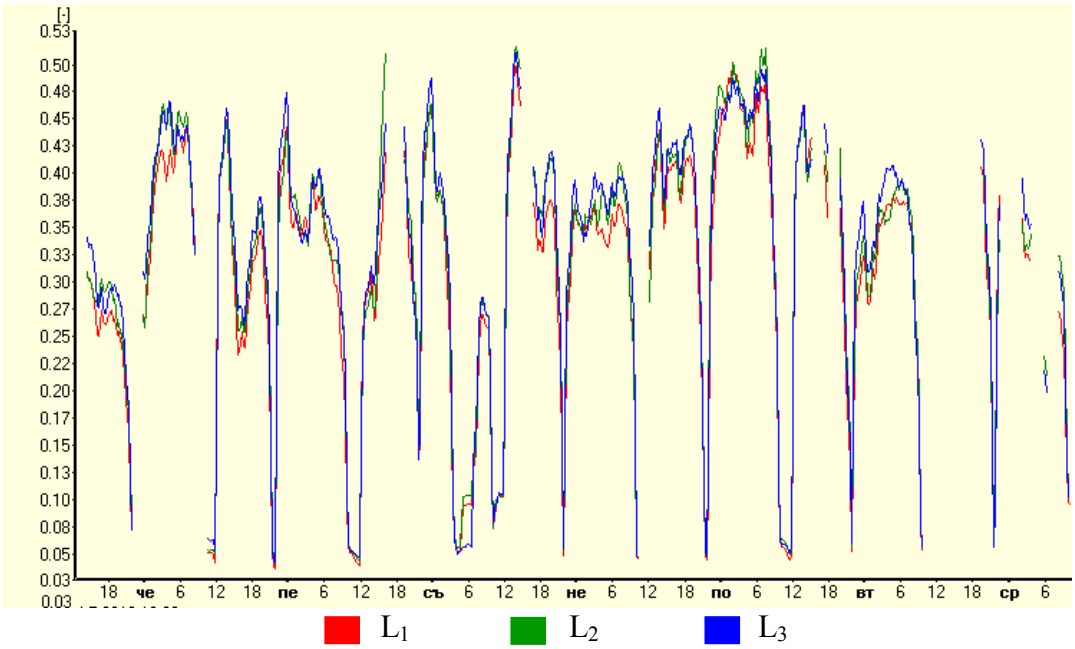
Фиг.4. Изменение на напрежението по дни.



Фиг.5. Несиметрия на напрежението.

На фиг.5 е показана несиметрията на напрежението. Максималната измерена стойност на несиметрията на напрежението е 0,33%. Следователно, в 100% от времето на измерване, несиметрията на напрежението е много под допустимата норма от 2%.

Краткотрайните изменения на напрежението се оценяват по стойността на фликера и неговата строгост за дълъг интервал от време P_{lt}. На фиг.6 е показано изменението на фликера за периода на измерване, а в табл.2 са дадени минималната и максималната му стойност за отделните фази. Следователно 100% от измерените стойности на фликера са под допустимата норма от 1.



Фиг.6. Фликер.

Таблица 2

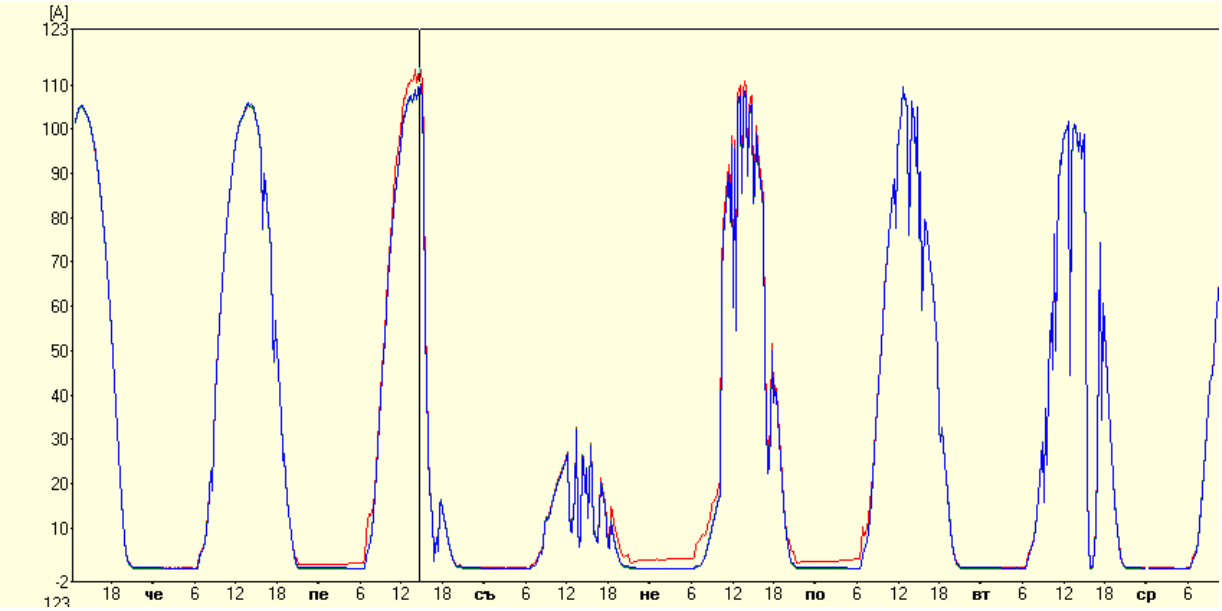
Величина	Фаза	Стойност	
		минимална	максимална
P_{lt}	L_1	0,04	0,46
	L_2	0,04	0,48
	L_3	0,04	0,47

Таблица 3

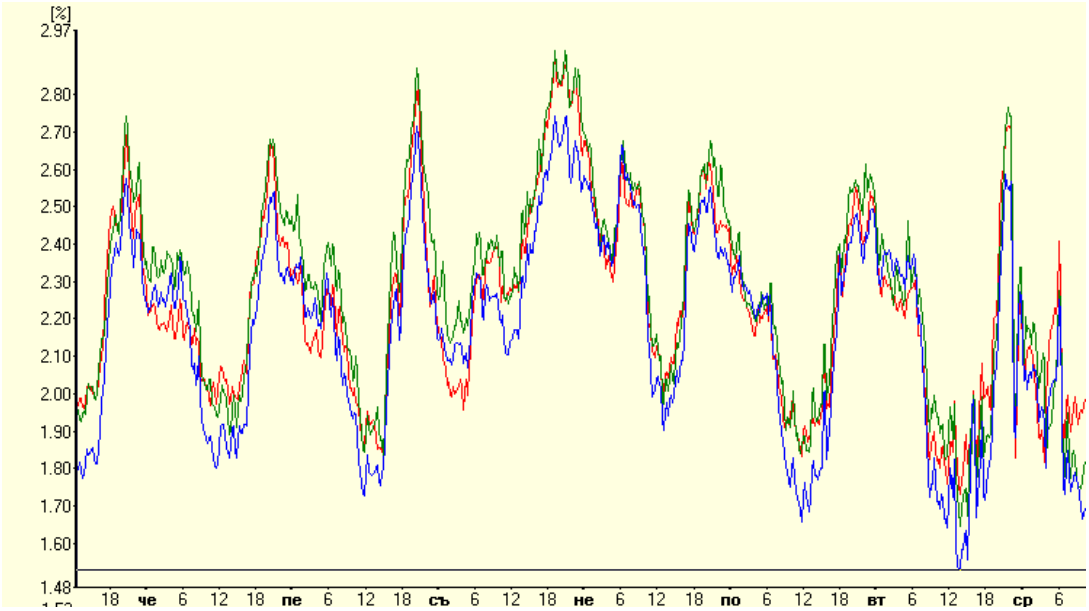
Величина	Фаза	Стойност	
		средна	максимална
I, A	L_1	46,63	120,3
	L_2	46,06	116,3
	L_3	46,19	116,9

В табл.3 са дадени средната и максималната стойност на тока за отделните фази, а на фиг.7 е показано изменението на ефективните стойности на фазните токове за периода на измерване. Вижда се, че натоварването на централата се осъществява в светлата част на денонощието и е най-изразена в обедните часове. Максималните измерени стойности на тока са съответно 120,3 А за фаза L_1, 116,3 А за фаза L_2 и 116,9 А за фаза L_3. Наблюдава се несиметрично токово натоварване на отделните фази. Фаза L_1 е с 3% по-натоварена от фази L_2 и L_3.

На фиг.8 е показано общото хармонично изкривяване на напрежението, а в табл.4 минималните и максималните стойности. Максималните стойности на общото хармонично изкривяване на линейните напрежения (за L_{12} е 2,69%, за L_{23} е 2,73% и за L_{13} е 2,58%) в 100% от случаите не превишават определената в [1, 3, 4] допустима стойност от 8%.



Фиг.7. Стойности на фазните токове.



Фиг.8. Общо хармонично изкривяване на напрежението.

Таблица 4

Величина	Фаза	Стойност	
		минимална	максимална
THD_U, %	L_1	1,72	2,69
	L_2	1,61	2,73
	L_3	1,51	2,58

В табл.5 и табл.6 са дадени максималните измерени стойности на хармониците на линейното напрежение. Наблюдават се нечетни хармоници от 3 до 25 хармоник. Всички те са много по-ниски от допустимите норми дадени в [1, 4]. От тях най-голямо е съдържанието на 5 и 7 хармоник със стойности съответно от 1,9%, при норма от 6,0% и 2,05% при норма 5% за мрежи средно напрежение. Наблюдават се четни хармоници, като всички измерени стойности са много под допустимите норми, дадени в [4].

Таблица 5.

Нечетни хармоници на напрежението

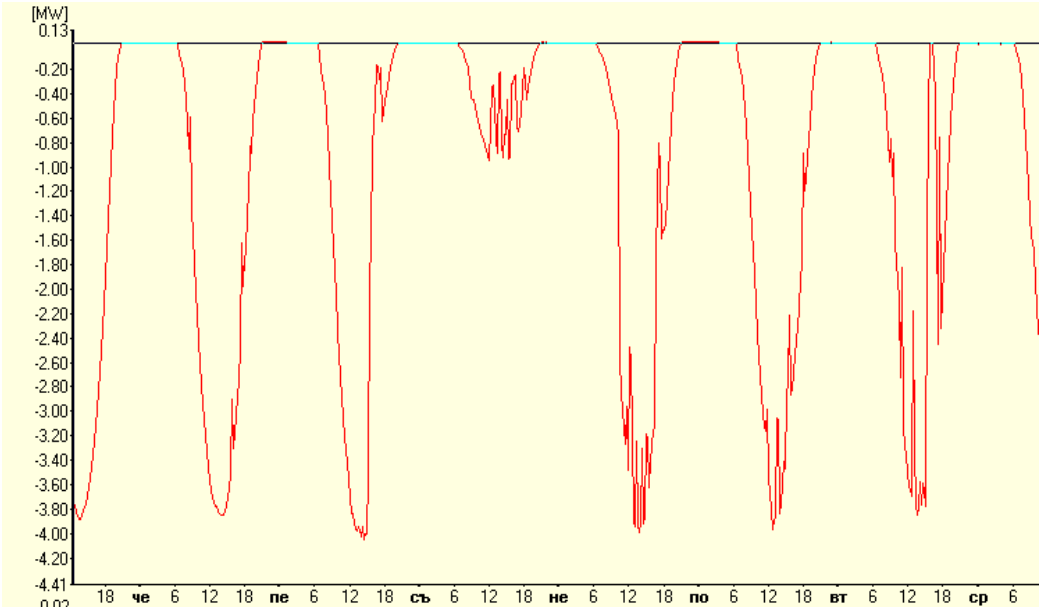
Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_{12}	L_{23}	L_{13}
3	5,0	0,50	0,65	0,25
5	6,0	1,90	1,80	1,70
7	5,0	2,00	2,00	2,05
9	1,5	0,10	0,15	0,15
11	3,5	0,40	0,40	0,45
13	3,0	0,55	0,50	0,50
15	0,3	0,10	0,15	0,05
17	2,0	0,15	0,20	0,15
19	1,5	0,15	0,15	0,10
21	0,2	0,05	0,05	0,05
23	1,5	0,05	0,10	0,05
25	1,5	0,05	0,10	0,05

Таблица 6.

Четни хармоници на напрежението

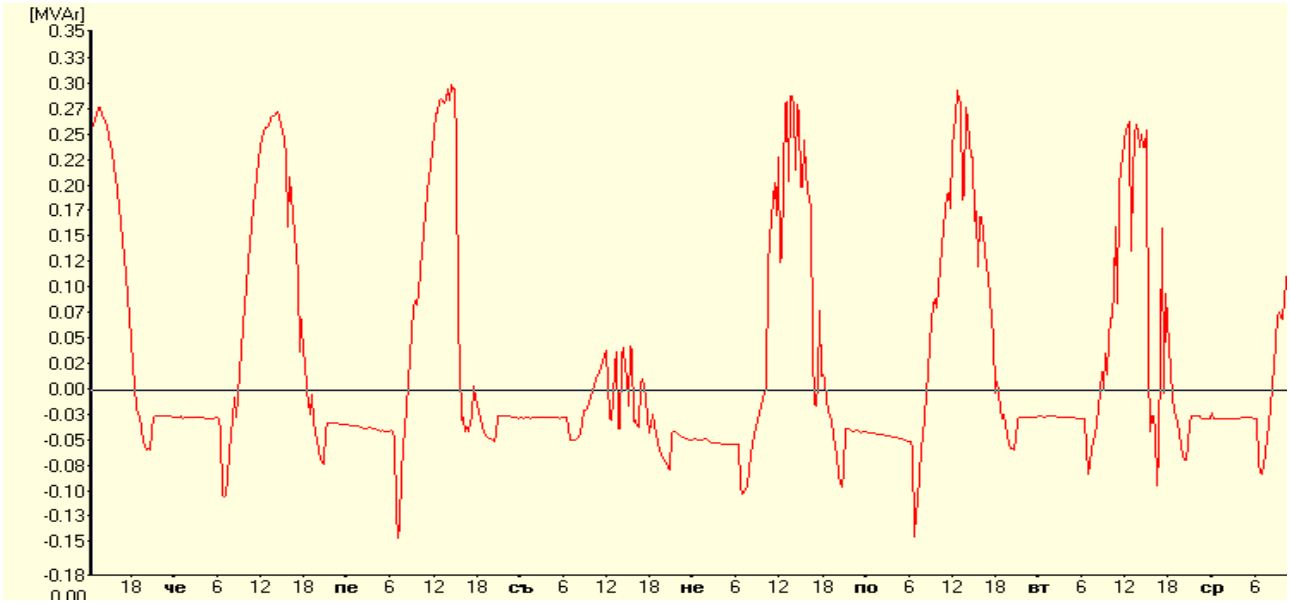
Хармоник	Допустима стойност по БДС EN 50160, %	Максимална измерена стойност, %		
		L_{12}	L_{23}	L_{13}
2	2,0	0,10	0,15	0,10
4	1,0	0,10	0,10	0,10
6	0,5	0,05	0,10	0,05
8	0,5	0,10	0,05	0,15
10	0,5	0,10	0,10	0,15
12	0,2	0,05	0,05	0,05
14	0,2	0,10	0,05	0,10
16	0,2	0,10	0,05	0,10
18	0,2	0,05	0,05	0,05
20	0,2	0,05	0,10	0,05
22	0,2	0,10	0,05	0,05
24	0,2	0,05	0,05	0,05

На фиг.9 е показана графика на изменението на активната мощност на ФВЕЦ за период от една седмица. Отдадената активна мощност в мрежата е с отрицателен знак, а консумираната активна мощност е с положителен знак. Средната измерена стойност на активната мощност е -0,98 MW, а максималната стойност е -4,43 MW.



Фиг.9. Активна мощност.

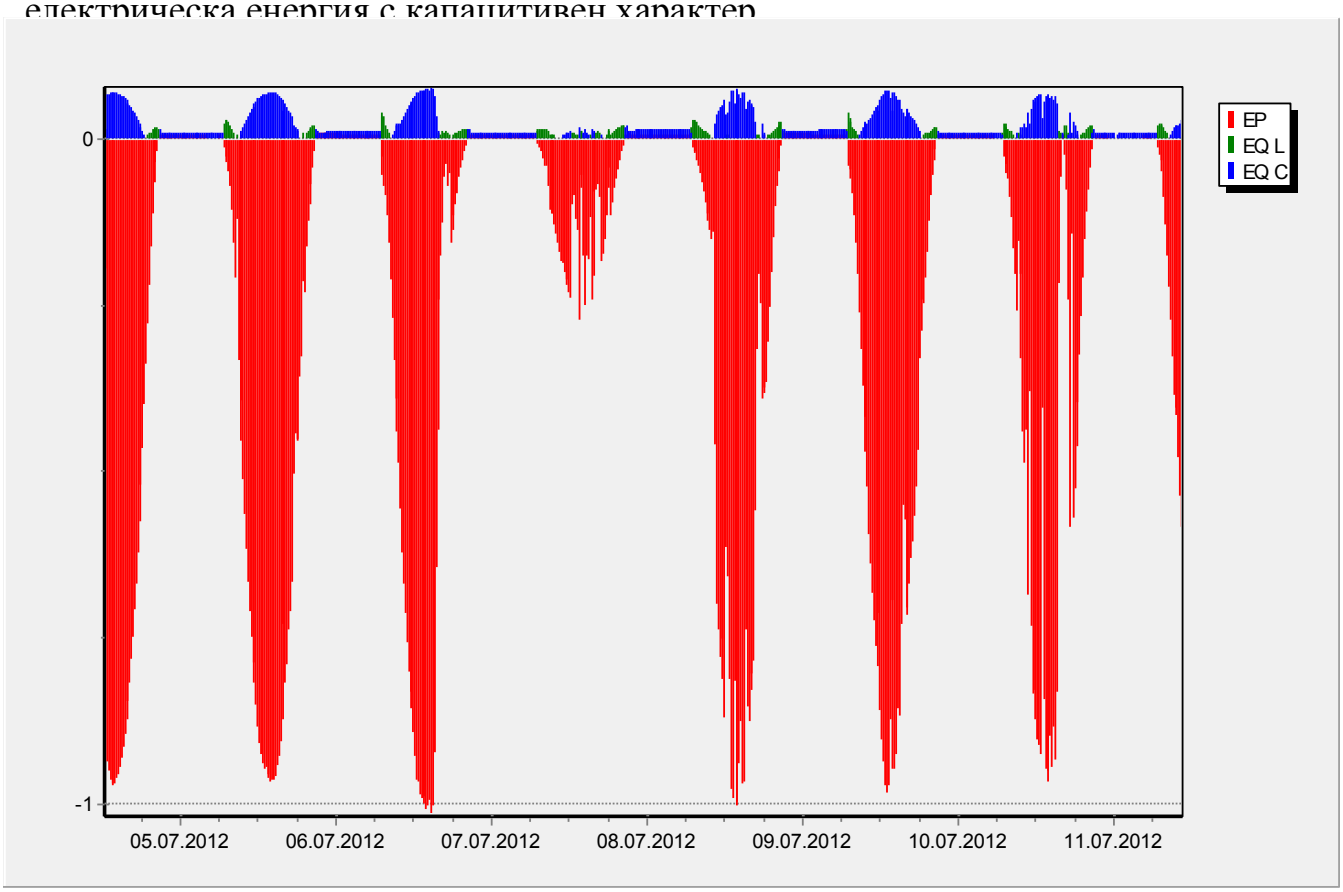
На фиг.10 е показана графика на изменението на реактивната мощност на ФВЕЦ за период от една седмица. И тук отдадената реактивна мощност в мрежата е с отрицателен знак, а консумираната реактивна мощност е с положителен знак. Средната измерена стойност на реактивната мощност е 0,02 MVAr, а максималната й стойност е 0,34 MVAr.



Фиг.10. Реактивна мощност.

На фиг.11 е показана графика на електрическата енергия.

Използвани са следните означения: EP – активна електрическа енергия, EQ L – реактивна електрическа енергия с индуктивен характер,и EQ C - реактивна електрическа енергия с капацитивен характер.



Фиг.11. Видове електрическа енергия.

На фиг.12 е визуализиран електромер, на който се вижда произведената и консумирана от ФВЕЦ електрическа енергия.

Фиг.12. Показания на електромер.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените измервания и анализ може да се направи извода, че електрическата енергия с така измерените показатели за качество отговаря на нормите дадени в БДС EN 50160 и няма неблагоприятно влияние на нормалната работа на консуматорите захранвани с нея.

В заключение може да се каже, че както производителя, доставчика така и консуматора взаимодействайки си носят отговорност за качеството на електрическата енергия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 50160 ***Характеристика на напрежението на електрическата енергия доставяна от обществените разпределителни електрически системи***, 2010.

[2] БДС IEC 61000-3-4 ***Електромагнитна съвместимост. Част 3-4 Граници – ограничаване на емисиите на хармоничните токове в слаботокови системи, захранване на оборудване, с номинален ток над 16А***, 1998.

[3] ДКЕВР, ***Показатели за качество на електроснабдяване на ДКЕВР*****,** юли, 2004.

[4] Цанев Ц., С. Цветкова, ***Качество на електрическата енергия***, Авангард Прима, София, 2011.

[5] Цанев Ц., С. Цветкова, В. Цветкова, ***Определяне на контролните точки за монтаж на апаратура за измерване на качеството на електрическата енергия***, Енергиен форум 2008, Варна, 11-14 юни 2008, стр. 321-329**.**

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**, ас., инж. маг., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *apetl@tu-sofia.bg*.

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент:** доц. д-р Николай Матанов

ДОБРИ ПРАКТИКИ ЗА ПРИЛАГАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЦИ В ЖИЛИЩНИ И ОБЩИНСКИ СГРАДИ

Борислав Бойчев, Ангел Пачаманов

Резюме: *През последните години в света се прилагат много програми за стимулиране използването на покривни и фасадни фотоволтаични системи в жилищни и общински сгради. Ефектът от въвеждането им се разглежда от няколко страни: а) социален – подпомагане на най-бедните слоеве на обществото (вместо да се раздават енергийни помощи се инвестира в устройства, които намаляват сметката за ток); б) създаване на нови работни места за групи от населението, които се пенсионират сравнително млади (военни, полиция и др.); в) намаляване на емисиите на парникови газове и разнообразяване на енергийните доставки (без въглища, петрол и природен газ).*
Ключови думи: *оптимизационни модели за управление, малки покривни фотоволтаични централи*

GOOD PRACTICES FOR THE APPLICATION OF PHOTOVOLTAICS IN HOUSING AND MUNICIPAL BUILDINGS

Borislav Boychev, Angel Pachamanov

Abstract: *In recent years, many programs have been implemented in the world to stimulate the use of roof and facade photovoltaic systems in households and municipal buildings. The effect of introducing them is seen by several countries: (a) social - helping the poorest sections of society (instead of distributing energy aid investing in devices that reduce the current bill); b) creating new jobs for groups of the population who retire relatively young (military, police, etc.); (c) reduction of greenhouse gas emissions and diversification of energy supply (excluding coal, oil and natural gas)*
Keywords: *optimization models for activity management, small roof photovoltaic power plants*

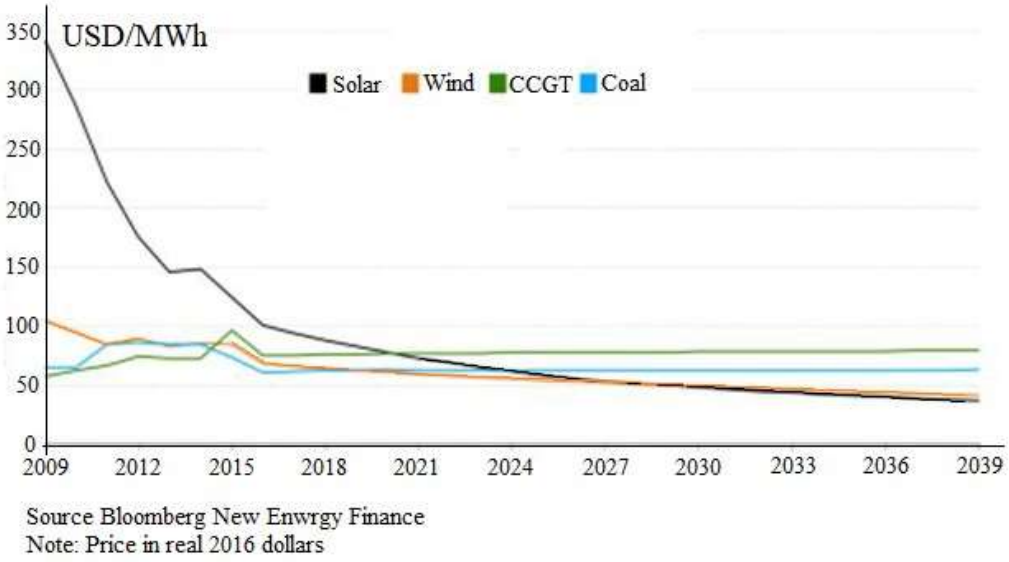
I. ВЪВЕДЕНИЕ

Възобновяемите източници на енергия (ВЕИ) - слънчева енергия (топлинна, фотоволтаична и концентрирана), вятърна енергия, хидроелектрическа енергия и енергията от биомаса, са от съществено значение за развитие на световната икономика и алтернативи на горивата, които се добиват от недрата на Земята. Разработването, внедряването и употребата на електроенергия от ВЕИ намалява емисиите на парникови газове, разнообразява енергийните доставки и намалява

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

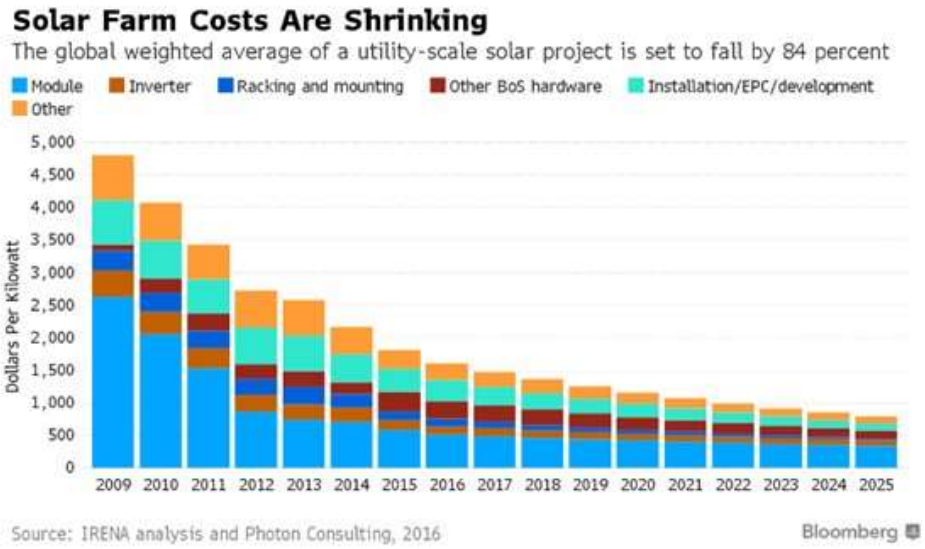
ISSN 1311-0829

зависимостта на всяка икономика от ненадеждни и летливи изкопаеми горива (петрол и природен газ). Ръстът на възобновяемите енергийни източници стимулира заетостта в Европа и в България, създава нови технологии и подобрява търговския баланс на всяка една държава членка на ЕС



Фиг.1. Прогнозни цени на различните видове горива.

Електрическата енергия, произвеждана от фотоволтаични централи става все по-евтина, а в средносрочен план себестойността ще падне под тази на въглищните централи. През 2016 г. в Чили и Саудитска Арабия соларните централи достигнаха цена за 1 kWh под 3 цента. За осемте години след 2009 г. цената на 1 kWh електроенергия, произведена от слънчеви панели е спаднала със 62%. Очаква се до 2025 г. тя да падне под цената на досегашния лидер по най-евтина енергия – въглищата.[3] [4]



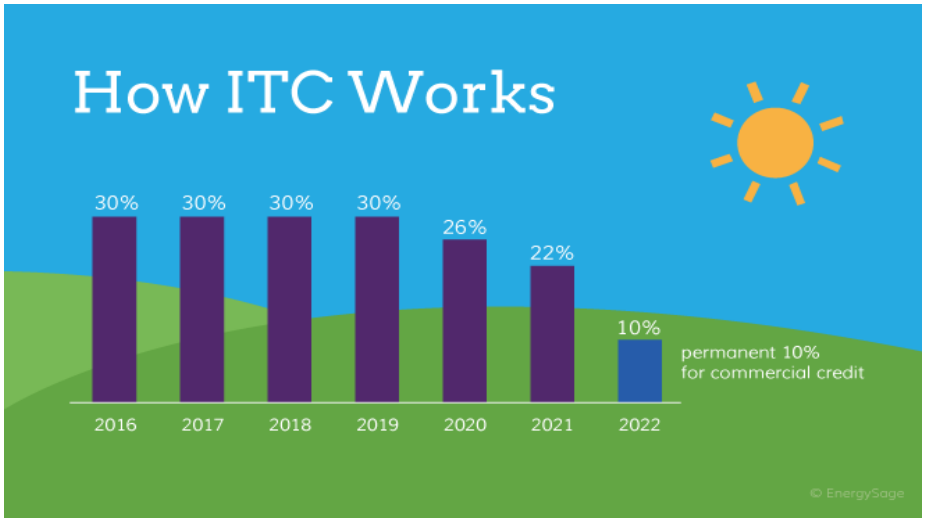
Фиг.2. Цена на отделните компоненти на ФВЦ.

В Директива 2009/28/ЕО на Европейския парламент от 23 април 2009 г., относно насърчаването на използването на енергия от възобновяеми източници, се поставят амбициозни цели за всички държави членки, според които ЕС ще достигне 20% дял на енергията от възобновяеми източници до 2020 г.

II. СЪЩИНСКА ЧАСТ

II.1. Практики в САЩ

Въведени са стимули за собствениците на жилищни и бизнес сгради. Въведен е инвестиционен данъчен кредит за слънчева енергия. Федералното правителство предоставя кредит за данъчно облагане на слънчевата енергия, наречен инвестиционен данъчен кредит (ITC), който позволява на собствениците и бизнеса да приспадат част от разходите си за слънчева енергия от своите данъци. Както собствениците на жилища, така и фирмите могат да кандидатстват за федерален данъчен кредит, равняващ се на 30% от стойността на тяхната система от слънчеви панели без горна граница за инвестицията.



Фиг.3. Редуциране на размера на данъчния кредит [3].

Как работи слънчевия данъчен кредит?

Собствениците на фотоволтаична система, имат право на кредит за данъчни облекчения за производството на слънчева енергия. Дори при невъзможност за покриване на целия кредит в рамките на една година, може да се "прехвърлят" останалите кредити в бъдещи години, докато данъчният кредит е в сила. Това не се отнася за фотоволтаична система на лизинг или PPA (споразумение за покупка на електрическа енергия) с инсталатор на слънчева енергия, защото тогава производителят не е собственик на системата и по този начин не може да получи данъчния кредит.

2016 - 2019: Данъчният кредит остава на 30% от стойността на системата;

2020: Собствениците на нови фотоволтаични системи върху жилищни и бизнес сгради могат да приспадат 26% от стойността на системата от своите данъци;

2021: Собствениците на нови фотоволтаични системи върху жилищни и бизнес сгради могат да приспадат 22% от стойността на системата от своите данъци;
2022 г. нататък: Собствениците на нови фотоволтаични системи върху бизнес сгради могат да приспадат 10% от стойността на системата от своите данъци. Няма федерален кредит за фотоволтаични системи върху жилищни сгради.

Съветът на надзорните органи на Сан Франциско единодушно е приел нов регламент, който ще изисква всички сгради ново строителство, които са по-ниски ат 10 етажа, да инсталират слънчеви панели или слънчеви бойлери на покривите си. Изискването обхваща и новите жилищни, и новите търговси сгради. Според законодателството в Калифорния, всички нови сгради под 10 етажа трябва да определят най-малко 15% ат покривите си за соларни системи – тоест, да не са на сянка. Сега Сан Франциско вече изисква тези сгради реално да използват тази площ за слънчеви панели. Новият регламент прави Сан Франциско първия град в САЩ, който въвежда задължение за вграждане на слънчеви панели при ново строителство.

II.2. Практики в Китай

Китай намалява цената на съоръжения, които генерират слънчева енергия и я отдават към ЕЕС в страната. Решението на правителството отговаря на спада в разходите за строителство, цената на регулаторите и промени при икономическото планиране. Страната ще намали цените, плащани за ФЕЦ, с 19 на сто през 2017 година. Промените ще помогнат за намаляване на субсидиите, отпускани за нови фотоволтаични и вятърни проекти, ат около 6 милиарда юана годишно (863 милиона долара/година). Понижението е резултат на по-ниски цени на офертите, които соларни разработчици предлагат, за да се изгради проект. Китай също така ще насърчи местните власти да продължат използването на търгове за избор на разработчици на възобновяема енергия с цел достигане на все по-ниски цени на ват инсталирана мощност.

II.3. Практики в Германия

Производството на слънчева енергия в Германия се състои почти изцяло от фотоволтаици (PV) и представлява приблизително 6.2 до 6.9% от нетното производство на електроенергия в страната през 2016 г. Около 1.5 милиона фотоволтаични системи са инсталирани в цялата страна през 2014 г., като се започне от малки системи на покрива, до средни търговски и големи слънчеви паркове. Страната е сред най-големите световни инсталатори за фотоволтаици в продължение на няколко години, с обща инсталирана мощност 41,3 гигавата (GW) до края на 2016 г.

Считано от 2012 г. тарифите за пренос (FiT) струват около 14 млрд ЕВРО годишно за вятърни и слънчеви инсталации. Цената е разпределена между всички платци на тарифите с допълнителна такса от 3,6 €/kWh (приблизително 15% от общата цена на електроенергията на вътрешния пазар). От друга страна, тъй като скъпите върхови електроцентрали са изместени, цената на електроенергийния обмен се намалява.

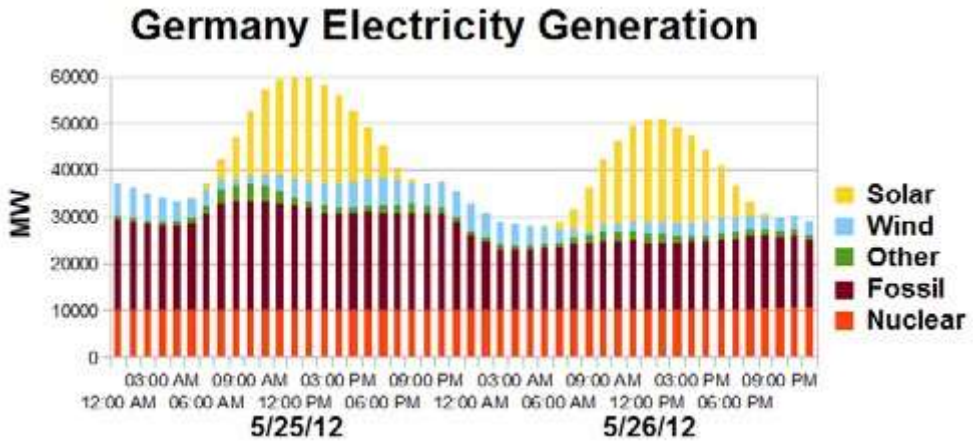
Германия направи световен рекорд за производство на слънчева енергия от 25,8 GW, произведен на обяд на 20 април и 21 април 2015 г.

В Германия е възприета преференциална тарифа като най-ефективното средство за разработване на слънчева енергия. Това е същото като договор за изкупуване на електрическа енергия, но е с много по-висока стойност. Тъй като производството се развива, тя се намалява и става същата като договор за закупуване на електроенергия.

А преференциалната тарифа позволява на инвеститорите гарантирана възвръщаемост на инвестицията.

Основната разлика между данъчен кредит и преференциална тарифа е, че разходите се поемат през годината на инсталацията с данъчен кредит, а с преференциалната тарифа се разпределят в продължение на много години. И в двата случая разходите за стимулиране се разпределят между всички потребители.

От края на периода на бум на пазара, националният пазар на фотоволтаични централи оттогава значително намаля поради промените в Закона за възобновяемите енергийни източници (ЗЕЕ), които намалиха преференциалните тарифи и поставиха ограничения върху големината на слънчевите централи, ограничавайки размера им до не повече от 10 kW.



Фиг.4. Генериращи източници в Германия.

II.4. Практики в Швейцария

Швейцария се отказа от ядрената енергетика през м. Май 2017 г. Според закона от потребителите ще се събират 480 милиона франка годишно, за да се финансират инвестициите във вятърна, слънчева и водна енергия, а 450 милиона франка ще дойдат от съществуващ налог за изкопаемите горива и ще бъдат използвани за повишаване на енергийната ефективност с 43 процента на сградите до 2035 година спрямо нивата от 2000 година.

Около 38000 проекта за възобновяема енергия, предимно слънчеви панели по покривите ще бъдат изградени през следващите години. Швейцарската "Енергийна стратегия 2050" предвижда четирикратното увеличение на слънчевата и вятърната енергия до 2035 година.

II.5. Практики в България

Актуализирани са преференциалните цени на електрическа енергия, съгласно решение № Ц-17 от 01.07.2017 г на КЕВР. [1] [2] [5]

Считано от 01.07.2017 г., преференциалните цени, без ДДС, за изкупуване на електрическа енергия, произведена от възобновяеми източници, са както следва:

1. Фотоволтаични електрически централи с обща инсталирана мощност до 5 kWp, включително, които се предвижда да бъдат изградени върху покривни и фасадни конструкции на присъединени към електроразпределителната мрежа сгради и върху недвижими имоти към тях в урбанизирани територии - 271,67 лв./MWh.

2. Фотоволтаични електрически централи с обща инсталирана мощност над 5 kWp до 30 kWp, включително, които се предвижда да бъдат изградени върху покривни и фасадни конструкции на присъединени към електроразпределителната мрежа сгради и върху недвижими имоти към тях в урбанизирани територии - 231,20 лв./MWh.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията се анализира добавянето на ВЕИ в електроразпределителната мрежа, от ФЕЦ, монтирани върху покривите на жилищни и бизнес сгради. Цените на произведената от ФЕЦ електрическа енергия постоянно намаляват и много скоро те ще станат по-ниски от тази произведена от въглища.

В различните държави има различни политики за стимулиране на изграждането на ФЕЦ, но се вижда, че навсякъде има плавен преход за преминаване към зелена енергия. Ясна е тенденцията за намаляване на мощността на централите и поставянето им върху покривите на жилищни и обществени сгради.

ЛИТЕРАТУРА

[1] http://seea.government.bg/documents/

[2] http://seea.government.bg/bg/dokumenti#2-закон-за-енергията-от-възобновяеми-източници

[3] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#

[4] http://www.bloomberg.com/

[5] http://www.dker.bg/files/download/res-c17-2016.pdf

Решение № Ц-17 от 30.06.2016 г на КЕВР

Автори: Борислав Богданов Бойчев, асистент д-р, инж., катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт" (ЕСЕОЕТ), Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *bojchev@tu-sofia.bg*; **Ангел Саракинов Пачаманов**, професор д-р инж., катедра ЕСЕОЕТ, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *pach@tu-sofia.bg*, Р-л проекти в НИС при ТУ-София (*www.onilot.com*)

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Симона Петракиева

ТЕКУЩО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОЕКТА OrbEEt: ИНСТАЛИРАНЕ НА УСТРОЙСТВА И НАБЛЮДЕНИЕ НА ЕНЕРГИЙНОТО ПОТРЕБЛЕНИЕ В ОБЩИНСКИ СГРАДИ

Дери Торес, Иван Шарланджиев, Костас Цацакис, Уилфрид Утц, Иян Дънуел, Христос Малавазос, Джералд Вагенхофер, Акрайц Гобантес, Шишуан Жан и Александър Воденичаров

Резюме: *Голяма част от цялостното енергийно потребление в ЕС произтича от сградите. Така че намаляването на техния енергиен отпечатък е изключително важна стъпка при решаването на проблема предизвикан от глобалните климатични промени. Един начин да се намали енергийното потребление в една сграда е като се използват по-ефективни устройства и строителни материали. Друг такъв, обаче, е промяна в поведението и навиците на потребителите в една сграда, който начин е и най-икономичния за постигането на тази цел. Такова е и предназначението на финансирания от програма Хоризонт 2020 проект OrbEEt (ORganizational Behaviour improvement for Energy Efficient adminisTrative public offices), където чрез промяна на поведението на обитателите на общински сгради в ЕС се цели намаляването на енергийното им потребление.*

За да постигне тази цел, OrbEEt използва комбинация от информационни и процесни модели за сградата, заедно с наблюдение в реално време на енергийното й потребление. Чрез тези способи се цели предизвикване на поведенческа промяна, водеща към повишена енергийна ефективност.

Този труд представя извършеното наблюдение над енергийното потребление в Имперския Дворец в Инсбрук, Австрия, който е един от тестовите участници в проекта. Допълнително, чрез проведена няколко-месечна оценка на цялостните експлоатационни качества на системата на OrbEEt, предоставяме предварителни резултати свързани с предизвиканите поведенчески промени при обитателите на сградата.

Ключови думи: *OrbEEt, общински сгради, енергийно потребление, поведение на обитатели, енергийна ефективност, пилотен участник*

CURRENT STATUS OF THE PROJECT OrbEEt: TOOL DEPLOYMENT AND MONITORING OF THE ENERGY CONSUMPTION IN PUBLIC BUILDINGS SERVICES

Dery Torres, Ivan Sharlandzhiev, Kostas Tsatsakis, Wilfrid Utz, Ian Dunwell, Christos Malavazos, Gerald Wagenhofer, Arkaitz Gobantes, Shixuan Zhan and Alexandar Vodenicharov

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Abstract: *Buildings account for a significant part of the EU's total energy consumption. Hence reducing their energy imprint is a matter of imminent importance when tackling the issue of climate change. Using more energy efficient devices and building materials are only some of the ways to decrease a buildings energy needs. Another such approach is changing the behaviour and habits of its occupants which is arguably the most economical way to achieving that goal. Similarly aligned is the purpose of the Horizon2020- funded project OrbEEt (ORganizational Behaviour improvement for Energy Efficient adminisTrative public offices) which aims to tackle the energy reduction of tertiary sector EU buildings by changing the users' behaviour.*
To accomplish this goal, OrbEEt utilizes a combination of Building Information and Process Models along with real-time energy consumption measurements which are aimed at triggering behavioural change towards energy efficiency. By employing various engaging user interfaces and providing personalized consumer feedback, accountability and direct impact of the people, processes and spaces can be easily tracked, analysed and steered towards a gradual reduction of energy consumption.
This work presents the monitoring of the energy consumption of the Imperial Palace placed in Innsbruck and the preliminary results linked to the behavioural changes of the final pilot users. We assess the deployment of the OrbEEt system at the pilot site in real-life conditions during several months.
Keywords: *OrbEEt, public buildings, consumption, final users' behaviour, energy efficiency, pilot site.*

1. INTRODUCTION

Most of the energy usage and consumption in public buildings, along all life-cycle stages, occurs during their operational phase accounting for 80% of overall consumption [1]. Within this percentage, at least 70% is caused by the occupants' behaviour and real-time control decisions within the context of business operations executed in the building [2]. Some common actions influencing the energy consumption of a building, either directly or indirectly, are opening/closing windows, turning on/off or dimming lights, turning on/off office equipment, turning on/off heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC) systems, and setting indoor thermal, acoustic, and visual comfort controls.

The purpose of the Horizon−2020 funded project OrbEEt (ORganizational Behaviour improvement for Energy Efficient adminisTrative public offices) is to reduce the energy consumption of tertiary sector EU buildings by changing their users' behaviour. Building Information and Process Models are actively used, along with real-time energy consumption measurements whose goal is to provide awareness to the users regarding their consumption and thus incentivize their behavior change. The innovative solutions of OrbEEt are validated in real-life conditions over a test period, in various public buildings/organizations, incorporating a wide range of administrative/ business processes and services to the general public and under different environmental, social and cultural contexts in four dispersed geographical areas (Austria, Germany, Bulgaria and Spain).

The project is currently in its deployment, baselining, and testing phase; therefore, this paper provides the framework for the progressive evaluation of the platform within the pilot roll–out phase in the form of a summary of the state of the deployment of the various OrbEEt services. Later in this work, we will outline the methodology and data results of the evaluation of the pilot operation phase across one of OrbEEt's pilot sites: The Imperial Palace – Hofburg Innsbruck, located in Innsbruck, Austria.

2. PILOT SITE: IMPERIAL PALACE IN INNSBRUCK, AUSTRIA

The building consists of 24 apartments, 10 offices and 4 public services, a Museum Café, Imperial Apartments and various banquet facilities. Because of that it has many and diverse occupants like apartment residents, office workers and museum visitors whose number exceeds 300. As the pilot infrastructure is that of an old museum and historical monument, it lacks an energy management platform for integrated and centralized monitoring and control. Its offices experience all modern typical energy loads including computers, copy machines, printers/scanners, etc. that, along with lighting, will constitute the main energy loads for the validation of the OrbEEt framework.

Since no energy performance contracting or renewable energy sources are available, it is expected that the impact of the proposed by OrbEEt framework will be significant. This publication manly focusses on the raw data sensor results on the intermediate assessment of the OrbEEt framework, hence not all final conclusions have been reached yet. Currently only some of the energy consumption of the Imperial Palace in Innsbruck has been presented along with preliminary results linked to the behavioural changes of the final pilot users.

3. EQUIPMENT INSTALLATION AND SYSTEM INTEGRATION

In order to achieve awareness and behavioral change towards enhanced energy efficiency, it is crucial that the energy consumption is measured and monitored on a real-time basis and at the level of each individual energy consumer. OrbEEt's energy measurement and monitoring system includes smart power meters, sensors for room environment conditions, system gateways, heat cost allocators and in-office displays to review the information. Also included is a technology framework responsible for collecting energy use data and pre-processing which then generates an Enhanced Operational Rating sent to the user.

Several zones have been selected to set the pilot environment in the imperial palace in Innsbruck: 3 Office Areas, a Museum Area and an Events Area. Considering the identification of building zones and the selection of the main loads in premises, various sensors and metering devices have been allocated: a total of 60 devices (sensors) were installed and connected to 9 gateways (see figure 1) which send collected data to the cloud. The overall performance of the equipment was tested and deemed satisfactory:

- *Raspberry Pi* (figure 1d)**:** 9 "Raspberry Pi" Gateways were installed on the pilot

premises.

- *Multi-Sensors* (figure 1b): 20 Multi sensors(measuring light, humidity and temperature) were installed as follows: Office Areas -11, Museum Area - 8; Events Area– 1. At the beginning the Multi Sensors were powered on batteries but due to prolonged down-periods because of battery discharge, the power supply was changed to a constant connection to the grid via cable. Since then, performance has been satisfactory.
- *Smart Plugs* (figure 1a)**:** 21 were installed (all in the Office areas) and have registered a very adequate performance.
- *Clamp meters* (figure 1c): A total of 19, intended for 36 consumers (individual / rooms). 5 of them were installed in the office areas, 10 – in the museum and 4 in the event areas. As in the other cases, their overall performance has been very reliable.

a) **b)** **c)** **d)**

Figure 1. *Deployed equipment in the pilot site, a) smart plugs, b), c) multi sensors and d) raspberry pi.*

All those monitoring tools have been carefully configured, installed, calibrated and tested in the pilot site premises in order to have a trusted baseline to ensure that the pilot is ready for validation phase. The cloud core software components are linked to the previously hardware installations at the pilot sites to test their interoperability and communication so as to verify that the technical system is ready for deployment in real–life conditions.

Worthy to note is that there have been little to none registered problems with installed devices. Nonetheless, in order to extract meaningful information from the data col-

lected, post-processing should be carried out through the utilization of a specially designed Information Management Layer (IML). The interpretation of the obtained data is not always as straightforward as it could be assumed. However, due to the complex and rigorous methodology developed in OrbEEt, large part of the data obtained can be put in into context and hence better analyzed.

4. PRELIMINARY RESULTS

The OrbEEt platform provides high-granularity analysis of sensor data, allowing behaviours to be identified. As an illustration for Innsbruck pilot site, we can begin by taking a look at the site-level power consumption.

The following figure 2 shows the means of raw sensor outputs for the pilot site placed in Innsbruck, in the y–axis we present the relevant categories such as: Current [A], Energy [kWh], Relative humidity [%], luminance [Lux], Power [W], Temperature [ºC] and Voltage [V]). On the x–axis we plot the weeks since the start of the trial (01-Jan). We can observe the various sensors coming online by week 14 (mid-April), since before that time, there was an extensive period of deployment, verification and tune-up activities.

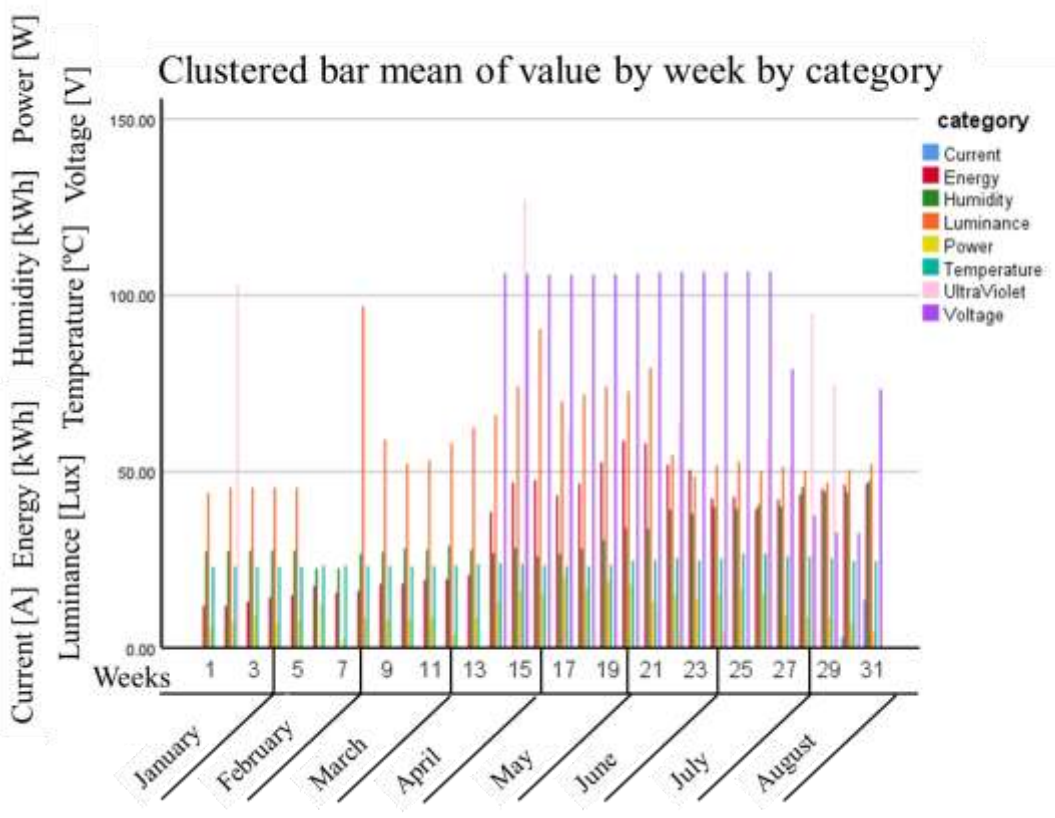


Figure 2. *Filtered means of raw sensor outpouts for the pilot site placed in Innsbruck*

Some initial conclusions can already be derived from the graph presented figure 2.

- There appears to be a drop in average energy consumption as measured between week 15 (April) to week 23 (June) and week 23 to week 31 (August).
- Luminance drops, so one (very tentative) explanation could be better behaviour

related to lighting.

- Temperature remains constant and in comfort levels.
- Humidity increases, which is likely due to seasonal change, it does shift towards an accepted comfort ideal of 50-60% though.

It is important to note though that the data so far is not yet significant for the formation of conclusive results.

Figure 3 represents data (3.9 million points across all sensors), filtered to provide information on power consumption. To further aid the analysis, this is split between working hours (defined as 08:00-18:00 Monday to Friday and in the color red); and non–working hours (marked in blue). The majority of consumption is clearly visible as occurring during working hours (red), as would be expected. We can break this down further by device type as is shown in Figure 4 which represents the total power consumption of the entire batch of monitored PC at the pilot site.

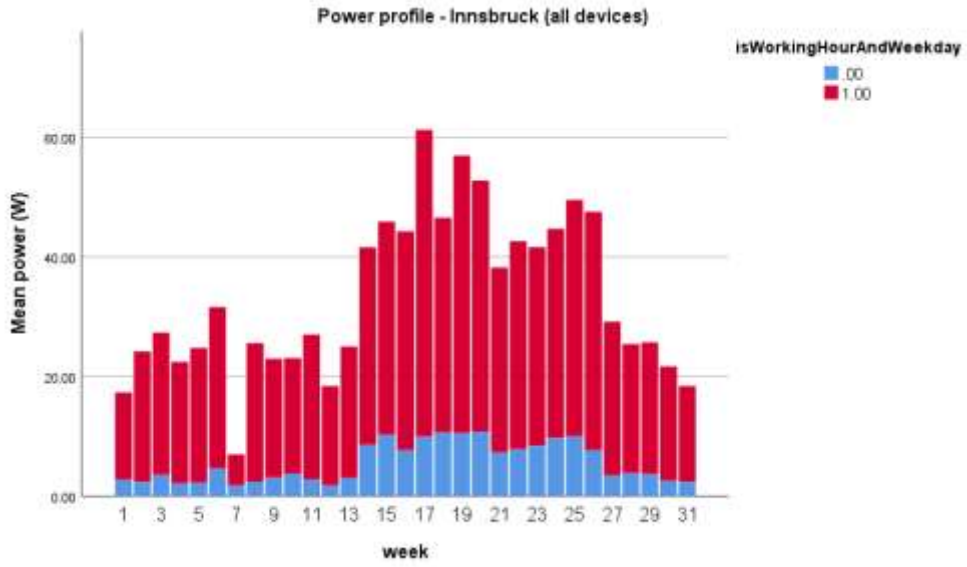


Figure 3. *Filtered power consumption for all devices of the pilot site*

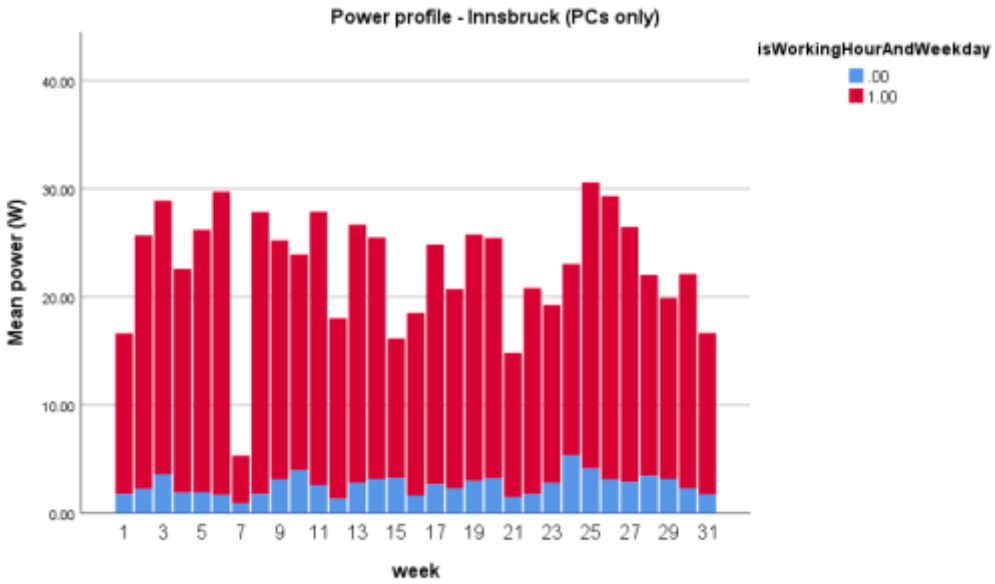


Figure 4. *Filtered power consumption for all of the PCs at the pilot site*

By looking at these single profiles, we can begin to identify both problematic and success areas, as well as uncover critical points, develop timelines and deduce context. Steady decrease in energy consumption of PCs can be seen in the months of July and August (weeks 25 onward) in figure 4. This coincides with the traditionally lower building occupancy occurring during summer months and the activation of behavioural triggers in the OrbEEt framework deployed at the site.

Additional example for the capabilities of the framework to process and present data on various granularity levels can be seen in figure 5, where visual comfort is presented. There one can deduce that (i) Innsbruck is routinely below the recommended comfort levels for office spaces (~250 Lux); and (ii) There is a marked drop in luminosity mid-intervention. This suggests improved behaviour switching lights / lamps off outside office hours, reflected also in a trend to use lower energy (Fig. 2).

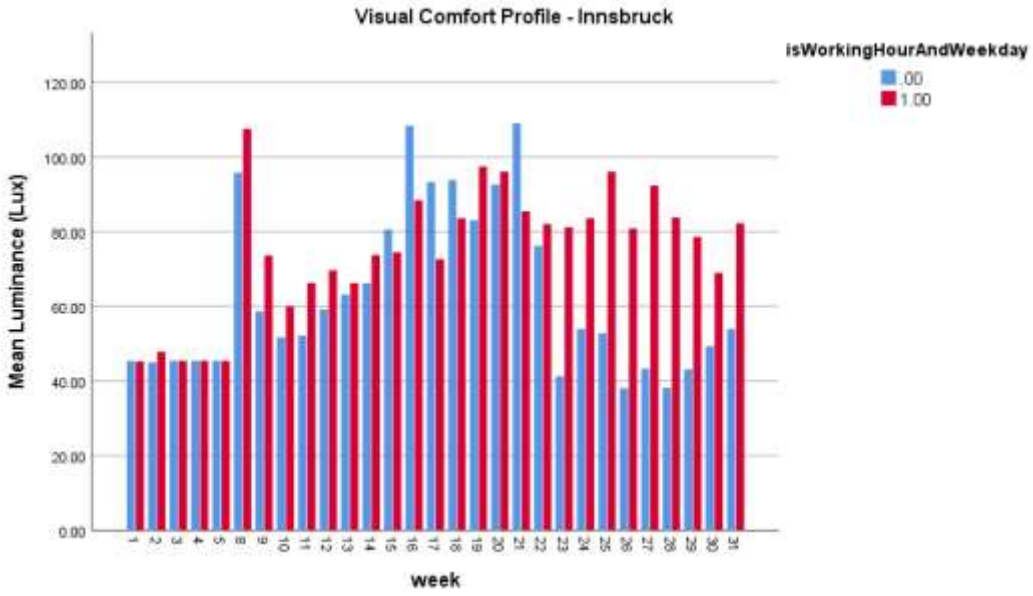
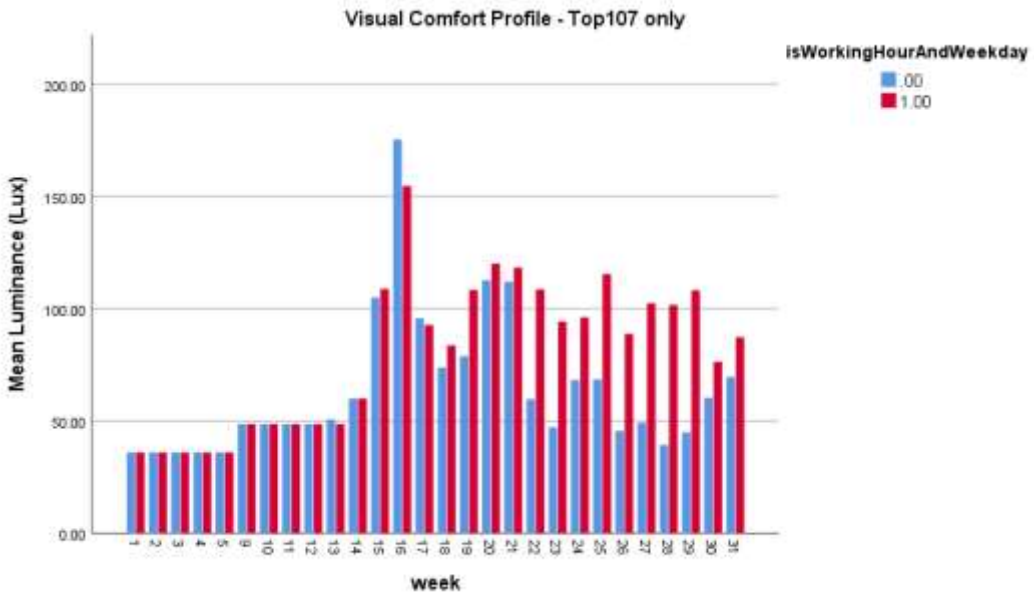


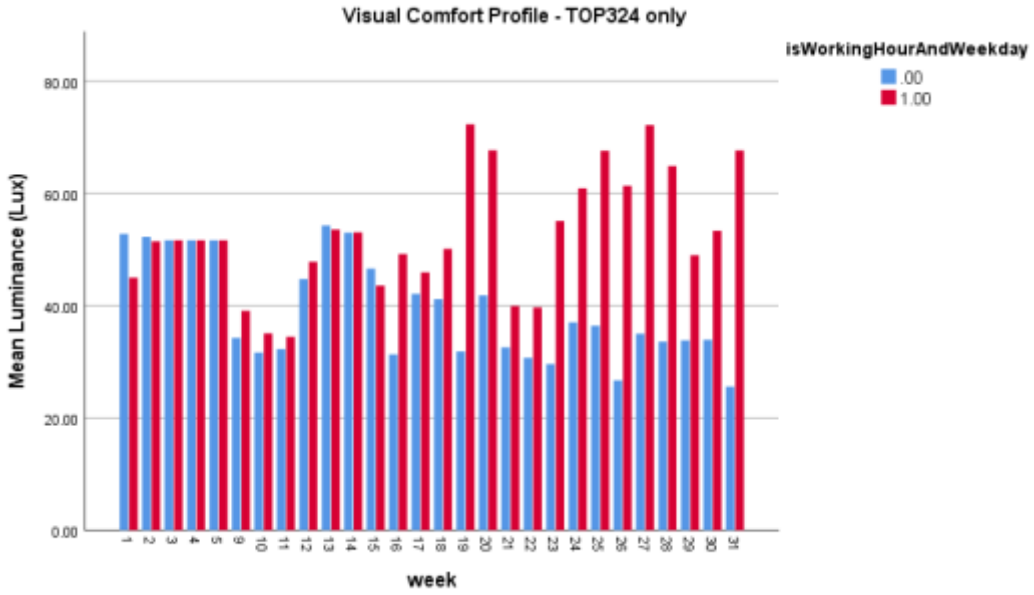
Figure 5. *Filtered mean luminance for the whole pilot site*

We can further break this down to look at specific spaces. In figure 6 multi-sensor marked as 'Top107' is isolated, and can be compared to 'Top324' which is located in different room.

Discarding data until month 15 which is invalid due to setting up procedures and fine-tuning, we can see that there have been some marked variations in the luminance, especially when compared to the visual comfort profile of the whole building (figure 5).



a)



b)

Figure 6. *Filtered mean luminance for a) top 107 room and b) top 324 room*

Figure 6 shows that luminance conditions in both rooms differ on average of about 20 Lux which is a non-trivial amount when visual comfort is being considered.

Using OrbEEt's system framework, it's possible to drill down still further into what caused various disturbances. An example for the power consumption for room "Top 324" during week 18 is shown below in figure 7.

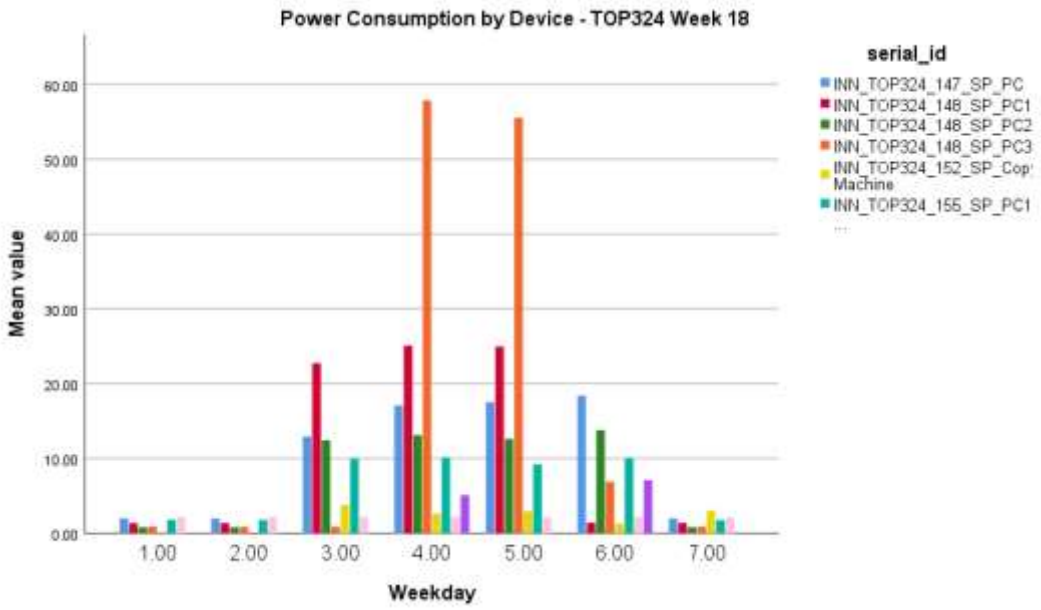


Figure 7. *Filtered power consumption by device for the top 324 room (week 18)*

It is obvious that one device is causing huge spike of electricity consumption. The data can be further granulated, as shown in figure 8, isolating it to a PC. There it can be observed that the spikes in consumption occurred during working. After base lining, the obtained profile suggests that machines in the current office are routinely not in use thus no 'bad' behavior has been registered (just a lower baseline).

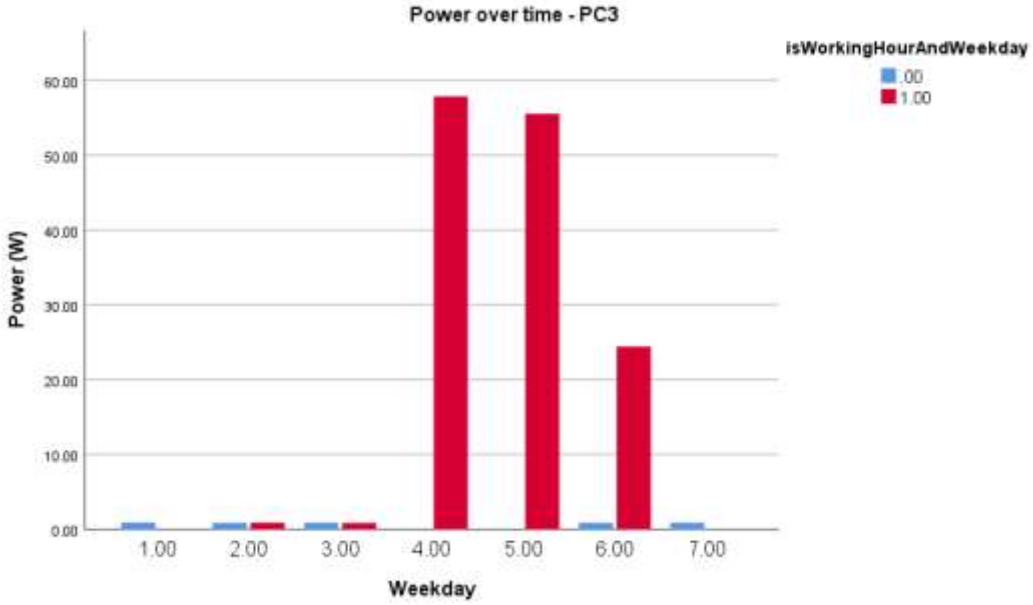


Figure 8. *Filtered power consumption for the PC3*

5. CONCLUSION

This work has presented the main goals of the project OrbEEt along with some preliminary data obtained from monitoring of the energy consumption and other parameters at the pilot site of the project in the Imperial palace in Innsbruck, Austria. Some analyses have already provided results linked to the behavioural changes of the final pilot users. Nonetheless, the project still has several months to undergo testing in the pilot sites. The additional data obtained through that time will be crucial for the greater understanding of the impact the project has had on the behaviour of the users.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thanks to the European Community Horizon 2020 programme for Research and Technological Development (2014-2020) within the funding line H220-EU.3.3.1. Reducing energy consumption and carbon footpoint by smart and sustainable use, Contract Nº 649753-OrbEEt-H2020-EE-2014-2015/H2020-EE-2014-2-RIA

REFERENCES

[1] M V. R. Kamat, C. C. Menassa and S. Lee. (2013), ***On-line simulation of building energy processes: Need and research requirements.*** Winter Simulations Conference (WSC)*, Washington, DC, 2013,* pp. 3008-3017

[2] Elham Delzendeh and Song Wu and Angela Lee and Ying Zhou (2017)***, The impact of occupant's behaviours on building energy analysis: A research review, Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 2017, pp. 1061-1071

Authors: Dery Torres, Project Manager, Solintel M&P, E-mail address: *dery.torres@solintel.eu*; **Ivan Sharlandzhiev,** International Projects, Balkanika Energy PLC., E-mail address: *ivan.sharlandzhiev@balkanikaenergy.eu*; **Kostas Tsatsakis**, Project Manager, Hypertech Information Technology, E-mail address: *k.tsatsakis@hypertech.gr*; **Wilfrid Utz**, Senior Researcher and Project Manager, BOC Asset Management GmbH Innovation Group, E-mail address: *Wilfrid.Utz@boc-eu.com*; **Ian Dunwell**, Research Fellow, BSc MSc PhD, Serious Games Institute, Coventry University, E-mail address: *IDunwell@cad.coventry.ac.uk*; **Christos Malavazos**, Chief Technology Officer, Grindrop, E-mail address: *c.malavazos@grindrop.co.uk*; **Gerald Wagenhofer**, Managing Director, UBW Unternehmensberatung Wagenhofer GmbH., E-mail address: *Wagenhofer.Gerald@burghauptmannschaft.at*; **Arkaitz Gobantes**, Project Manager., Asparrena Municipality, E-mail address: *arkaitz@kromletx.com*; **Shixuan Zhan**, Researcher, катедра Interdisciplinary Centre for Health Technology Assessment (HTA) and Public Health (IZPH), Friedrich-Alexander University of Erlangen-Nürnberg, E-mail address: *Shixuan.Zhang@uk-erlangen.de*; **Alexandar Vodenicharov**, Director, ISE Industries, E-mail address: *alexvoden@gmail.com*

Received 15 December 2017 **Reviewer:** Assoc. Prof. PhD Svetlana Tzvetkova

РАЗРАБОТВАНЕ НА МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ЕКСПЛОАТАЦИЯ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ НА ВЪТРЕШНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ

Захари Иванов, Борислав Бойчев

Резюме: *В работата е предложен начин за изчисляване стойността на експлоатационния коефициент при проектиране на вътрешно осветление със светлодиоди и други източници на светлина. Направени са сравнения между стойностите на коефициентите на експлоатация съгласно методиката и определени от DIALux. Предложени са мероприятия за подобряване ефективността на експлоатационната поддръжка.*
Ключови думи: *коефициент на експлоатация, вътрешни осветителни уредби, осветителни уредби.*

DETERMINATION OF MAINTENANCE FACTORS IN DESIGN INTERIOR LIGHTING INSTALLATIONS

Zahari Ivanov, Borislav Bojchev

Abstract: *The work proposes a way to calculate the value of the maintenance factor for designing interior lighting with light-emitting diodes and other light sources. A comparison is made between the values of maintenance factor to the methodology and determined by DIALux. Measures are proposed to improve the efficiency of maintenance.*
Keywords: *maintenance factors; indoor lighting systems; lighting installation.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Осветеността във вътрешните осветителни уредби с течение на времето намалява поради: а) намаляване на светлинния поток на лампите; б) изгаряне на лампите; в) замърсяване на осветителите; г) замърсяване на повърхностите в помещенията.

При проектиране на осветлението, един от критериите, е минималната стойност на средната осветеност на работната повърхност по време на експлоатацията *Еексп.* –експлоатационна осветеност (*Ēm* - maintained illuminance). Тя не трябва да бъде по-малка от нормената осветеност *Ен*. Следователно, във всеки момент на работната повърхност трябва да бъде осигурена осветеност, по-голяма или равна на нормената [1, 3].

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Експлоатационният коефициент отчита колко ще се намали осветеността на работната повърхност след определен период от време поради стареене и замърсяване [1].

Ке е произведението на 4 компоненти, които се определят от таблици в зависимост от замърсяването на осветителите (*Кзо*), от стареенето на лампите (*Ксл*), от оцеляването на лампите (*Кол*) (част от лампите изгарят) и от замърсяването на повърхностите на помещението (*Кзпп*) (виж зависимостите (1), (2) и (3)) [1].

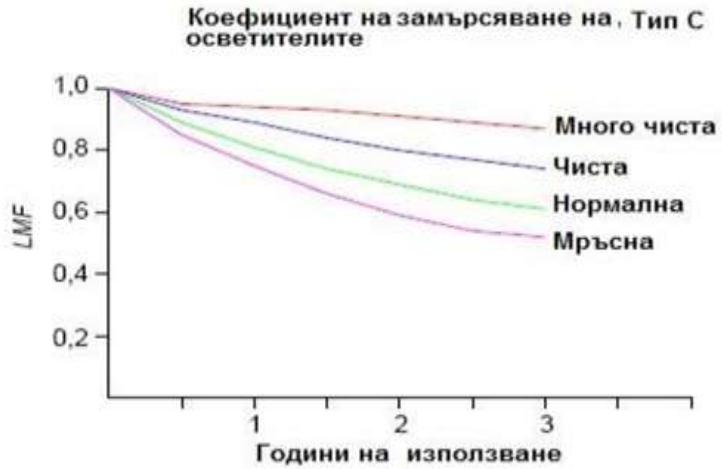
Експлоатационният коефициент (*Ке*) се дефинира като отношение на експлоатационната осветеност (*Еексп*) към началната средна осветеност при пускане на уредбата в експлоатация (E0):

$$Ке = Еексп / E_0 \quad (1)$$

$$Ке = Кзо * Ксл * Кол * Кзпп \quad (2)$$

$$MF = LMF * LLMF * LSF * SMF , \quad (3)$$

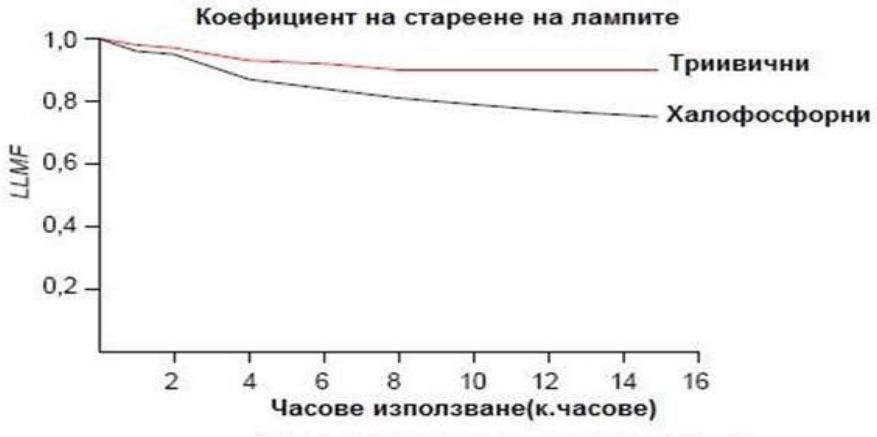
където *Ке* е експлоатационен коефициент (Maintenance Factor– MF). Той отчита колко ще се намали осветеността на работната повърхност след определен период от време, поради стареене и замърсяване;



Фиг.1. Определяне на ***Кзо***

Кзо – коефициент на замърсяване на осветителите.- показва колко ще се намали КПД на осветителите (*ηосв*) поради замърсяване за определен период;

Ксл – коефициент на стареене на лампите (Lamp Lumen Maintenance Factor – LLMF). Отчита колко ще се намали потока на лампите, поради стареене на лампите в течение на определен период по отношение на номиналния светлинен поток (фиг.2.);



Фиг.2. Определяне на ***Ксл***

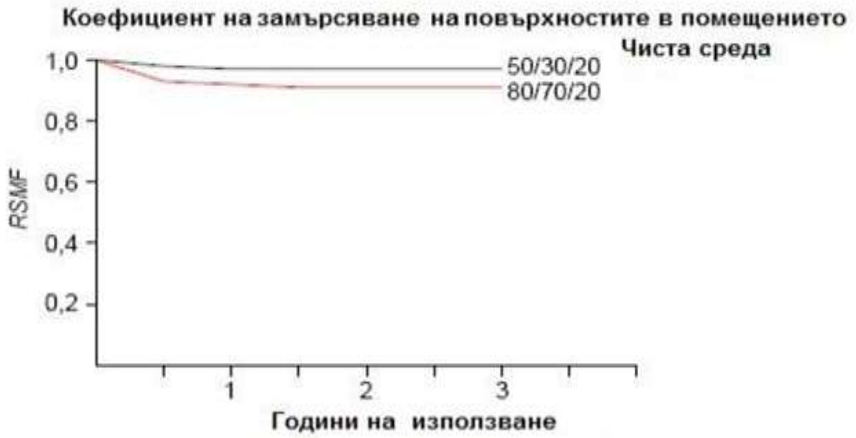
Фиг.3. Определяне на ***Кол***

Кол – коефициент на оцеляване на лампите (Lamp Survaival Factor – LSF). Този коефициент отчита какъв процент от лампите ще останат да работят след определен период (фиг.3.);

Много фактори влияят на коефициента на оцеляване и на коефициента на стареене на лампите.

Основни фактори са: а) различия между типовете лампи; б) различия между лампи от един тип; в) различия по външни влияния на лампата; г) позиция на лампата при горене; д) условия на околната среда; е) пускорегулиращата апаратура; ж) честота на включване и др.

Кзпп – коефициент на замърсяване на повърхностите на помещението (Room Surface Maintenance Factor – RSMF). Той отразява колко се намалява коефициента на отражение на граничните повърхности на помещението, поради замърсяване след определен период от време, т.е. колко се намалява коефициента на използване на светлинния поток спрямо работната повърхност (фиг.4.).



Фиг.4. Определяне на ***Кзпп***

2. НАЧИН ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЕКСПЛОАТАЦИОННИЯ КОЕФИЦИЕНТ *Ке* (*MF*)

Коефициентът на експлоатация може да бъде определен при спазване следната последователност:

Стъпка 1. Избиране на лампа и осветител за вътрешната осветителна уредба (таблица 2.2 и 2.3 [2]);

Стъпка 2. Определяне на интервал за групова подмяна на лампите (таблица 2.2[2]););

Стъпка 3. Преценява се категорията на чистота на помещението (таблица 2.1[2]);

Стъпка 4. Намиране на LLMF и LSF от таблица (1.[2]) за периода, определен в Стъпка 2. Ако лампите се сменят при изгаряне, то за LSF се взима 1;

Стъпка 5. Определяне на интервалите за почистване на осветителите и повърхностите на помещението;

Стъпка 6. Определяне на LMF от таблица (3.4[2]) за определения в Стъпка 5 период;

Стъпка 7. Определяне на RSMF от таблица (3.6-3.8[2]) за периода, определен в Стъпка 5;

Стъпка 8. ***Изчисляване на MF = LLMF . LSF . LMF . RSMF*** (. NRF).
Забележка; Ако стойността на невъзстановимите загуби е значителна, то тя трябва да бъде включена при изчисляването на MF.

Стъпка 9. Препоръчително е, в началния стадий на проектирането, да се повторят *Стъпки* от 1 до 8 с няколко различни стойности за коефициентите, за да се получат няколко различни експлоатационни програми, между които да бъде избрана най-подходящата. По този начин може да се предпише оптимален вариант за експлоатационна поддръжка на уредбите, още на ниво проектиране

Стойността на всеки от гореизброените коефициенти е различна, при различните лампи, осветители, замърсеност на средата, интериор и продължителност на работа.

Таблица 1.

*Примерни стойности за коефициента на стареене на лампите (**LLMF**) и за коефициента на оцеляване на лампите (**LSF**) [2, 4]. За светлодиодни осветители сме посочили данни от фирма " ETAP Lighting" (Белгия) [2].*

			Работни часове (хил. ч.)											
		разлики[1]	0,0	0,5	1	2	4	6	8	10	12	15	20	30
Нажежаеми	*LLMF*	*умерени*	1,00	0,97	0,93									
	LSF	*големи*	1,00	0,98	0,50									
Халогенни	*LLMF*	*големи*	1,00	0,99	0,97	0,95								
	LSF	*големи*	1,00	1,00	0,78	0,50								
ЛЛ триивични	*LLMF*	*умерени*	1,00	0,99	0,98	0,97	0,93	0,92	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	LSF	*умерени*	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97	0,94	0,50	
ЛЛ петивични	*LLMF*	*умерени*	1,00	0,99	0,98	0,97	0,93	0,92	0,90	0,90	0,90	0,90		
	LSF	*умерени*	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,92	0,50		
ЛЛ халофосфатни	*LLMF*	*умерени*	1,00	0,98	0,96	0,95	0,87	0,84	0,81	0,79	0,77	0,75		
	LSF	*умерени*	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,92	0,50		
Компактни ЛЛ	*LLMF*	*големи*	1,00	0,98	0,97	0,94	0,91	0,89	0,87	0,85				
	LSF	*големи*	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,94	0,86	0,50				
Живачни	*LLMF*	*умерени*	1,00	0,99	0,97	0,93	0,85	0,82	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	
	LSF	*умерени*	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,94	0,90	0,86	0,79	0,69	0,50	
Метал халогенни[2]	*LLMF*	*големи*	1,00	0,98	0,95	0,90	0,87	0,83	0,79	0,65	0,63	0,58	0,50	
	LSF	*големи*	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,92	0,86	0,80	0,73	0,66	0,50	
Керамични метал. хал.	*LLMF*	*големи*	1,00	0,95	0,87	0,75	0,72	0,68	0,64	0,60	0,56			
	LSF	*големи*	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,95	0,80	0,50			
НЛВН	*LLMF*	*умерени*	1,00	1,00	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,94	0,90
	LSF	*умерени*	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,95	0,92	0,50
Светлодиодни (LED)[3]	*LLMF*	*големи*	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98
	LSF	*големи*	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98	0,96

[1]Показва разликите между коефициентите LLMF и LSF сред лампи, принадлежащи към една и съща категория.

[2]Разликите при метал халогенните лампи са значителни. Високомощните и нискомощните лампи от този вид имат значително намален живот.

[3]Данните подлежат на периодична актуализация. Към настоящия момент, същите са снети на база технически описания на фирма "ETAP Lighting" (Белгия).

В табл.2 са дадени стойностите на *MF* за осветителни уредби на офиси и промишлени помещения с различни осветители на фирмата "ETAP" и различна продължителност на работа на светлодиодните осветители [4].

Таблица 2.

Коефициент на експлоатация (MF%) за светлодиодни осветители на фирмата "ETAP" [4] (статус февруари 2013)

Тип на осветителя	Приложение	25 000 h	50 000 h	60 000 h
D1/D2/D3	Офис	79	69	64
D42	Офис	88	86	86
E10/E11/E12	Промишленост	84	83	82
E14	Промишленост	78	72	66
FLARE	Офис	87	84	83
R7	Офис	88	87	86
R8	Офис	80	72	69
U7	Офис	88	87	86
UM2	Офис	84	80	78
V2M11	Офис	88	87	86
V2M17	Офис	83	77	74
V2M1F/J	Офис	83	78	76

В табл.3 е предложен начин за определяне на стойността на експлоатационният коефициент с електронна таблица, изготвена на MS Excel съгласно CIE 97:2005 “Technical Report: Guide on the maintenance of indoor electric lighting systems” [2]

Таблица 3.

Начин за определяне на MF за вътрешни осветителни уредби съгласно препоръките на Международната комисия по осветление CIE 97:2005 [2]

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЕКСПЛОАТАЦИОННИЯ КОЕФИЦИЕНТ *MF*

съгласно препоръките на международната комисия по осветление CIE 97:2005

Стъпка 1.	Избор на лампи и тип осветители (от Таблица 2.2):	лампи:	LED
		осв. тип:	C
Стъпка 2.	Избор на интервал за групова подмяна на лампите:		
	Работни часове (за осветителната уредба, в хил.ч.):		20,00
Стъпка 3.	Изчисляване на коефициентите *LLMF* и *LSF* , за интервала от Стъпка 2. Ако лампите се подменят при изгаряне, то *LSF* = 1.		1,00
			1,00
Стъпка 4.	Определяне средата на помещението:		МЧ
Стъпка 5.	Определяне интервалите на почистване (год.) за	осветители:	1,00
		повърхности:	3,00
Стъпка 6.	Изчисляване стойността на коефициента *LMF* (Таблица 2.5), *за интервалите, избрани в Стъпка 5.*		0,94
Стъпка 7.	Избиране коефициенти на отражение на повърхностите (таван/стени/под):		0,70/0,50/0,20
Стъпка 8.	Избиране коефициент на падащия светлинен поток *DFF* :		0,00
	Подмяна на лампите при изгаряне?		да
Стъпка 9.	Изчислена стойност на коефициента *RSMF*:		0,97
Стъпка 10.	Изчисляване стойността на експлоатационния коефициент *MF* , с точност не по-малка от 2 (две) значещи цифри. ***MF =***		0,91

В табл.4. е направено сравнение между стойностите на експлоатационните коефициенти (*MF*) определени съгласно методиката и *MF* определен от DIALux за посочените осветителни уредби.

Таблица 4.

Сравнение на *MF* определен от DIALux и *MF* изчислен

Помещение	MF - $_{\text{DIALux}}$	MF - $_{\text{Изчислен}}$
CAD център	0,67	0,83
Техническо чертане	0,67	0,84
Конферентна зала	0,67	0,78
Първична обработка	0,5	0,71
Леене под налягане	0,5	0,71
Стоманолеярна	0,5	0,79
Магазин	0,67	0,75
Фоайе	0,67	0,84
Чакалня	0,67	0,84

3. ПЛАН НА ЕКСПЛОАТАЦИЯТА

По време на проектирането на осветителните уредби, понякога е възможно да се изберат компоненти, системи и покрития, ограничаващи експлоатационната поддръжка до минимум.

- избор на осветители, в които лампата е в прахозащитена обвивка с подходящо уплътнение, позволяващо на осветителя да „диша“, без да натрупва прах;
- избор на самопочистващи се осветители, при които конвекционните потоци, предизвикани от топлината, отделена от лампата, са насочени да минават покрай отражателните повърхности, с което предпазва от натрупване на сухия, съдържащ се във въздуха прах;
- използване на осветители със собствена вентилация, която помага за отстраняване на прах и други замърсители;
- използване на оптични системи, които са подходящи за преобладаващата среда;
- използване на осветители с по-малко компоненти, които спомагат за по лесния демонтаж при нужда;
- използване на подходящи покрития, които остават чисти по-дълго време и са лесни за почистване;
- използване на рефлекторни лампи или отворени осветители, при “лепкав“ прах.

Други начини, с които проектанта може да подобри ефективността на експлоатационната поддръжка са:

- Планиране за улесняване на експлоатацията - преценка на достъпа до осветителите, типове инструменти необходими за поддръжка, подсигуряване на резервни лампи, оптични системи и цели осветители. Предимство е и наличието на информационна връзка с поддържащият персонал за по-задълбочено разбиране на изискванията и процедурите;

- изготвяне на задълбочен експлоатационен график с инструкции;
- осигуряване на ефективна информационна обратна връзка, за допуснати грешки, откази или появили се трудности и използване на тази информация за избягване на повторното им допускане в бъдещи проекти.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектирането на осветителните уредби трябва да се определи подходящ експлоатационен коефициент, с който се оценява амортизацията. Стойността на този коефициент чувствително влияе на броя необходими осветители за осигуряване на избраната осветеност. Висок *Ke* (*MF*) се постига чрез по-чести интервали на почистване и избор на подходящи осветители и система а управление. Понастоящем се увеличава използването на димируеми електронни ПРА, които позволяват осветителните уредби да осигуряват постоянна осветеност. Препоръчва се експлоатационната поддръжка да се извършва, когато 50% от лампите работят при пълна мощност. При проектиране и експлоатация не трябва да се допуска намаляване на *Ke* под 0,7.

Изготвянето на експлоатационен график за поддръжка на осветителната уредба следва да се извърши по време на проектирането, съвместно точно определеният експлоатационен коефициент *Ke* (*MF*). Поддържаната осветеност ще бъде близка по стойност с първоначално инсталираната. Графиците са задължителни, с което гарантират поддържане нивото на осветеност в помещенията. В тях се описват начините за подмяна на лампи, интервалите за почистване на осветителите, както и за почистване/ обновяване на повърхностите в помещенията. Всички тези мероприятия спомагат за поддържане ефективността на уредбата.

При проектиране с точно определена стойност на *Ke* (*MF*), разликите в консумация на ел. енергия могат да достигнат 30 %, спрямо проектиране с ползване на стойност по подразбиране, респективно по-малка стойност на *MF* (например 0,5 или 0,67).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Иванов З., А., Осветителна и инсталационна техника, 261 стр., Авангард Прима, София 2010.

[2] CIE 97:2005 Guide on the maintenance of indoor electric lighting systems

[3] БДС EN 12464 -1:2011. Осветление на работни места.

[4] ETAP Lighting, WHITE Paper, The maintenance factor for LED lighting.

[5] Иванов З. А., Светлинни източници, 145 стр., второ преработено и допълнено издание, Авангард Прима, София 2008.

Автори: Захари Иванов, проф. д-р инж., кат. "ЕСЕОЕТ", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*, **Борислав Бойчев**, д-р инж., кат. "ЕСЕОЕТ", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *bojchev@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Ива Петринска

ОПТИКА ЗА СВЕТОДИОДИ

Вълчан Георгиев

Резюме: *Представена е теоретична разработка на подход за конструиране на светодиодна оптика. Разгледана е задачата за синтезиране на геометрията на вторична оптика за светодиоди, така че да се постигне желано светоразпределение. Това е типична обратна задача и нейното решение се търси с помощта на оптимизационни алгоритми.*
Ключови думи: *LED оптика, обратна задача*

LED OPTICS

Vultchan Gueorgiev

Abstract: *A theoretical approach for design of LED optics is presented. The task for synthesis of secondary LED optics is considered so that the desired light distribution is achieved. That is a typical inverse problem and its solution is to be found with the help of optimization algorithms.*
Keywords: *LED Optics, Inverse Problem*

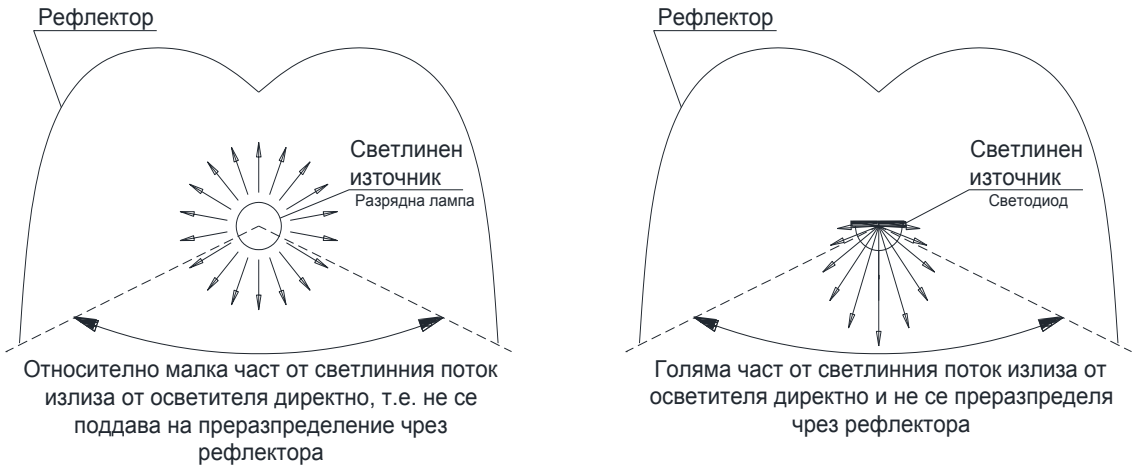
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Проектирането на вторична оптика за светодиоди – рефлекторна и рефракторна е задача, която принципно не се отличава от задачата за конструиране на оптична система за конвенционалните светлинни източници. Практическата разлика идва от спецификата на светодиодите – те се доближават до точков източник, което ги прави много подходящи за приложения съвместно с рефракторна оптика [4,5]. Нещо повече, типичното косинусно светоразпределение, присъщо за пъвичната им оптика слабо подхожда на типичните светлотехнически приложения – фиг.1.

Конструирането на вторична оптика е сложна задача, която понастоящем се решава с помощта на софтуер за симулация [2,3]. Сам по себе си този софтуер решава правата задача – при зададена геометрия на оптиката (най-често във вид на леща), „рей-трейсинг“ софтуера с достатъчна точност определя качествените и количествени параметри на полученото светоразпределение.

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829



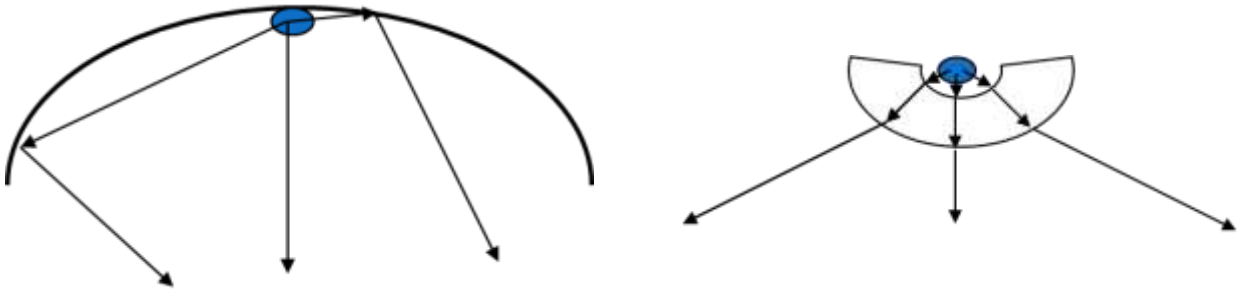
Фиг.1. Светодиодите, за разлика от газоразрядните лампи, излъчват в едната полусфера и типичното светоразпределение на първичната оптика е косинусно. Това намалява ефективността на рефлекторите, тъй като голяма част от светлинния поток напуска осветителя без да достига повърхността на рефлектора.

Основният подход за решаване на обратната задача – синтезиране на необходимата геометрия на оптиката, така че да се получи желаното светоразпределение, е базиран на опита на конструктора, който задава определена геометрия и изследва резултата след симулация [1]. Следва приложение на подхода с проби и грешки, докато се получи необходимия резултат.

В настоящата разработка е представен различен подход за решаване на обратната задача. Синтезът на геометрията на оптиката е следствие решаване на оптимизационен проблем, минимизиращ разликата между желаното светоразпределение и това, получено от текущата симулация.

При производството на осветители, най-изгодно е всички светодиоди да се разполагат върху една равнина – това опростява изключително силно производството на осветители, намалява теглото на заготовката (минимизира загубите на алуминий от обработка на заготовката) и подобрява охлаждането на светодиодите. С използването на рефлекторна оптика, при косинусно разпределение на първичната леща, не може да се получи крива „батуинг“, без да се ограничи директното излъчване на светодиода. Това обаче въвежда многократни отражения и намалява основните предимства на подхода – високата ефективност и просто изпълнение.

При лещите (рефракторна оптика), може да се постигне пречупване на светлинните лъчи на голям ъгъл, но заради коефициента на пропускане на материала на лещите и пълното вътрешно отражение, се губи около 4% от светлинния поток (за ПММА).



Рефракторна оптична система
- Висока ефективност
- Липса на гъвкавост

Рефлекторна оптична система
- По-ниска ефективност
- Многостранна приложимост

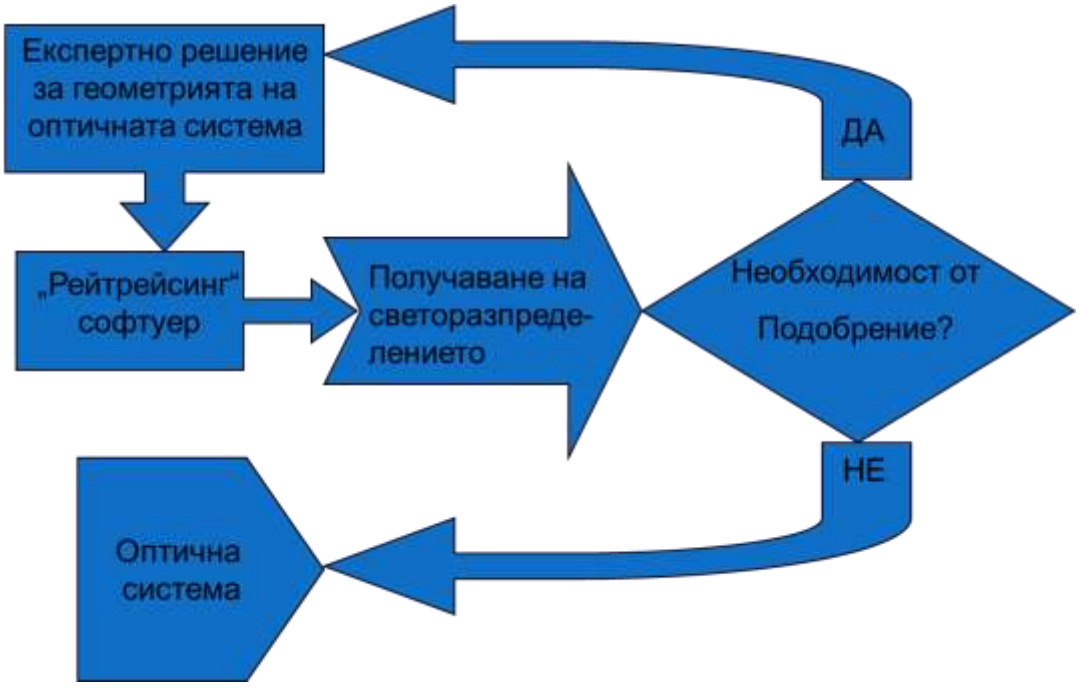
Фиг.2. Рефлекторна и рефракторна оптични системи.

Въпреки различните принципи на насочване на светлината и взаимно-допълващите се предимства и недостатъци, задачата за синтезиране на рефлекторна и рефракторна оптика може да се формулира по един и същи начин.

2. ФОРМУЛИРАНЕ НА ОБРАТНАТА ЗАДАЧА

Типичният подход, прилаган при синтезиране на оптични системи може да бъде описан с диаграмата от Фиг.3. Изисква се човекът или екипът, който разработва новата оптична система да има изключително богат опит и достъп до софтуер за светлинни симулации или т.нар. „рейтрейсинг“ софтуер. След това по метода на пробите и грешките се синтезира подходяща оптична система.

В настоящата работа, се прави опит, обратната задача за синтез на оптична система да се сведе до оптимизационна задача.

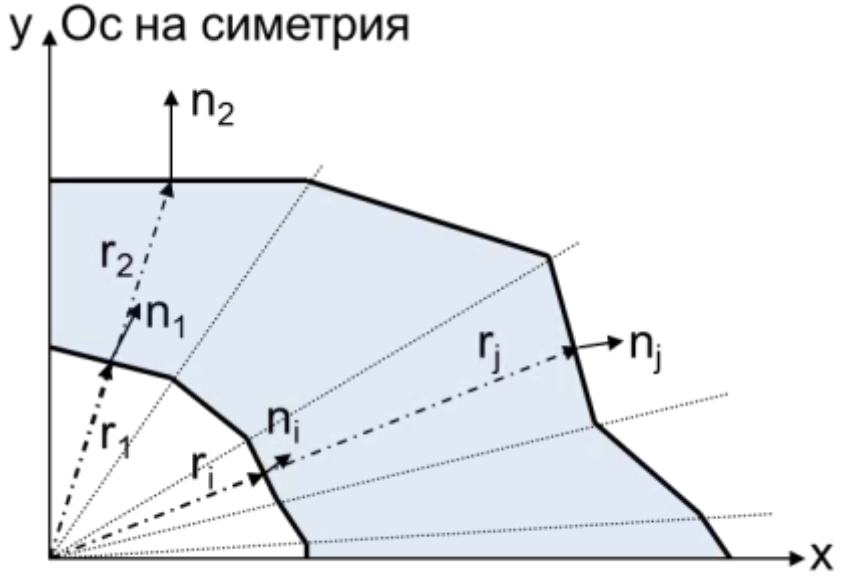


Фиг.3. Стандартен подход за синтезиране на оптична система.

3. ФОРМАЛИЗИРАНЕ НА ЗАДАЧАТА

При дефиниране на задачата се правят някои опростявания описани по-долу. Едновременно с това се дава и словесно описание на приложения подход, имащ за цел алгоритмизиране на задачата за синтезиране на оптична система:

1. Задачата се разглежда само в двудименсионното пространство. Ако оптичната система е ососиметрична, това опростяване не въвежда допълнителни ограничения. Ако отсъства ос на симетрия, е необходимо да се разгледат различни секущи равнини.



Фиг.4. Разбиване на оптичната система на елементарни участъци

2. На Фиг.4 е показана примерна рефракторна оптична система (или леща). Светлинният източник е разположен в центъра на координатната система. Разглеждат се вътрешната и външната повърхнини на леща. Ако задачата се решава за рефлектор, ще се разгледа само една повърхнина – отразяващата повърхнина на рефлектора. Тъй като задачата се решава само в равнината, въпросните повърхнини преминават в криви. Тези криви се разбиват на елементарни участъци през определен ъгъл.

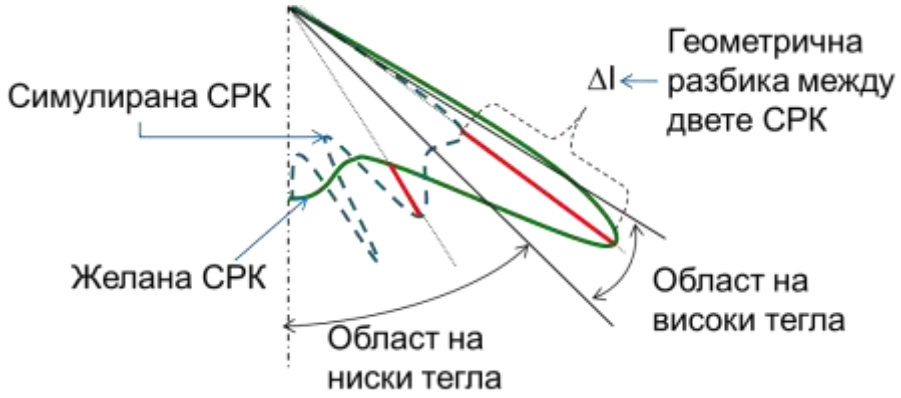
3. Кривите, описващи повърхнините се разбиват на елементарни участъци, в които се апроксимират с отсечки, лежащи върху допирателната към кривата в центъра на участъка (по ъглополовящата на елементарния ъгъл).

4. В елементарен ъглов участък, светлинния поток се съсредоточава в един вектор, насочен по ъглополовящата, с големина равна на интензитета на източника в съответния пространствен ъгъл. Основание за такова разглеждане дават математическите изрази:

$$\left.\begin{aligned}\Phi &= I \cdot d\Omega \\ d\Omega &= const\end{aligned}\right\} \Rightarrow \Phi \square\ I \,, \tag{1}$$

5. Върху отсечките, описващи граничните повърхности се прилагат законите за пречупване и отразяване на светлината, като се получават нови вектори, чиято посока се определя от тези закони. При настоящата реализация на подхода, загубите от пропускане и отражение се пренебрегват, затова големината на векторите не се променя.

6. След като векторите „напуснат“ последната повърхнина, те се групират според ъгъла на който са насочени. Всички вектори, намиращи се в сектора $\alpha \div \alpha + d\alpha$ се считат насочени по ъглополовящата на сектора, т.е. под ъгъл $\alpha + \frac{d\alpha}{2}$. Сумата от големините на тези вектори дава интензитета на светлината в даденото направление и формира директно точка от светоразпределителната крива на проектираната оптична система, когато тя се разгледа като точков източник.



Фиг.5. Определяне на целевата функция – претеглена геометрична разлика между симулираната и желаната светоразпределителни криви

7. По този начин е налице „симулация“ на светоразпределителната крива (СРК), получена от текущата оптична система (ОС). Вече е възможно да се получи разликата между желаната СРК и симулираната такава. Тази разлика е означена с на Фиг.5.

8. Целевата функция може да се дефинира като минимаксно условие или като минимум на кватдратичната сума от всички такива разлики:

$$Z = \min\left\{\max\left\{\Delta I \cdot w\right\}\right\}$$

$$Z = \min\left\{\sum_{j=1}^{n}\left(\Delta I_j \cdot w_j\right)^2\right\}, \tag{2}$$

$$w - тегла$$

Необходимо е въвеждане на претегляне на разликите, защото зоната на максимален интензитет в желаната крива има най-голямо значение.

Променливи на оптимизацията са нормалите към отсечките, формиращи кривите, с които се описват повърхнините на оптичната система (на Фиг.4 това са векторите $\overrightarrow{n_1}, \overrightarrow{n_2}, \ldots$.) Всяка нормала се описва с два параметъра – начална точка и направление. Тъй като началната точка задължително лежи върху ъглополовящата на елементарен ъглов участък, може да се определи само с големината на радиус-вектора до нея. Посоката на нормалата се определя чрез ъгълът й спрямо оста на симетрия (или ординатата от Фиг.4). Така параметрите на оптимизация могат да се запишат като:

$$X = \left[r_1, \alpha_1, r_2, \alpha_2, \ldots, r_N, \alpha_N \right], \tag{3}$$

4. ПОДХОД ПРИ РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧАТА

Изследвани са различни методи за оптимизация на гореописания подход – градиентни методи, стохастични методи, включително генетични алгоритми. Опита показва, че нито един от методите не води до приемливо решение. Затова се наложи промяна на модела. Кривите, описващи повърхнините на лещите или повърхнината на отражателя се задават като аналитични криви. Така променливите на оптимизация се преобразуват до коефициентите в аналитичното задаване на кривите.

ЛИТЕРАТУРА

[1] AB20-5 “Secondary Optics Design Considerations for SuperFlux LEDs” Application Brief ©2015 Lumileds Holding B.V

[2] *www.optis-world.com*

[3] *www.ltioptics.com*

[4] P.Ge, X.Wang, Y. Li, and H.Wang, “Reflective Optics Design for an LED High Beam Headlamp of Motorbikes, Hindawi Publishing Corporation”, The Scientific World Journal, Volume 2015, Article ID 503171,

[5] Jin-Jia Chen,1, Te-Yuan Wang, Kuang-Lung Huang, Te-Shu Liu,1 Ming-Da Tsai, and Chin-Tang Lin, “Freeform lens design for LED collimating illumination”, OPTICS EXPRESS, Vol. 20, No. 10, May 2012

Автор: Вълчан Георгиев, доц. д-р, катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: *vulchy@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: проф. д-р Захари Иванов

СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА СВЕТОДИОДНИ ОСВЕТИТЕЛИ ЗА ПЪТНИ ТУНЕЛИ

Николай Матанов, Иван Ангелов

Резюме: *Представена е система от силови и електронни модули за автоматично или ръчно управление на голям брой светодиодни осветители. Контролира се силовото захранване по токови кръгове и се управлява силата на светене (димиране) на осветителите. Разделянето на осветителите по токови кръгове и димирането на осветителите е конструирано по начин осигуряващ минимална вероятност от отпадане на цялото осветление при аварии по някой от кръговете. При димиране на голям брой осветители се налага да се конструира система за управление регулираща всеки от токовите кръгове независимо от работата на останалите такива. Ако в някой от силовите кръгове се случи авария, то тя няма да се отрази на работата на останалите осветители.*
Ключови думи: *димиране, светодиодни, осветители, управление*

SYSTEM FOR THE MANAGEMENT OF LED ROAD TUNNEL LIGHTERS

Nikolaj Matanov, Ivan Angelov

Abstract: *Presented is system of power and electronic modules for automatic or manual control of a large number LED Lighters. Power supply control by current circuits and light output (dimming) for LED Lighters. Separation of luminaires by current circuits and dimming of luminaires is designed to ensure minimal probability of dropping all lighting in accidents. When dimming a large number of luminaires, it is necessary to construct a control system regulating each of the current circuits, regardless of the operation of the other ones. If any of the power circles emergency occurs, then it will not affect the work of other luminaries.*
Keywords: *dimming, LED, lighting, control*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При модернизиране на осветлението или изграждане на нови осветителни уредби за големи и дълги обекти, като например пътни тунели, се налага да се монтират от няколко десетки до няколко стотин осветителя. Светодиодните модули в осветителите трябва да се захранват с подходящи електронни преобразуватели осигуряващи добри енергетически параметри и висока надеждност. Има и променливотокови режими за захранване на светодиоди [5, 6], но те не са подходящи при разглежданите обекти.

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

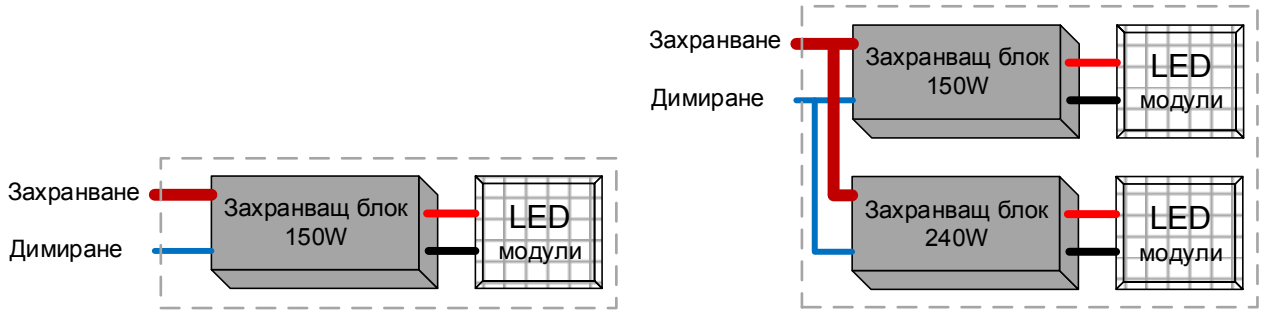
ISSN 1311-0829

За управление на димирането може да се използва например цифров канал с „DALI" протокол. Този тип управление има много големи възможности, но е приложим за сравнително малко на брой крайни устройства. При голям брой на обектите се налага монтиране на концентратори по комуникационния канал [3]. При използване на димируеми електронни баласти управлявани с напрежение или *ШИМ* се постига значително опростяване на управляващата система и се снижава първоначалната инвестиция в осветителната уредба [1,2]. От друга страна системата за управление става по-надеждна при използване на „*аналогово*" управление на димирането [4]. При регулиране на светлинния поток посредством димиране на осветителите едната положителна страна е икономията на енергия но по-същественото е че всички осветители се *износват* (стареят) едновременно. При едновременната работа на осветителите не е необходимо да се броят часовете на работа по токови кръгове и да се сменят работещите осветители за уеднаквяване на износването.

2. ИЗХОДНИ ДАННИ ЗА УПРАВЛЯВАЩАТА СИСТЕМА

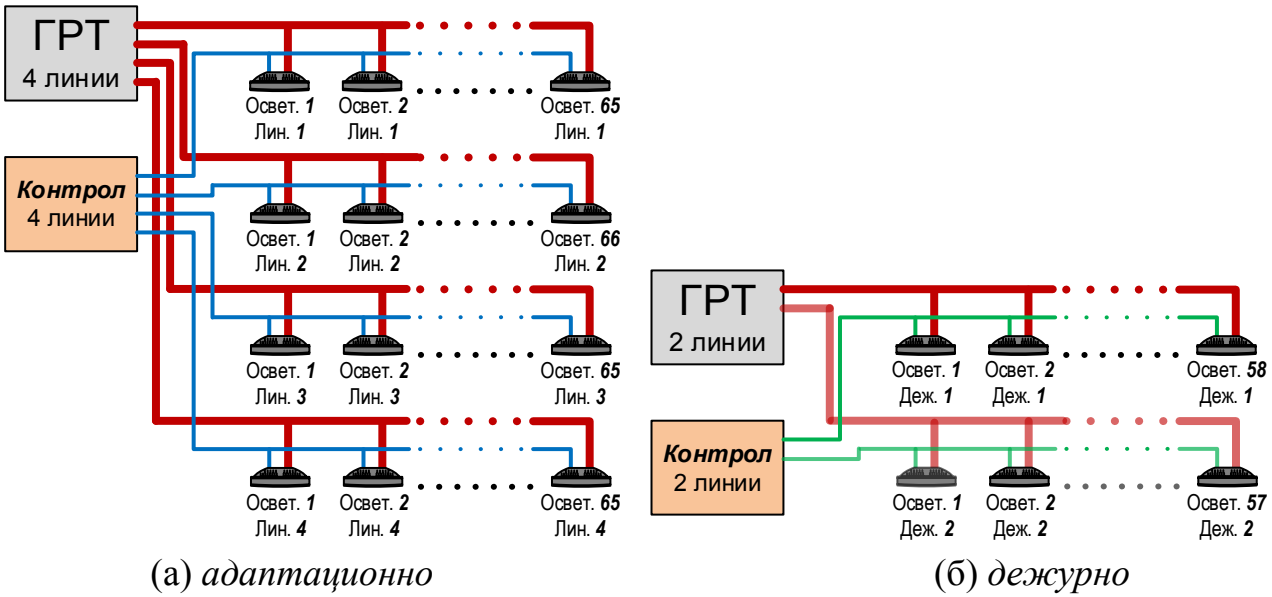
- В дясната тръба на разглеждания тунел с дължина 1125 метра са монтирани 261 осветителя за адаптационно осветление, всеки с по два управляеми баласта – един 150W и един 240W, и обща мощност 390W, фиг.2(б). Всичките осветители се захранват и управляват от подстанция 1;
- За дежурно осветление са монтирани 115 осветителя с по един управляем баласт 150W, фиг.2(а). Половината дежурно осветление се захранва и управлява от подстанция 1, а останалата част от подстанция 2;
- Осветителите за адаптационно осветление са разпределени в четири силови (и управляващи) линии. Половината осветители във всяка линия са над лявото пътно платно, а другата половина над дясното.
- Дежурното осветление се захранва по два силови кръга.

На фиг.1 са показани снимки на осветителите за дежурно (а) и за адаптационно (б) осветление.



Фиг.1. *Захранващи блокове в използваните LED осветители*

Разпределянето на осветителите за адаптационно осветление по силови и контролни линии е показано схематично на фиг.2(а). Означени са с пореден номер на осветител в силови (съответно управляващи) линии 1 до 4. Дежурното осветление в разглежданата тръба, както и същото такова в другата тръба, е показано схематично на фиг.2(б).



Фиг.2. *Разпределение на осветителите по захранващи и управляващи линиил*

От изходните данни и от разпределянето на осветителите по групи може да се определят параметрите, които трябва да покрива системата за димиране на осветители управлявани с напрежение *1 до 10V*. Всеки от електронните баласти (ПРА) има вход за контрол, който се явява източник на ток с големина 100μA. Всички паралелно свързани входове във всяка от линиите за контрол са източник на ток с големина равана на броя *ПРА* по 100μA [4]. Или токът в контролна линия е: $I_{к.л.} = БР_{ПРА} * 0.1mA$, [mA], където: $БР_{ПРА}$ е броя на паралелно свързаните *ПРА*. Резултатите за разглежданият тунел са показани в табл.1. Изчисленията са само за едната тръба и за линиите захранвани от подстанция 1.

Табл.1.

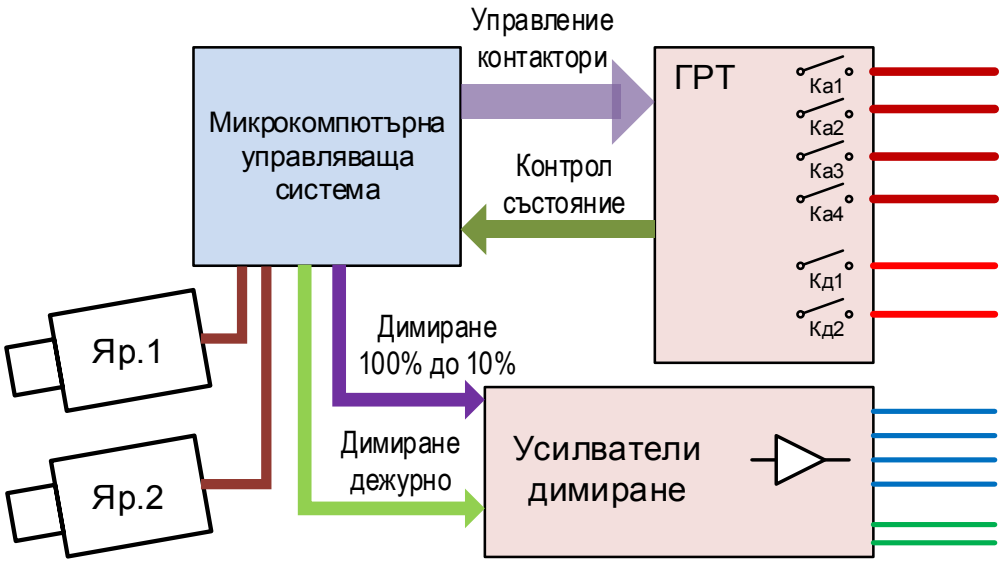
Разпределение на осветителите по линии в дясна тръба

линия	ляво платно	дясно платно	общо	общо	ток в упр. верига
	брой осветители	брой осветители	брой осветители	брой ПРА	mA
1 – адаптация	33	32	65	**130**	13,0
2 – адаптация	33	33	66	**132**	13,2
3 – адаптация	32	33	65	**130**	13,0
4 – адаптация	32	33	65	**130**	13,0
Д1 – дежурно 1	29	29	58	**58**	5,8

В последната колона на табл.1 е токът, който трябва да „приемат“ усилвателите за димиране в управляващата система.

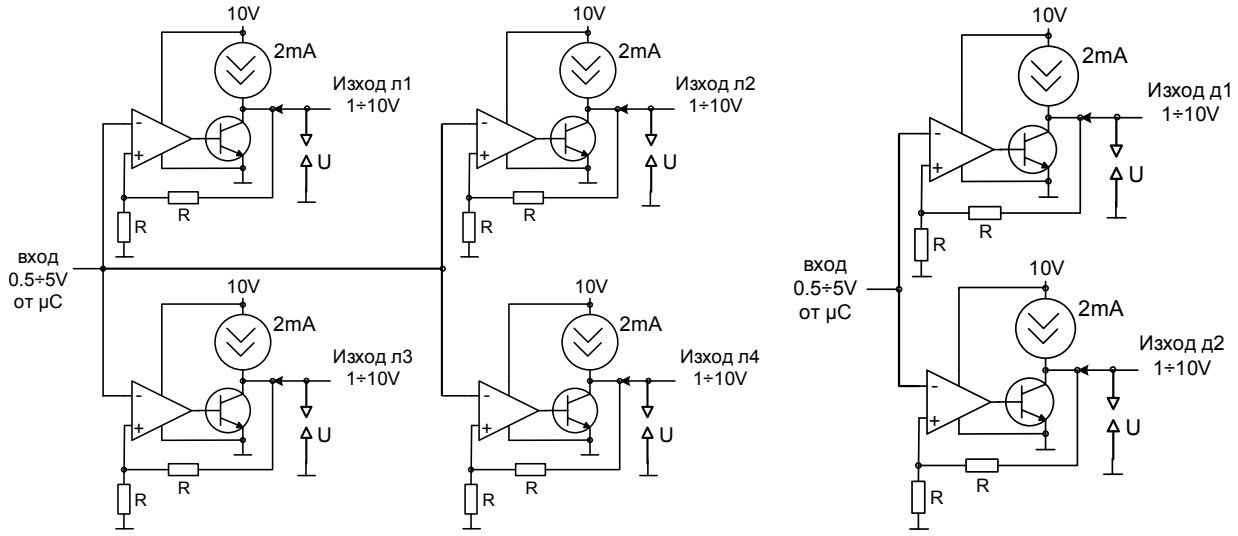
3. СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Блокова схема на разработената система за управление е показана на фиг.3. Яркомер *Яр.1* измерва яркостта на входа на тунела и регулира силата на светене на адаптационното осветление за постигане на необходимата яркост във входната зона. Съответно яркостта във входната зона се контролира с яркомер *Яр.2*. Процента на димиране за адаптационните осветители се пресмята според показанията на яркомерите. Късно вечерта дежурните осветители се димират на 50%, а адаптационното осветление се изключва. Управляващата система, през контактори монтирани в *ГРТ*, комутира силовите захранващи линии.



Фиг.3. *Блокова схема на управляваща система.*

Напрежението на линиите за контрол (димиране) се регулира чрез специално разработени усилватели. Принципна схема на усилвателите е показана на фиг.4. За всяка управляваща линия се предвижда отделен усилвател [4].



Фиг.4. *Усилватели за управление на димиране с напрежение.*

Микрокомпютъра на управляващата система подава управляващо напрежение от *0.5V* до *5V* на група от два или повече усилвателя. Всеки от усилвателите има коефициент на усилване 2, при което на изхода му се получава напрежение от *1V* до *10V*. За всеки от изходите на усилвателите е предвидена защита от пренапрежение означена с „*U*" на схемата. Реално усилвателите изпълняват ролята на регулатори на напрежение защото товарът им се държи като източник на ток.

4. ИЗВОДИ

Системи за управление като описаната по-горе са реализирани физически и са монтирани до сега в три тръби на тунели. Предстои монтиране на управляваща система и в четвърта тръба на дълъг тунел.

При работата на системата до момента не са забелязани проблеми с управление на димирането на осветителите. Не са регистрирани неточности в работата на аналоговата част на системата като например неправилно димиране, „прескачания" при димиране или други неточности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Димируеми LED осветители: *http://www.osleder.com/01-10v-dimmable-led-tri-proof-lighting-pc-housing-1500mm-60w-6400lm-6000k/*

[2] Драйвери за LED осветление: *http://www.meanwell-bg.com/index.php*

[3] Тунелни осветители на Philips:

http://www.lighting.philips.com/main/prof/outdoor-luminaires/tunnel-and-underpass-lighting

[4] Ангелов Ив. „*Система за димиране на светодиодни осветители с управляеми импулсни захранвания*", VIII научна конференция ЕФ 2016, Варна, 12 – 15 септември 2016 г.

[5] Шопов, Й., С. Петракиева, Приложение на светодиоди при променливо-токови режими, V Научна конференция ЕФ 2013, Созопол, 2-5.09.2013 г., Годишник на ТУ-София, 2013, том 63, кн. 5, ISSN: 1311-0829, стр. 423-427

[6] Шопов, Й., С. Петракиева, З. Иванов, Параметри и режими на работа на антипаралелно свързани светодиоди при захранване с постоянно и променливо напрежение, Годишник на ТУ-София, 2014, том 64, кн. 3, VI Научна конференция ЕФ 2014, Созопол, 15-17.09.2014 г., ISSN: 1311-0829, стр. 273-278

Автори: Николай Стефанов Матанов, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg* ; **Иван Колев Ангелов**, доц. д-р инж. катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *ivanang@tu-sofia.bg*.

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: д-р инж. Борислав Бойчев

РЕАЛИЗИРАНЕ НА ТЕОРЕТИЧНИ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИТЕ ПАРАМЕТРИ НА LED ИЗТОЧНИЦИ НА СВЕТЛИНА ЗА НАВИГАЦИОННО КОРАБНО ОСВЕТЛЕНИЕ

Валентин Гюров, Християн Панчев, Гинка Иванова

Резюме: *Навигационните светлини са едно от основните технически средства за осигуряване безопасност на корабоплаването. Изчисляването на местоположението им, режима на работа и светлотехническите им параметри се регламентират от конвенцията STCW и стандартите на IMO. Внедряването на LED технологията за източници на светлина, поставя въпроси свързани с оптималното проектиране и изработване на такъв тип светлинни източници. Доклада представя теоретични и експериментални изследвания на светлотехническите параметри на LED базирани навигационни светлини за плавателни средства. Резултатите могат да представляват интерес за морски специалисти, светлотехници и производители на LED осветители, относно начините за проектиране на специализирани източници на светлина.*
Ключови думи: *светлотехнически параметри на LED, навигационно корабно осветление*

REALIZATION OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH ON LED'S PARAMETERS FOR NAVIGATION LIGHTING IN SHIPS

Valentin Gurov, Hristian Panchev, Ginka Ivanova

Abstract: *Navigation lights are one of the main technical system for ensuring navigation safety. The calculation of their location, mode of operation and their lighting parameters are regulated by the STCW Convention and the IMO Standards. The introduction of LED light source technology poses questions about the optimal design and production of this type of light source. The report presents theoretical and experimental studies of the LED parameters based navigation lights for ships. The results may be of interest to marine professionals, lighting designers and LED lighting manufacturers about how to design specialized light sources.*
Keywords: *lighting parameters of LED, navigation ship lighting*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Основната функция на морските навигационни светлини е да се осигури разпознаваемост на плавателните средства по отношение на тяхното разположение, ориентация на движение и режим на експлоатация (нормален, авариен и

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

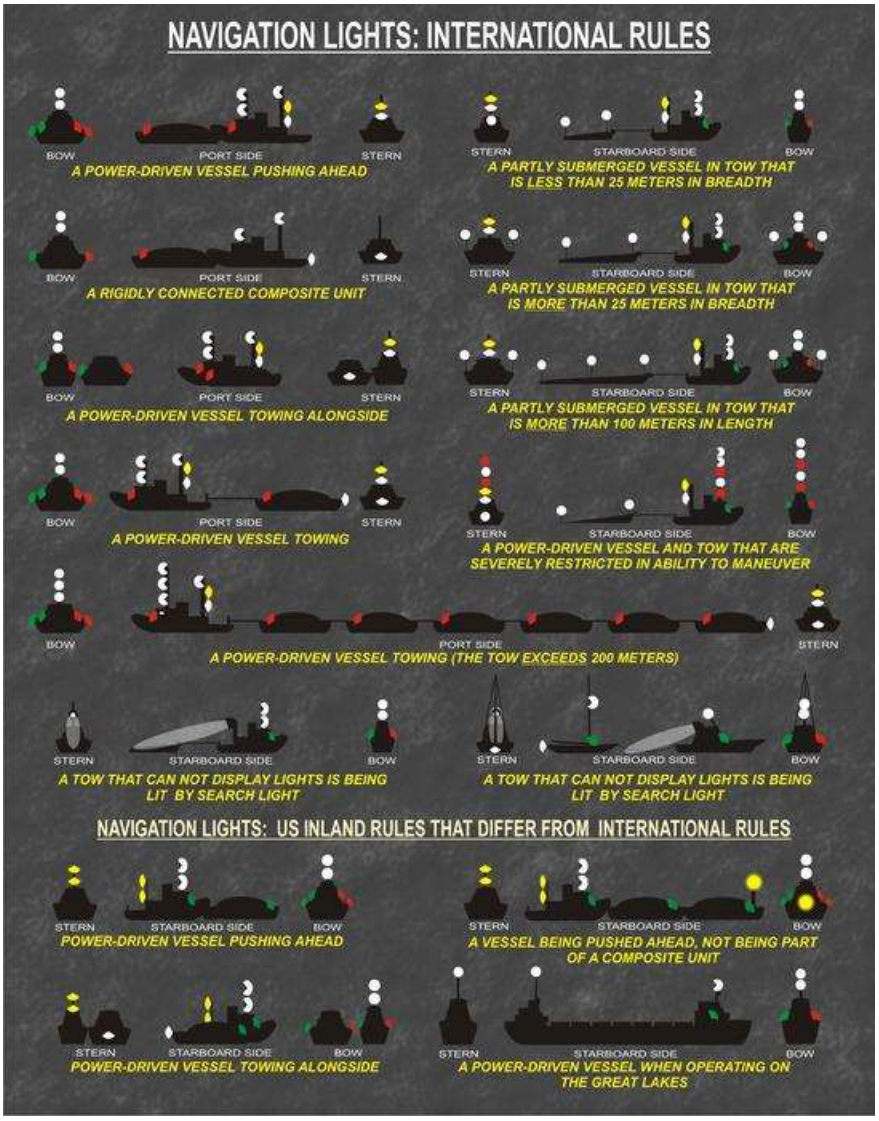
ISSN 1311-0829

бедстващ). Системата за навигационно осветление е въведена през 1838 г. от Съединените щати, а в последствие в Обединеното кралство през 1849 г. През 1897 г. тези правила са приети в международен мащаб, като често се използва неофициалното наименование „суетски". Причина за това е построяването на изкуственото съоръжение, където за първи път са наложени забранителни мерки относно неизползването им.

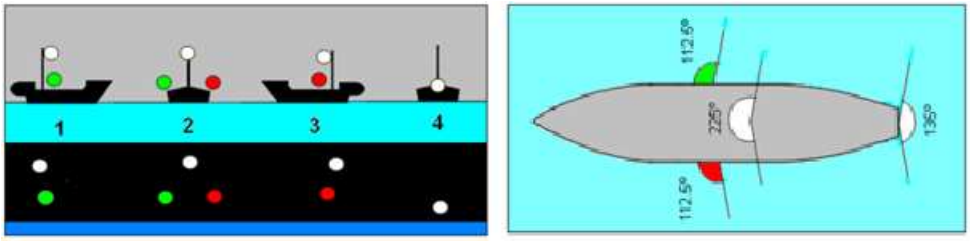
Цветовата гама на светлините се регламентира от STCW – Конвенция за безопасност на корабоплаването. Застъпва се използването на три основни цвята – зелен, бял и червен, както и един спомагателен – жълт.

2. КЛАСИФИКАЦИЯ ПО STCW ОТНОСНО РАЗПОЛОЖЕНИЕ, ЦВЯТ, СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕ И ВИДИМОСТ

Съществува подробна класификация за разпознаване на ориентацията на плавателното средство и неговият режим на работа (фиг.1). Опростена класификация, валидна за малките плавателни средства и представляваща извадка от общата е показана на фиг.2.



Фиг.1. Навигационни светлини – цветови комбинации според STCW.



Фиг.2. Стандартизирани ъгли на излъчване на навигационните светлини.

Видимостта на светлините се регламентира от типа на плавателното средство и е в диапазона от 2 до 6 морски мили (NM). Основните светлини, показващи ориентацията на корабите са стационарни. В аварийни ситуации се дефинира и включването на динамични светлини, в зависимост от конкретното събитие [2].

Основна техническа задача при проектирането на системата за навигационни светлини, представлява спазването на стандартизационните изисквания за видимост от определени дистанция и при определена позиция.

В настоящото изследване се разглеждат принципите на проектиране на навигационните светлини, като се извършва теоретично и експериментално изследване на навигационни светлини на малки плавателни средства – до 12 метра дължина. Разгледани са проблемите, свързани с несъответствието между теоретични и експериментални резултати и предпоставките за рискове при корабоплаването.

3. ПРОЕКТИРАНЕ НА НАВГАЦИОННИ СВЕТЛИНИ, В СЪОТВЕТСТВИЕ С IALA – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF MARINE AIDS, RECOMMENDATION E-200-2 MARINE SIGNAL LIGHTS, PART 2 CALCULATION, DEFINITION AND NOTATION OF LUMINOUS RANGE

Представената методика [2] се базира на закон на Allard и е стандартизирана както в корабоплаването, така и в авиоинженерството. Законът на Allard позволява изчисляването на осветеността E като функция на разстоянието d, светлинния интензитет I и експоненциалния коефициент z.

$$E(d) = I\frac{e^{-zd}}{d^2} \tag{1}$$

Експоненциалният фактор z описва атмосферната абсорбция и разсейването (поглъщането). На практика съществуват алтернативни начини за характеризиране на преобладаващата атмосфера, използващ атмосферна пропускливост T (2)

$$T = \frac{\Phi(d_u)}{\Phi_{вакуум}(d_u)} \tag{2}$$

където: T е атмосферното пропускане (безразмерно); $\Phi(d_u)$ е светлинен поток на единица разстояние след преминаване през атмосферата; $\Phi_{вакуум}(d_u)$ е теоре-

тичният светлинен поток на единица разстояние след преминаване през вакуум; dU – разстояние.
Отчитайки уравнение (2), зависимостта се преобразува в (3).

$$T = \frac{E(d_u)}{E_{вакуум}(d_u)} \tag{3}$$

където: $E(d_u)$ е осветеността на единица разстояние след преминаване през атмосферата; $E_{вакуум}$ (du) е теоретичната осветеността на единица разстояние след преминаване през вакуум.
Чрез включване на изразите за $E(d_u)$ и $E_{вакуум}(d_u)$ от (1) в (3) и се отчете, че $E_{вакуум}(du)z=0$, то (3) се преобразува в (4):

$$T = e^{-zdu} \tag{4}$$

Комбиниране на (1) и (4) придобива вида:

$$E(d) = I\frac{T^{a/d_u}}{d^2} \tag{5}$$

Закон на Allard чрез използване на Тм за 1 морска миля
Като се има в предвид, че една морска миля е равна на 1852 метра, уравнение (5) се преобразува в (6). След опростяване се получава (7)

$$E(d) = I\frac{T_м^{\,d}}{(1852\frac{метри}{морска_миля}d)^2} \tag{6}$$

$$E(d) = \frac{I}{(3.43x10^6)d^2}\frac{T_м^{\,d}}{d^2} \tag{7}$$

Метеорологична видимост
Метеорологичната видимост е алтернативен начин да се опише изчезването заради атмосферата на обекта които се наблюдава, което по нагоре е описано като атмосферна пропускливост. Метеорологичната видимост е най-доброто разстояние при което черен обект с подходящи размери може да се види и разпознае в ден срещу хоризонта или при нощно наблюдение може да бъде видян и разпознат, ако общото осветление е повдигнато до дневни нива.
По дефиниция връзката между метеорологичната видимост (V) и пропускателна способност е:

$$V = \frac{\ln 0.05}{\ln T_м}d_u \tag{9}$$

където: V е метеорологичната видимост в морски мили; Тм е атмосферната пропускливост (бездименсионна) за една морска миля.

Премахвайки мерните единици и мерните единици за разстояние, се получава:

$$V = \frac{\ln 0.05}{\ln T_{м}} \tag{10}$$

Закон на Allard базиран на метеорологична видимост

$$E(d) = \frac{I}{(3.43x10^{6})} \frac{0.05^{\frac{d}{v}}}{d^{2}} \tag{11}$$

където: E(d) е осветеността в окото на наблюдателя [lx]; I – интензитет на светлината [cd]; d – разстояние [NM]; V е метеорологичната видимост [NM].

Изчисляване на необходим интензитет за осигуряване на видимост на светлоизточника

След преобразуване на (11) се получава изразът (12), който практически се използва за определяне на необходимият интензитет на светлинните източници

$$I = (3.43x10^{6}) E_{t} D^{2} (0.05)^{-\frac{D}{V}} \tag{12}$$

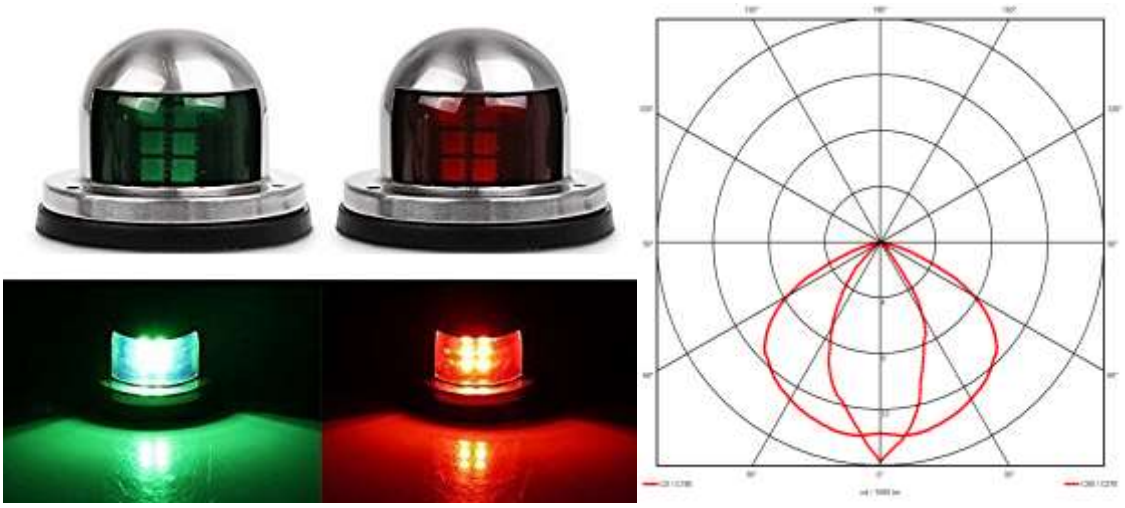
Номиналният обхват на морската сигнална светлина е разстоянието в морски мили, при което тази светлина предизвиква чувствителност в очите на наблюдателя: 2.10^{-7} lx за нощта и 1.10^{-3} lx за светлата част от денонощието. Следва да се приеме, че метеорологичната видимост V е равна на 10 морски мили (Тм = 0.7411) и че атмосферата е хомогенна.

Изразът (12) определя необходимият интензитет на светлинният източни в дадена посока, осигуряващ неговата видимост на определена дистанция D.

4. ТЕОРЕТИЧНО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАВИГАЦИОНИ СВЕТЛИНИ ЗА ПЛАВАТЕЛНИ СЪДОВЕ ДО 12 м. ДЪЛЖИНА

В настоящото изследване се поставя задачата да се определят идеалните светлоразпределения на навигационни светлини и да се сравнят с експериментални резултати.

В съответствие с STCW, за този клас плавателни съдове, необходимата минимална дистанция, от които светлините трябва да бъдат видими е: 5 мили за върхова (мачтова) светлина и 3 мили за странични опознавателни (зелени и червени).



Фиг.3. Изглед и светлоразпределение на странични опознавателни светлини.

Светлоразпределението на комплект фабрично произведени LED навигационни светлини е експериментално снето в лабораторни условия (фиг.3).

В съответствие с (12) за даденият тип плавателно средство се изчислява I_{DES} – желан. I_{DES} =15.2 [cd]. Светлоразпределенията в съответствие с STCW са съответно 360 градусово равномерно за бяла светлина и 112.5 градусови равномерни за странични опознавателни.

Следва да се реши задачата доколко действителното светлоразпределение съответства на теоретично желаното и ако са налице несъответствия, какви са последствията за рисковете от инциденти при корабоплаване.

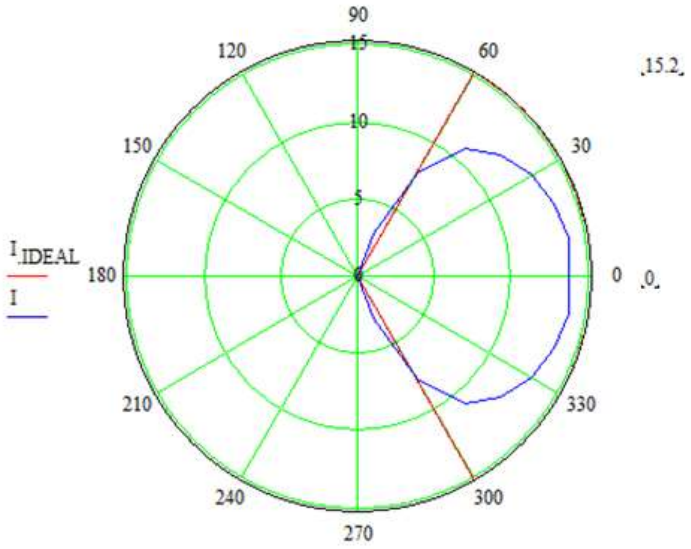
За да се реши тази задача е използван създаденият алгоритъм в среда MathCAD. Дискретните стойности на светлоразпределенията се задават в матрици, като при тяхното транспониране се получават матрици-стълбове, позволяващи използването на изчислителни процедури (13)

$$I := I^T \quad \text{и} \quad I_{DES} := I_{DES}^T \tag{13}$$

Това позволява построяването на светлоразпределенията в полярни координатна система и отчитане на матрица на разликите (14)

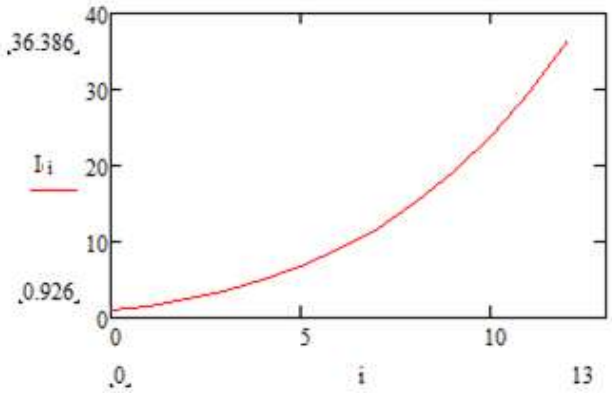
$$I_{DEV} := I - I_{DES} \tag{14}$$

От практическа гледна точка интерес представлява оценката на разликата в нивата на светлоразпределителните криви, т.е. намаляването на интензитета до какво намаляване на видимостта води. За получаването й е необходимо получаването на аналитичен вид функцията d=f(I) от (12) чрез дискретни стойности. Вида на функцията показва, че е невъзможно точното дефиниране. За целта е необходимо използването на итерационни методи (Нютон, Брест и др.).

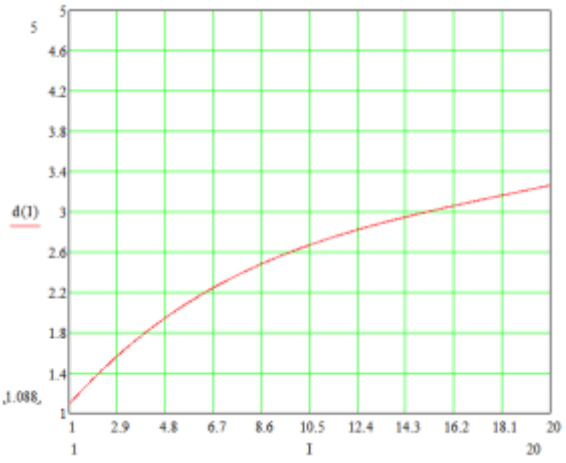


Фиг.4. Действително и идеално светлоразпределение.

В настоящото изследване се използва подход с използване на интерполационни полиноми на Лагранж. За да се осъществи това, първо уравнение (12) се решава за дискретен брой стойности (матрица D_i) – в случая i=12, което позволява построяване на графика за изменението на функцията (фиг.5), съответстващо на матрица от дискретни стойности I_i.



Фиг.5. I=f(i)



Фиг.6. d=f(I)

С вградените оператори на MathCAD с използване на интерполационни степенни полиноми (15) се получава изразът за обратната функция d=f(I), показана на фиг.6.

$$R := regress(I, D, 3) \qquad d(I) := iterp(R, D, I, d) \tag{15}$$

С помощта на функцията I(d) е възможно да бъде определено промяната на интензитета до каква промяна на видимостта води. В настоящото изследване за областта +30 до -30 градуса е налице недостиг от 2-3 [cd], т.е. спрямо оптимал-

ната видимост от 3 мили осигурявана от I=15.2 [cd] имаме намаляване на видимостта с 0.4 NM. За ъглите +60 и -60 отклонението е най-голямо и възлиза на 7.5 [cd] при което имаме намаляване на видимостта с около 0.7 -1 NM. Намаляването на видимостта всъщност води до намаляване времето за реакция на навигаторите, което е предпоставка за злополуки. Последното е свързано и със скоростта на движение на плавателните средства и възможността им за извършване на маневра. Отчитайки, че съвременните кораби се движат със скорости в порядъка 15-30 възела, то разстояние от 1 миля се изминава за около 2 мин. при максимална скорост. При нормирана видимост от 3 мили, общото време за реакция е 6 мин. и редуцирането му с 2 мин. в някои ситуации може да бъде съществено.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследването представя теоретични и експериментални изследвания на LED източници на светлина за корабно навигационно осветление. Представен е подход за определяне на намаляването на видимостта като функция от намаляването на интензитета, при стойности, различни от желаните.

Получените експериментални данни показват количествена и качествена оценка за разликите в светлоразпределенията на фабрично произведени LED източници, като е направена оценка за естеството на проблема и неговите измерения. Акцентирано е върху навигационното осветление на малки плавателни средства, които от своя страна са най-многобройни.

Резултатите могат да послужат както на светлотехниците, разработващи специализирани LED източници, така и на органите на Изпълнителна агенция морска администрация, по отношение оценка на първоначалният и последващ контрол на системите за навигационно осветление на малки плавателни съдове.

ЛИТЕРАТУРА

[1] IALA Recommendation I-200-2/2008 ***Marine Signal Lights, Calculation, Definition and Notation of Luminous Range***

[2] STCW, ***Rule 22, Maritime Rules, Collusion Prevention***

[3] IALA ***Recommendations on the determination of the luminous intensity of a marine aid-to-navigation light***

Автори: **Валентин Гюров,** доц. д-р, катедра „Електроснабдяване и електро-обзавеждане”, ТУ-Варна, E-mail address: *valentin.giurov@tu-varna.bg***; Христиан Панчев,** асистент, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, ТУ-Варна, E-mail address: *hr_panchev@abv.bg;* **Гинка Иванова,** асистент, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, ТУ-Варна, E-mail address: *ginkahivanova@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент:** доц. д-р Вълчан Георгиев

ОСОБЕНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕТО РЕКОНСТРУКЦИЯТА НА ОСВЕТИТЕЛНАТА УРЕДБА НА МАШИННО ОТДЕЛЕНИЕ НА КОНТЕЙНЕРОВОЗ В СЪОТВЕТСТВИЕ С IACS No143/2013

Валентин Гюров, Християн Панчев, Гинка Иванова

Резюме: *Доклада разглежда спецификите при проектирането, подчинени на различните стандартизационни изисквания за осветление на работни места и тези за специализирани корабни осветителни уредби. Изследването се базира на техническите специфики на реален обект – контейнеровоз въведен в експлоатация през 2004 г. с основно електрооборудване SAMSUNG. Разгледано е съществено от гледна точка техническа сложност, степен на значимост, рисков фактор за злополуки и наситеност с инженерни съоръжения помещение – корабно машинно отделение. Представя се подход за модернизация на осветлението с LED базирани източници на светлина, подчинено на редица експлоатационни ограничителни условия – простота на изпълнението, ремонтопригодност, унифицираност и независимост на доставките. Специално внимание е отделено на приложението на препоръките на IACS No 143/2013 "Human Element Recommendations for structural design of lighting, ventilation, vibration, noise, access and egress arrangements"за плавателни средства, целящи спазването на конвенцията за безопасност на корабоплаването STCW в комбинация със специализиран софтуер за проектиране Relux. Нуждата от извършването на такова изследване, целящо задълбочаване на знанията в областта, се обуславя от въвеждането на задължителни тематики за специалистите от област „Електрообзавеждане на кораба", в съответствие с изискванията на стандарт IMO 7.08 Electro-technical Officer.*

Ключови думи: *проектиране на осветителни уредби в кораби, енергийна ефективност в кораби*

SPECIAL FEATURES IN THE DESIGN OF RECONSTRUCTION OF THE LIGHTING SYSTEM IN ENGINE ROOM OF CONTAINER SHIP IN ACCORDANCE WITH IACS No143/2013

Valentin Gyurov, Hristian Panchev and Ginka Ivanova

Abstract: *The report examines the design specifications that are subject to the different standardization requirements for workplace lighting and for specialized ship lighting systems. The research is based on the technical features of a real object - a container ship put into operation in 2004 with SAMSUNG's basic electrical equipment. Considerable in terms of technical complexity, degree of significance, risk factor for accidents and saturation with engineering facilities – ship's engine room.*

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

An approach is being put in place to modernize lighting with LED based light sources, underpinned by a number of operating constraints - simplicity of performance, repair ability, uniformity and independence of supplies. Particular attention is paid to the implementation of IACS Recommendations No 143/2013 on "Human Element Recommendations for structural design of lighting, ventilation, vibration, noise, access and egress arrangements" for craft intended to comply with the Convention on the Safety of Ships STCW in combination with specialized software for Relux design. The need to carry out such a study aimed at deepening the knowledge in the field is conditioned by the introduction of mandatory thematic for the specialists in the area of "Electrical equipment of ships", in accordance with the requirements of IMO 7.08 Electro-technical Officer.
Keywords: *Lighting System Design**,** Energy Efficiency in Ships*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Повишаването на енергийната ефективност е един от актуалните проблеми в световен мащаб, който е актуален и за корабоплаването. През последните години бяха предприети редица нормативни изменения, целящи намаляването на общите енергийни разходи и електроенергията в частност [1,2]. Основният законодател в областта Lloyd Register въвежда два показателя, отрязващи комплексната енергийна ефективност на корабите – показател за енергийна ефективност при проектирането на корабите EEDI (Energy Efficiency Design Index) и показател при експлоатацията на корабите EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator). И при двата се цели икономия на първичен енергоносител – корабно гориво и намаляване на екологичното въздействие. Икономическият ефект е пряк и косвен – намаляване разходите за енергоносители и екологични преференции (намаляване такси за екологично въздействие, намаляване на пристанищни такси и др.). В тази връзка редица корабособственици предприеха мерки за подобряване на енергийната ефективност, като една от масово разпространените е ускорено въвеждане на енергийно ефективни LED източници на светлина. При такава реконструкция, спецификата на обектите определя и особености в техническите решения, които се разглеждат от настоящия доклад. Обект на изследването е машинна зала на контейнеровоз, притежаващ осветителна уредба с традиционни източници на светлина – луминесцентни лампи ниско налягане (НЛНН), серия Т8. Доклада представя проект за реконструкцията на осветителната уредба с използване на LED източници на светлина.

2. ОГРАНИЧИТЕЛНИ УСЛОВИЯ И НОРМАТИВНИ ИЗИСКВАНИЯ

Специфика на корабното електрооборудване е, че то подлежи на строга сертификация по време на изграждане и експлоатация. Дори и минимални реконструкции по отделни части от техническите системи са свързани със задължителна пресертификация, което в повечето случаи е бавен и скъп процес. По отношение на осветителните уредби в технологични помещения се налагат редица изисквания свързани със степента на защита и пожаробезопасност. Практиката

показва, че в повечето случаи се предпочита реконструкция на осветителните уредби с ретрофитни изделия – LED източници за същият стандарт на монтаж, при което нуждата от такава пресертификация отпада. Второ задължително условие е осигуряване на независимост на доставките – определени компоненти лесно да се набавят във всяка точка на Света и да бъдат унифицирани. Отчитайки горните съображения, настоящото проектно решение показва такъв тип замяна на източници на светлина – от ЛЛНН в LED, без да се извършва замяна на осветителите.

За осветителни уредби в кораби са валидни нормативни изисквания, определени в IACS No132/2013, разработен от International Association of Classification Society. Класификационните изисквания според типа помещение са показани в табл.1.

Таблица 1.

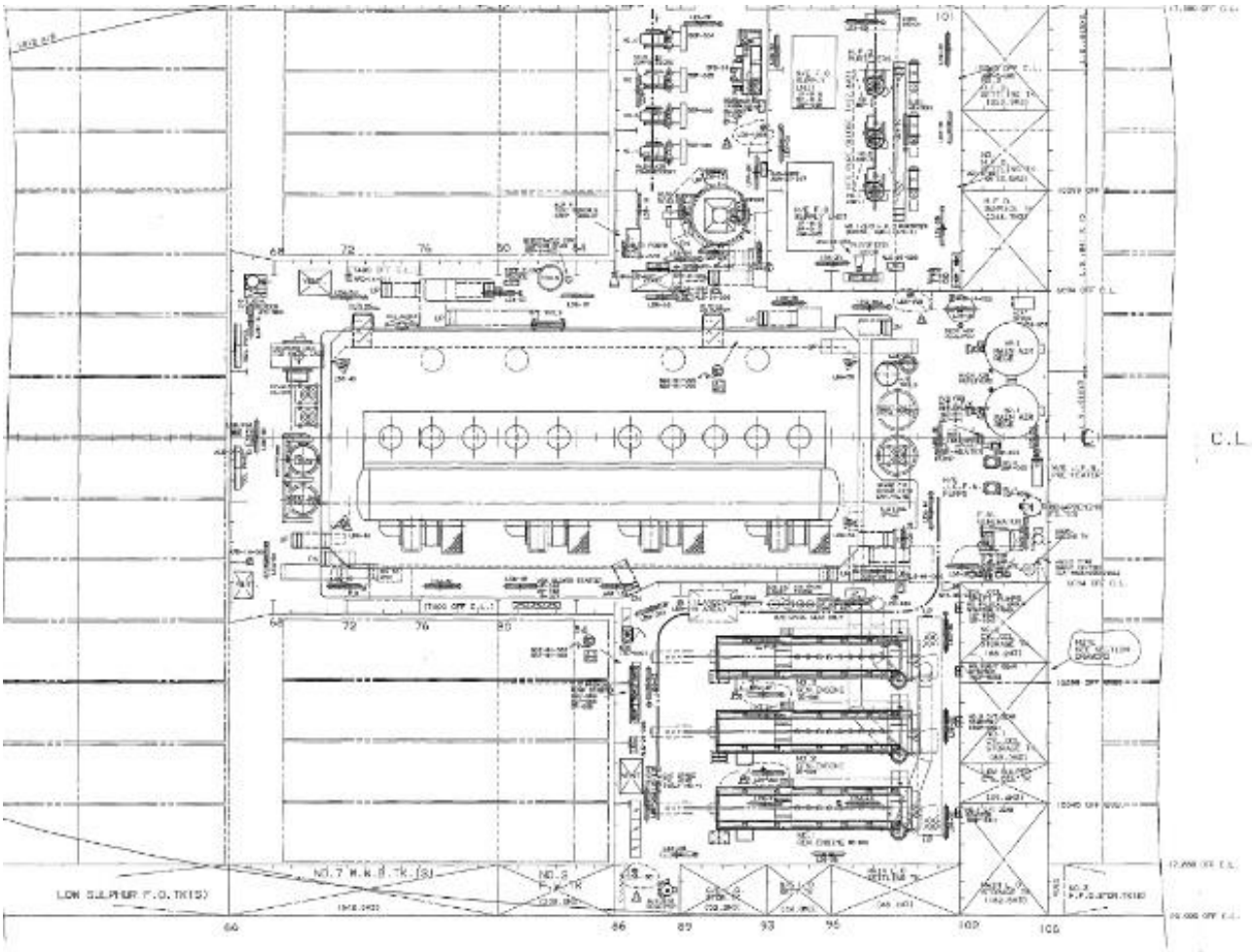
Нормативни изисквания IACS No132/2013

Space	*Illuminance Level in Lux*	*Space*	*Illuminance Level in Lux*
Machinery Spaces (General) Unmanned Machinery spaces	200 200	Cargo Holds (Portable Lighting) - General Lighting - During Cargo Handling - Passageways and Trunks	 30 300 80
Engine Room	300		
Generator and Switchboard Room Switchboard, transformer room Main generator room/switch gear	300 500 200		
Fan Room HVAC room	200 200	Inspection and Repair Tasks - Rough - Medium - Fine - Extra Fine	 300 500 750 1000
Motor Room	300		
Motor-Generator Room (Cargo Handling)	150		
Pump Room, Fire pump room Steering Gear Room Windlass Rooms Battery Room Emergency Generator Room Boiler Rooms	200 200 200 200 200 100	Workshops Paint Shop Workshop office Mechanical workshop Inst/Electrical Workshop	300 750 500 500 500
Bilge/Void Spaces	75		
Muster/Embarkation Area	200	Unmanned Machinery Room	200
		Shaft Alley	100
Cargo Handling (Weather Decks) Lay Down Area General Process and Utility area Loading ramps/bays	200 200 200 200	Escape Trunks	50
		Crane Cabin	400
Cargo Storage and Manoeuvring areas	350	Hand signalling areas between crane shack and ship deck	300

3. ПРОЕКТНО РЕШЕНИЕ

Сложността на средата в машинно отделение – наличието на различни технологични съоръжения с различни функции, предопределят нуждата от използването на различни изчислителни работни повърхнини. В настоящото изследване е избрано извършването на 3D проектиране със софтуер Relux, чрез който ще се извърши максимално точно пресъздаване на интериорната среда.

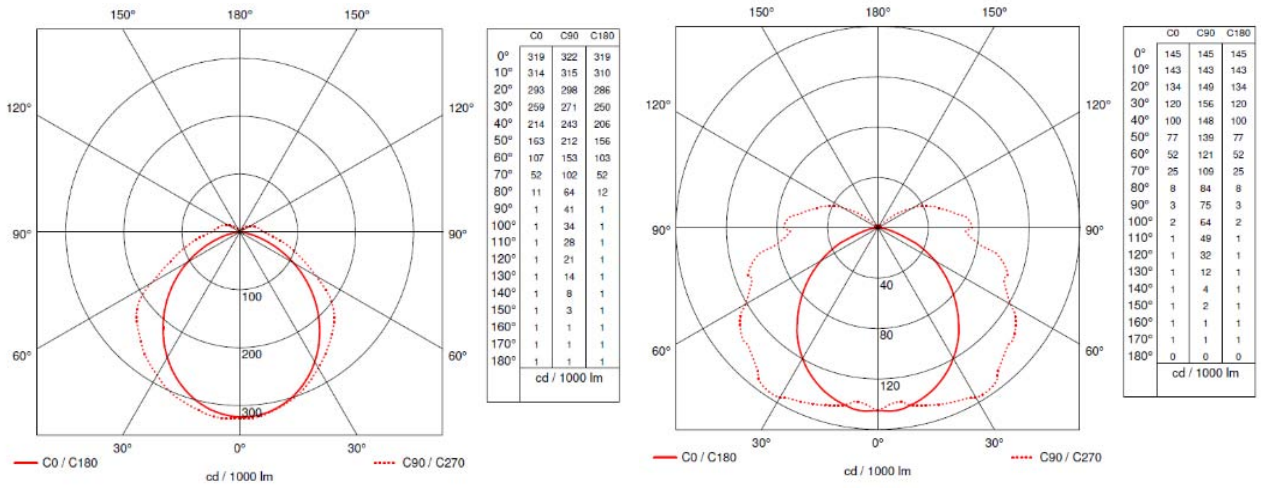
За да може да бъде оценена ефективността от проектното решение, се извършва вариантно проектиране на съществуващата осветителна уредба и на новото техническо решение. Планът на съществуващата осветителна уредба е показан на фиг.1.



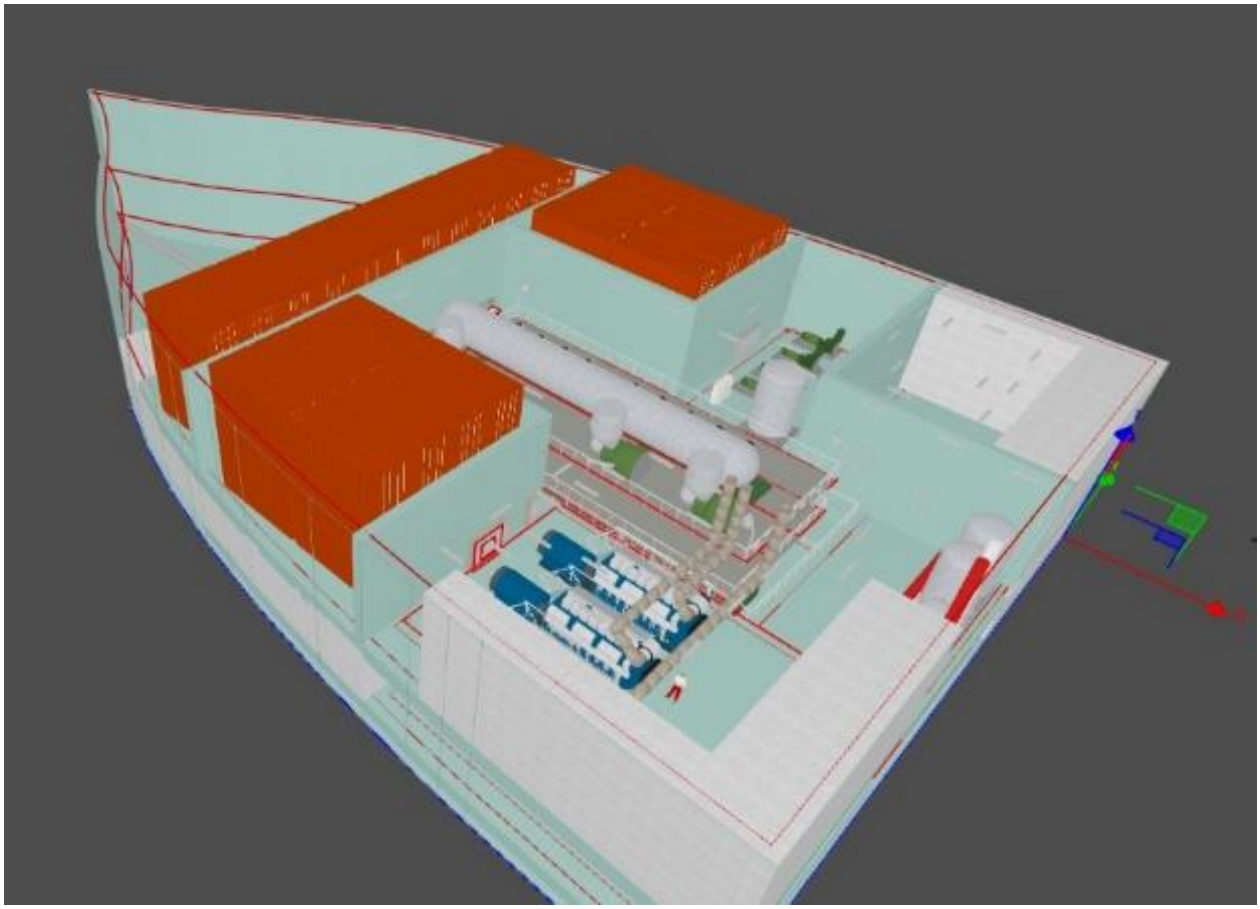
Фиг.1. План на машинно отделение с разположението на осветителите

Използваните осветители са ЛЛНН 2Х36W с конвенционален баласт, клас на защита IP55, монтирани на метални перфорирани лавици. Светлоразпределението на осветителите е показани на фиг.2 (ляво).

По конструктивният план от фиг.1 е създадена 3D възстановка на средата. Изгледи от симулационният модел са показани на фиг.3 и фиг.4. Параметри на осветителите са показани в табл.2.

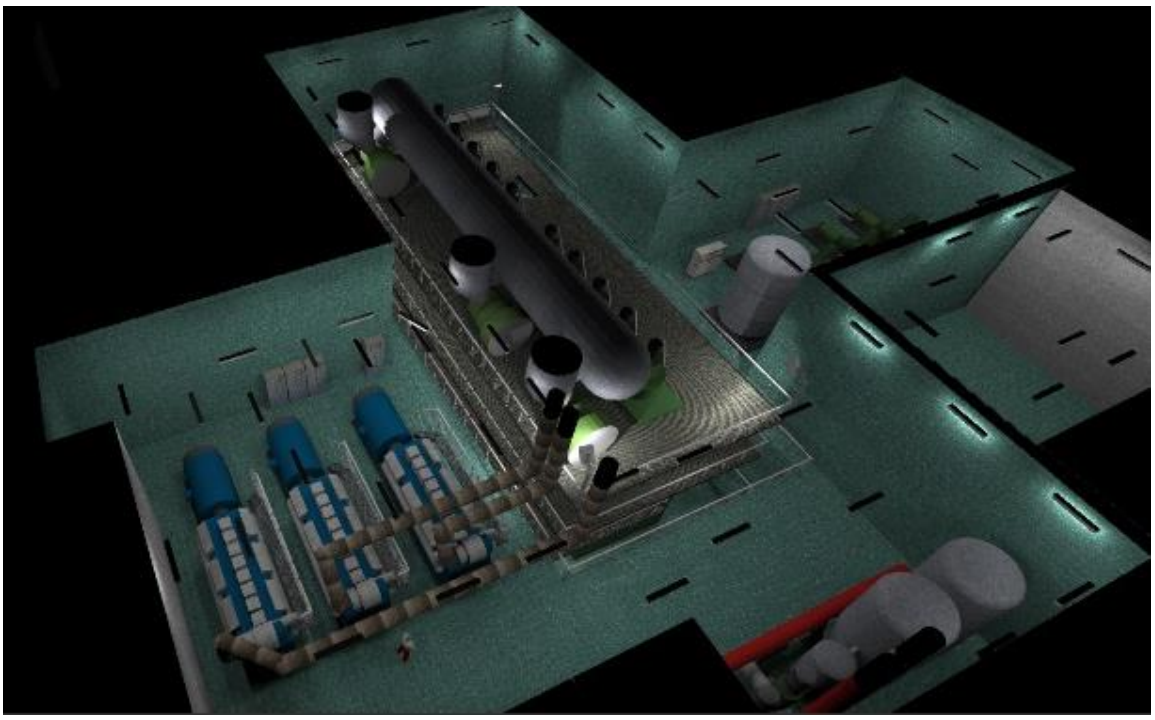


Фиг.2. Светлоразпределение на осветител 2x36W T8 при работа с ЛЛНН (ляво) и при замяната на лампите с LED T8 2x22W (дясно)



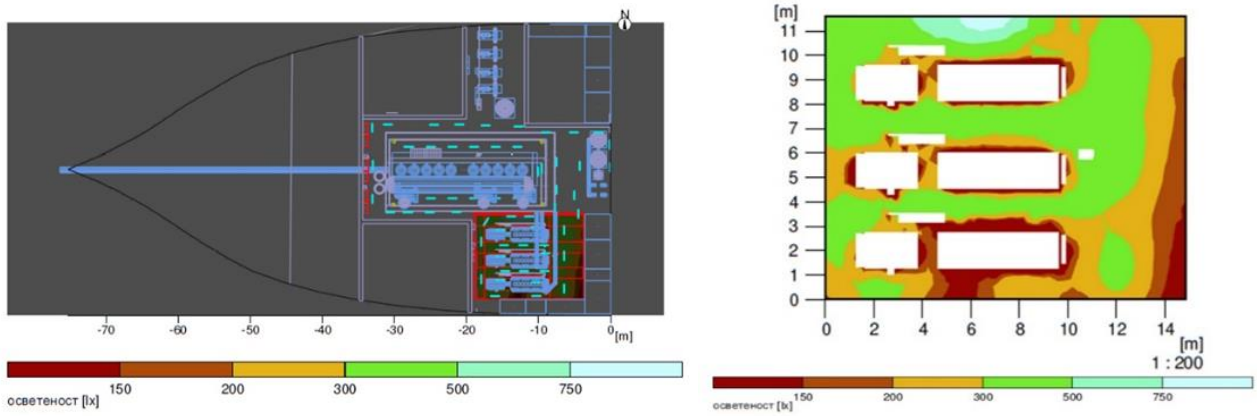
Фиг.3. Разрез-поглед на машинно отделение и разположение на технологичните съоръжения

При задаване на коефициентите на отражение на повърхнините са отчитани максимално близки по критерий стандартизирани повърхности, цветово означение на технологичните съоръжения, настилки и др.

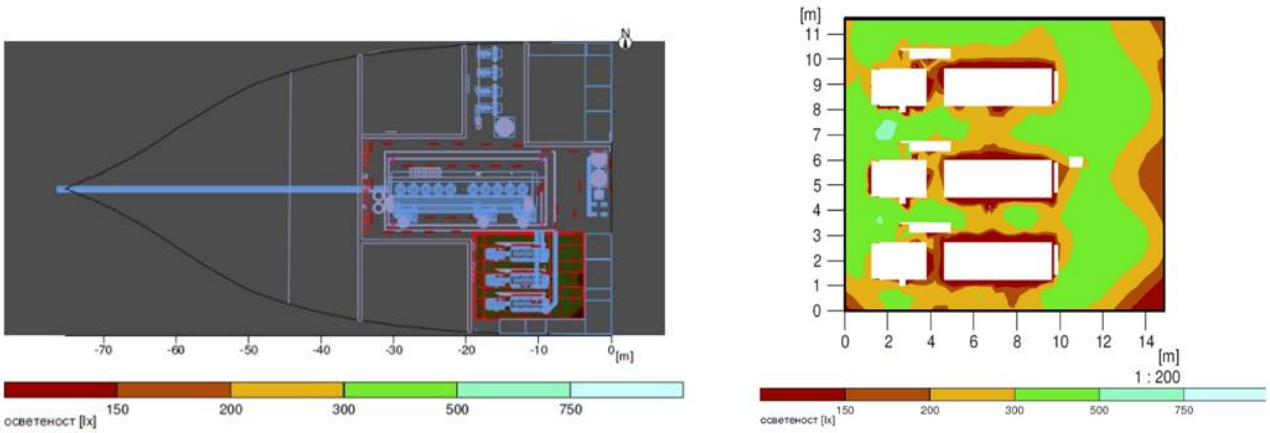


Фиг.4. Изглед на машинно отделение – 3D симулация на светлинната среда при ЛЛНН 2x36W T8 и LED 2x22W

Нивата на осветеност за генераторната част от машинно отделение за двата варианта на проектното решение са показани на фиг.5 и фиг.6.



Фиг.5. Нива на осветеност при ЛЛНН 2X36W T8



Фиг.6. Нива на осветеност при LED 2X22W T8

Сравнението между двете проектни решения е показано в табл.2

Таблица 2.
Светлотехнически и електрически параметри на проектните решения

Параметър	Вариант 1 ЛЛНН 2x36W	Вариант 2 LED 2X22W
Електрическа мощност за осветител $P_{ОСВ}$ [W]	76,6	44
Светлинен поток за осветител $Ф_{ОСВ.}$ [lm]	4485	3111
Брой осветители	22	29
$E_{СР}$[lx]	299	301
$E_{МИН}$ [lx]	67	73
$E_{МАКС}$ [lx]	868	515
Общ светлинен поток Ф[lm]	601500	383547
Обща мощност за площ (2189,75 м2) [W/m^2]	3,21	1,98
Обща мощност [W]	7038	4328

Годишната използваемост на осветителните уредби в машинно отделение е приблизително 8250 часа (непрекъснат режим). Консумираната електрическа енергия е съответно: Вариант 1: 58063,5 kWh; Вариант 2: 35706 kWh.

Икономията на електрическа енергия ще възлиза съответно на 22357,5 kWh/год. Средният специфичен разход за производство на 1MWh от корабни електроцентрали е 0.24 tHFO (тона тежко корабно гориво) [4]. Годишната икономия на първичен енергоносител ще бъде 5.36 tHFO, което при средни цени от 600usd/t се равнява на 3220 usd/год. Средната икономия, отнесена към един осветител ще бъде 111 usd. Отчитайки реална себестойност на две ретрофитни лампи LED22W, възлизаща на под 50usd, такъв тип реконструкция има много бърза възвращаемост – под 6 месеца.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеното изследване показва спецификите при проектирането реконструкцията на осветителната уредба на корабно машинно отделение. Използван е вариантен подход за обосновка ефективността на решението. Засегната е спецификата при оценка технико-икономическата ефективност-анализ спрямо първичен енергоносител. Получени са количествени оценки, доказващи високата ефективност от внедряването на LED източници на светлина в корабни осветителни уредби. Тази мярка е една от най-разпространените в практиката, като настоящото изследване показва обстойна обосновка за начините на проектиране на сложна по характер интериорна среда със съвременни софтуер-ни приложения, с които се постига обективна оценка за ефективността на проектното решение.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Lloyd's Register, ***Procedure for calculation and verification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI),*** No38, 2013

[2] Lloyd's Register, ***Guidelines for Determination of the Energy Efficiency Design Index***, 2013

[3] IACS No132/2013, International Association of Classification Society, ***Human Element Recommendation for Structural Design of Lighting, Ventilation, Vibration, Noise, Access and Egress Arrangements***

[4] Гюров, В., Г. Иванова, К. Недев, ***Изследване режимите на електропотребление на круизен кораб в режим на преход***, Годишник на ВВМУ „Н. Вапцаров" 2016

Автори: Валентин Гюров, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане", ТУ-Варна, E-mail address: *valentin.giurov@tu-varna.bg*; **Христиан Панчев**, асистент, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане", ТУ-Варна, E-mail address: *hr_panchev@abv.bg;* **Гинка Иванова**, асистент, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане", ТУ-Варна, E-mail address: *ginkahivanova@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Вълчан Георгиев

ВЛИЯНИЕ НА ВЪЗРАСТТА ВЪРХУ ВЪЗДЕЙСТВИЕТО ОТ ЛЪЧЕНИЯ В СИНЯТА ЧАСТ НА СПЕКТЪРА ПРИ РАЗЛИЧНИ LED ИЗТОЧНИЦИ

Камелия Николова, Ива Петринска, Димитър Павлов, Петя Джановска

Резюме: *Човешкото око е адаптирано да функционира в условията на оптични лъчения. Тези лъчения не само са свързани с визуалните възприятия, но оказват влияние върху важни физиологични функции. Освен това, излагането на лъчения с широк спектър на излъчване може да имат както полезно, така и вредно въздействие върху кожата и очите. Настъпващите с възрастта изменения в ретината имат съществено влияние върху потенциалните рискове от фотоувреждане. Настоящият доклад представя едно изследване на влиянието на възрастовите изменения върху количествата на ефективни фотобиологични величини при използване на експериментално заснети данни за спектъра на лъчение от различни LED източници с калибрирани средства на измерване.*
Ключови думи*: спектрална чувствителност на окото, възрастови изменения на човешкия зрителен анализатор, LED светлинни източници*

AGING OF THE HUMAN'S OCULAR MEDIA AND BLUE LIGHT EFFECTS FROM DIFFERENT LED SOURCES

Kamelia Nikolova, Iva Petrinska, Dimitar Pavlov, Petya Djanovska

Abstract: *The human eye is adapted to function in conditions of optical radiation. This radiation not only enables vision, but influences important physiologic functions. But along with its many beneficial effects, light exposure can also bring harm to both skin and eyes—not all of the wide range wavelengths spectrum of optical radiation have favorable impact. Retinal changes associated with age have significant influence over the potential for photodamage. The current paper presents an quantitative estimation of these changes depending on the observer's age with the use of calibrated measurements of the optical radiation from LED lighting sources with different spectrum.*
Keywords: *spectral sensitivity of the eye, aging of the ocular media, LED lighting sources*

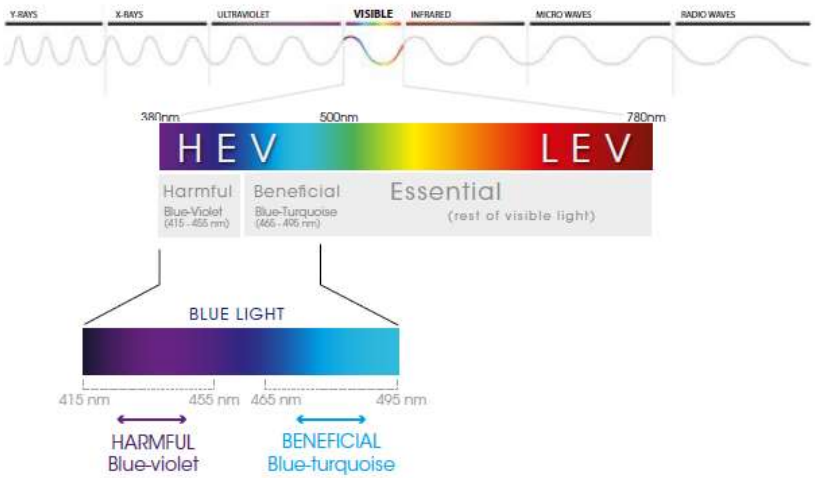
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електромагнитният спектър съдържа три участъка на оптично лъчение: ултравиолетови UV (с дължини на вълните в диапазона от 100 nm до 380 nm), видими (от 380 nm до 780 nm) и инфрачервени лъчения IR (от 780 до 10000 nm), фиг.1.

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

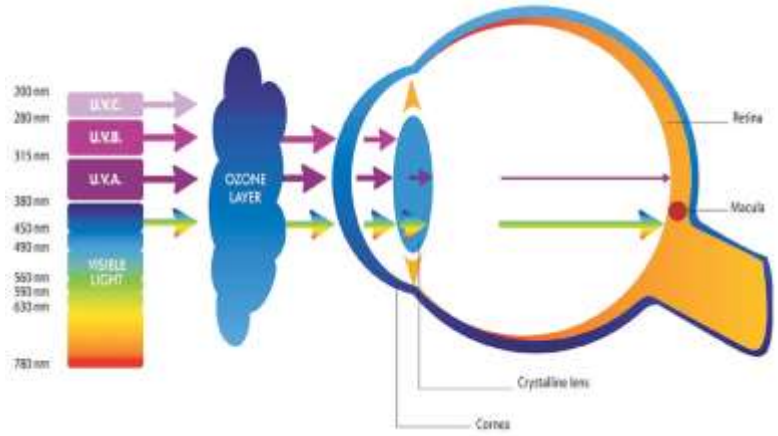
Лъченията в областта на късовълновия видим спектър се характеризират с най-голямо количество енергия, тъй-като енергията на фотоните е обратно пропорционална на дължината на вълната.



Фиг.1. *Електромагнитен спектър и оптични лъчения [13].*

Те включват, както вредни синьо-виолетови лъчения (415-455 nm), така и полезни синьо-тюркоазени лъчения (465-495 nm), участващи в нормалното функциониране на метаболизма при хората (циркадиални ритми и ефективна ендокринна дейност) [1,13].

Човешкото око може да бъде подложено на вредни и положителни въздействия, както от краткотрайно, така и от дълготрайно излагане на оптични лъчения от слънцето, изкуствените светлинни източници и цифровите устройства.



Фиг.2. *Поглъщане и пропускане на слънчеви лъчения в окото [1].*

Лъченията в UV и видимата част на спектъра са изследвани десетилетия наред и е установено, че могат да доведат до фотохимични увреждания на ретинните фоторецептори и епителните клетки на ретинните фотопигменти (retinal pigment epithelium cells). Съставът на лъченията бива филтриран от корнеата и кристалина на лещата. Те поглъщат голяма част от лъченията в UV и IR част на спектъра. До ретината на възрастните хора достигат 1 до 2% от UV лъченията на слънцето и IR лъчения с дължина на вълната по-малка от 980 nm, фиг.2 [2]. Здравото човешко око има естествена защита от UV лъчения, но по отношение на лъченията във видимата част на спектъра не са налични естествени защитни механизми.

2. ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА ЛЪЧЕНИЯ В СИНЯТА ЧАСТ НА СПЕКТЪРА

Фотохимични увреждания и токсикация на ретината може да се получат, както от краткотрайно, така и от продължително излагане на слънчева и изкуствена светлина и по-специално от въздействие на лъчения в синята част на спектъра [1, 7, 8, 9].

Лъченията с дължина на вълната от 300 до 500 nm се характеризират с високи енергийни нива на фотоните и в най-голяма степен допринасят за фотохимични увреждания на ретината. Зависимостта им от дължината на вълната е обратнопропорционална [7, 8, 10].

От друга страна лъченията в синята част на спектъра са важни не само за цветовите възприятия, но и за много невизуални процеси. Такива процеси са циркадиалния ритъм, регулирането на мелатонин, рефлекса на зеницата към светлина, когнитивни способности, настроение, двигателна система, памет и телесна температура [4, 5, 9].

Изследвания показват, че свиването на зеницата (естествената защита на окото при излагане на интензивно лъчение) зависи от дължините на вълните на лъчението и е максимално при 480 nm [1].

В последните години много се работи върху използване на филтриращи оптични прибори, които намаляват установените вредни въздействия от „синя светлина“.

Съществуват някои теоретични изследвания, които показват потенциалните отрицателни ефекти от филтрирането на лъчения в синята част на спектъра. Трябва да се има предвид, че тези лъчения осигуряват 35% от скотопичното виждане, 53% от реакцията на меланопсина, 55% от циркадиалната и 35% от s-конусообразната фоторецепция. Филтрирането им посредством използване на лещи може да елиминира 27-40% от падащата синя светлина в зависимост от оптичните свойства на използваните филтри. Това намаляване на фоторецепция на синя светлина може да се изрази във влошаване на цветното и скотопично виждане, както и върху циркадиалния ритъм на индивидите [9].

В случаите на използване на оптични средства за предпазване от дегенеративното влияние на синята светлина е много важен правилният им подбор и тяхното селективно действие. Някои изследвания на цветни лещи дават анализи на биологичните им ефекти, показвайки баланса между фотопротекция и фотоекспозиция при 445 nm.

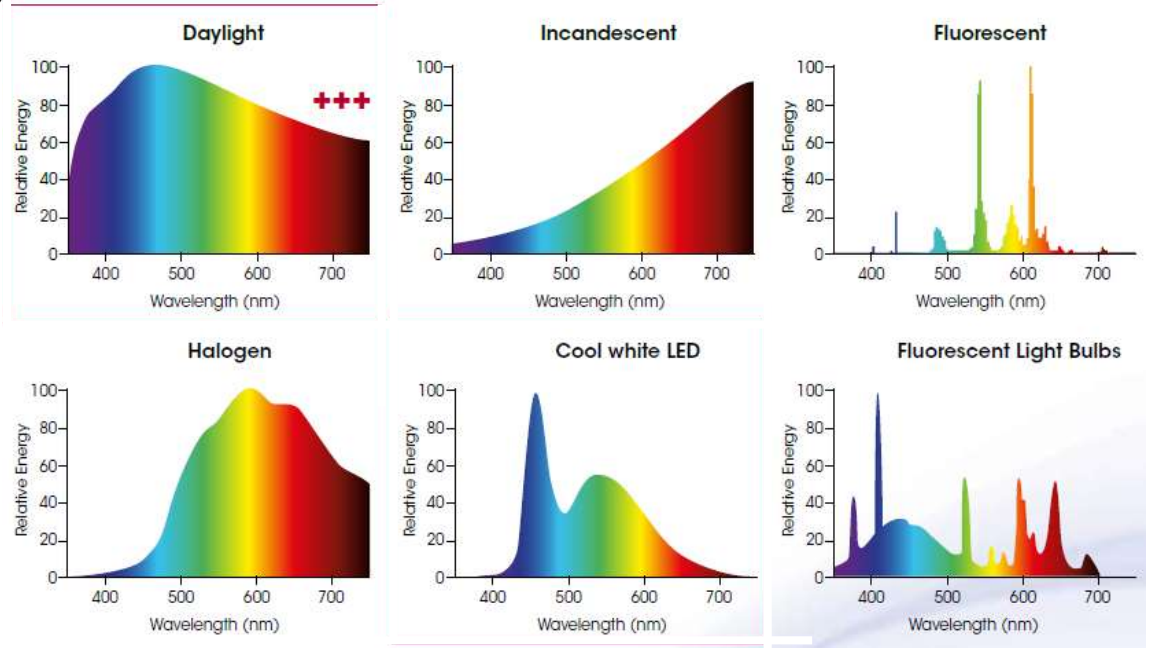
Налични са положителни резултати и при използване на филтриращи прозрачни лещи от пациенти със сухота на очите, особено при тези, пребиваващи дълго време на открито и работещи продължително със цифрови устройства [10,11].

Необходимо е намаляване на рисковите фактори за увреждане на ретината от наличие на синя светлина, като същевременно не се пренебрегва положителното и влияние върху циркадиалните ритми [12,13].

3. ИЗТОЧНИЦИ НА ЛЪЧЕНИЯ В СИНЯТА ЧАСТ НА СПЕКТЪРА

Спектралното разпределение на мощността на лъчение, характерно за различните източници се различава по отношение на дяла на лъченията в синята част на спектъра, фиг.3. Делът на лъченията в синята част на спектъра за слънчевата светлина е от 25 до 30%, в зависимост от нейните характерни особености. При изкуствените източници на светлина този дял е в много по-широки граници: от 3% при нажежаемите лампи до 35% при LED източници със студено бяла светлина [3,13]. За компактните луминесцентни лампи този дял е около 26%. Тенденциите към използване на енергийно-ефективни източници на лъчения определят светлинна среда с нарастващ дял на синята светлина.

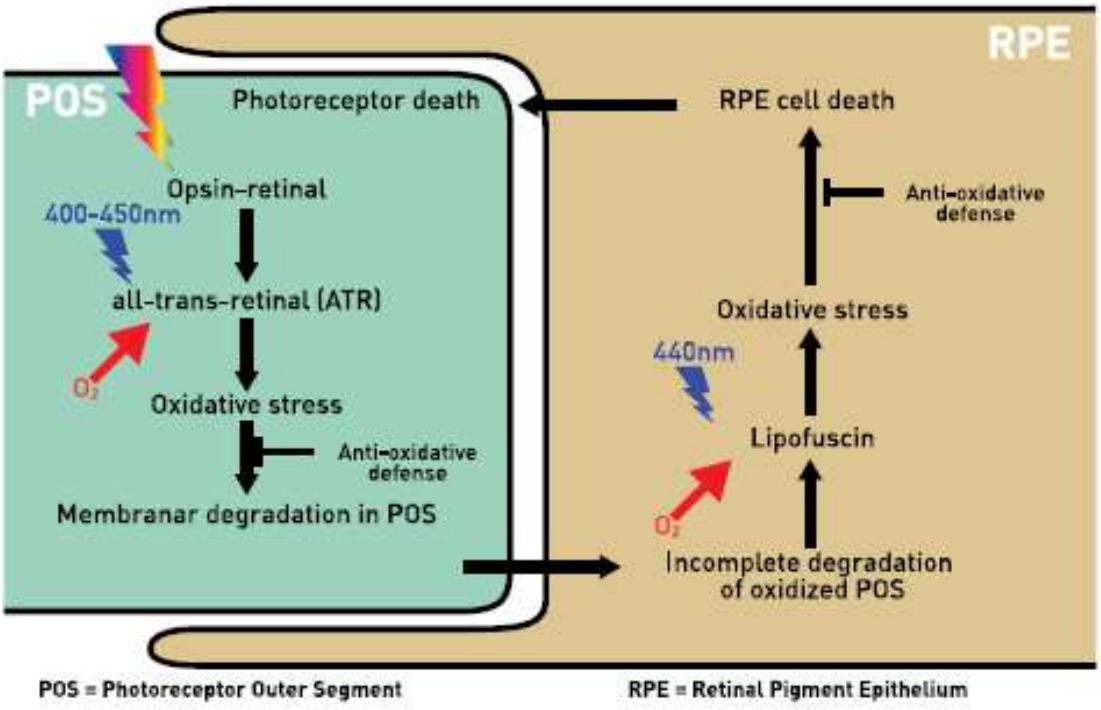
Промяната в ежедневните навици на населението от ранна възраст налага вземането предвид и на други източници на оптично лъчение, а именно екрани с LED фоново осветяване. Изследвания в различни държави показват, че в някои райони 90% от хората ежедневно гледат телевизия и/или работят с компютри, а 70% от тях използват смартфони почти всеки ден. Освен това продължителността на използване на тези устройства се увеличава с всяка изминала година. Друг факт, на който не се обръща достатъчно внимание е, че гледането в екрани нощно време може да въздейства на обхвата на разширяване на зеницата и да доведе до по-значими увреждания [13].



Фиг.3. *Спектрално разпределение на мощността на лъчение на различни светлинни източници [13].*

4. МЕХАНИЗЪМ НА УВРЕЖДАНЕ И ФОТОТОКСИКАЦИЯ НА РЕТИНАТА

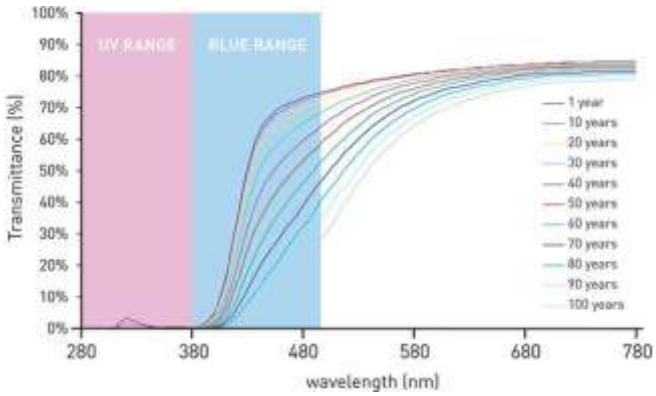
Синята светлина може да увреди, както фоторецепторите на окото, така и епителните пигментни клетки на ретината. Причината е натрупване на отпадъчния продукт липофусцин в гранулите на епителните пигментни клетки на ретината. Липофусцинът (познат като пигмент на възрастта) се натрупва с увеличаване на възрастта, както и при някои заболявания на ретината.



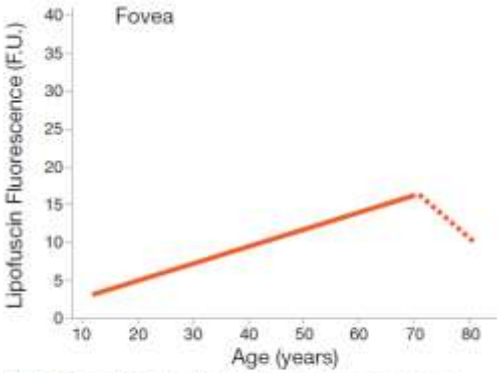
Фиг.4. *Фототоксикация на ретината [1].*

5. ВЛИЯНИЕ НА ВЪЗРАСТТА ВЪРХУ ПРОПУСКАНЕТО НА ОПТИЧНИ ЛЪЧЕНИЯ ОТ ЗРИТЕЛНИЯ АНАЛИЗАТОР

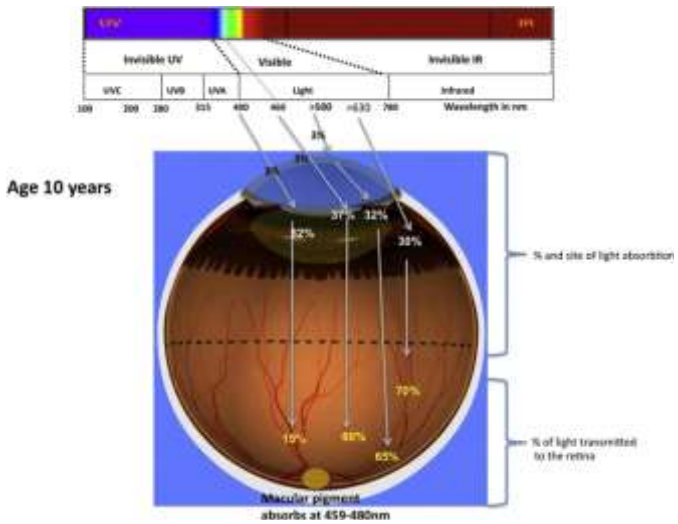
Промените в ретината с възрастта имат значително влияние върху фотоувреждания. С увеличаване на възрастта свойствата на пропускане и поглъщане на окото се променят, което се дължи на пожълтяване на кристалина на лещата. В резултат лещата пропуска по-малко видима светлина, като е характерно непропорционално намаляване, дължащо се на пожълтяването, фиг.5. Липофусцинът започва да се изгражда в ранните години и става забележим в епителните пигментни клетки на ретината при здрав човек на възраст 10 години, фиг.6.



Фиг.5.а. *Обща пропускливост на незащитен човешки зрителен анализатор в зависимост от възрастта (по данни от CIE 203:2012) [14]*



Фиг.5.б. *Обща пропускливост на незащитен човешки зрителен анализатор в зависимост от възрастта (по данни от CIE 203:2012)[15]*



Фиг.6. *Взаимодействие на видимата светлина (www.sciencedirect.com, Behar-Cohen et al. (2011)) [2].*

6. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ВЪЗРАСТТА ВЪРХУ ПРОПУСКАНЕТО НА ОПТИЧНИ ЛЪЧЕНИЯ В СИНЯТА ЧАСТ НА СПЕКТЪРА

Целта на изследването е да се оцени влиянието на измененията в характеристиките на зрителния анализатор с възрастта върху възможния риск от лъчения в синята част на спектъра при LED източници с различен спектър. От друга страна интерес представлява и сравнителен анализ на невизуалното въздействие върху меланопсин фоторецепторите, оказващи пряко въздействие върху цирка-диалните ритми.

Изследвани са различни видове LED светлинни източници, табл.1.

Таблица 1

Данни за измерваните LED светлинни източници

No	Описание		Мощност	ССТ, определена от измереното спектрално разпределение	L_B, W/(m².sr)
1	LED ретрофит лампа		7 W	3026 K	12,03
2	LED осветител за вграждане с вторична стъклена оптика		29 W	3510 K	23,91
3	LED осветител за вграждане с матиран разсейвател		100 W	5256 K	41,91
4	LED ретрофит лампа		7 W	5744K	70,23

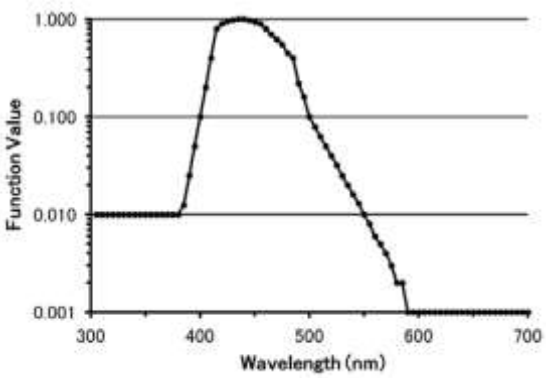
Експерименталното заснемане на спектъра на лъчение е извършено с калибриран спектрорадиометър Stellar Black Comet, с обхват 200-1100 nm в съответствие с EN 62471 и IEC/TR 62778 [16,17].

За целите на изследването са представени резултати при еднаква осветеност в равнината на измерване и съответните пространствени ъгли, определящи ъгло-

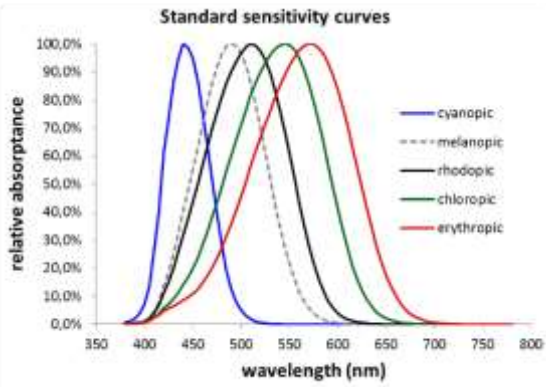
вия размер на източниците. Взети са предвид конкретните особености на изделията. Определянето на яркостта на източниците се извършва, съгласно т.5.2.2.2 на EN 62471.

За оценяване на потенциалния риск от синя светлина се определя лъчистата яркост на източниците $L_B(\tau)$, оценена със стандартната функция на спектрална чувствителност B(λ), фиг.7.а., и функцията на изменение на коефициента на пропускане на зрителния анализатор с възрастта τ(λ) [14, 16].

За количествено определяне на меланопичната облъченост $E_{E,z}(\tau)$ се използва облъчеността от източниците, оценена с функцията на спектрална чувствителност на вътрешните фоточувствителни ганглиеви клетки на ретината $s_Z(\lambda)$, фиг.7.б, и функцията на изменение на коефициента на пропускане на зрителния анализатор с възрастта τ(λ) [14, 17].



Фиг.7.а. *Функция на спектрална чувствителност за определяне на риска от наличие на синя светлина B(λ) (EN 62471:2008) [16]*



Фиг.7.б. *Стандртизирани криви на спектрална чувствителност за различните ретинни фотопигменти в човешкото око [17]*

Влиянието на общите изменения на зрителния анализатор с възрастта и съответните коефициенти на пропускане на оптични лъчения се отчитат с данните, показани на фиг.5.а.

Числените стойности на $L_B(\tau)$ [W/(m^2.sr)] за различните възрастови групи се определя от:

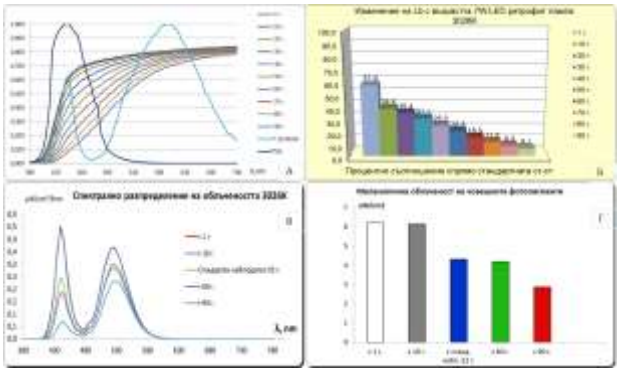
$$L_B(\tau) = \sum_{300}^{700} L(\lambda).B(\lambda).\tau(\lambda).\Delta\lambda, \quad (1)$$

където L(λ) е спектралната лъчиста яркост на източника, W/(m^2.sr.nm); B(λ) е функцията на спектрална чувствителност за оценяване на риска от лъчения в синята част на спектъра; τ(λ) е функцията на пропускане на зрителния анализатор в зависимост от възрастта; Δλ е спектралния интервал, nm.

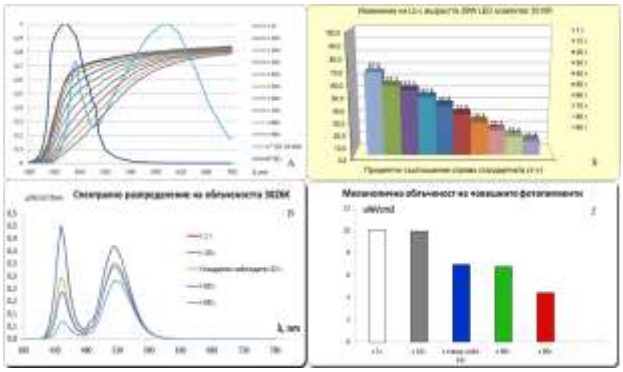
Числените стойности на спектрално оценената меланопична облъченост $E_{E,z}(\tau)$ [μW/cm^2] за различните възрастови групи се определят от:

$$E_{E,z}(\tau) = \sum_{300}^{700} E_{E,\lambda}(\lambda).s_Z(\lambda).\tau(\lambda).\Delta\lambda \quad (2)$$

където $E_{E,\lambda}(\lambda)$ е спектралната облъченост от източника, μW/(cm^2.nm); $s_Z(\lambda)$ е функцията на спектрална чувствителност на вътрешните фоточувствителни ганглиеви клетки на ретината; τ(λ) е функцията на пропускане на зрителния анализатор в зависимост от възрастта; Δλ е спектралния интервал, nm.

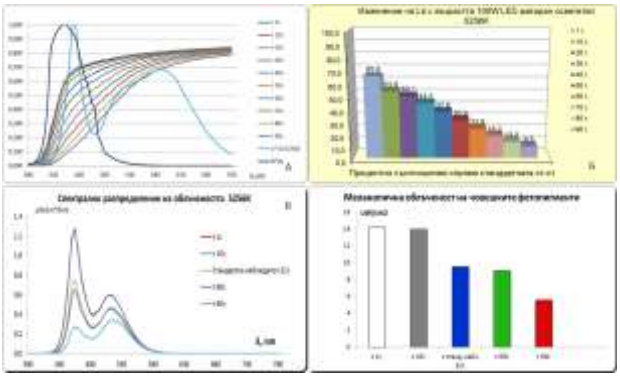


Фиг.8. *Резултати за LED ретрофит лампа със спектър на лъчение, съответстващ на CCT 3026K*

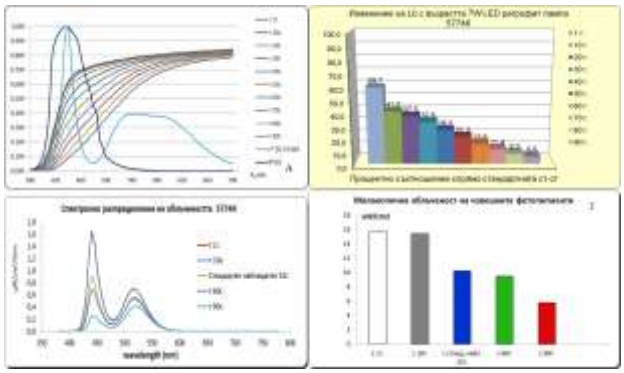


Фиг.9. *Резултати за LED ретрофит лампа със спектър на лъчение, съответстващ на CCT 3510K*

А. Измерено лъчение от LED източника ε*(λ), спектрална чувствителност B*(λ) и зависимост на τ(λ) от възрастта в относителни единици; Б. Зависимост на определената L_B от възрастта; В. Спектрално разпределение на лъчението, оценено с функцията на пропускане на човешкото око за различни възрасти и меланопичните фотопигменти;Г. Изменение на облъчеността на меланопичните фотопигменти при различни възрасти

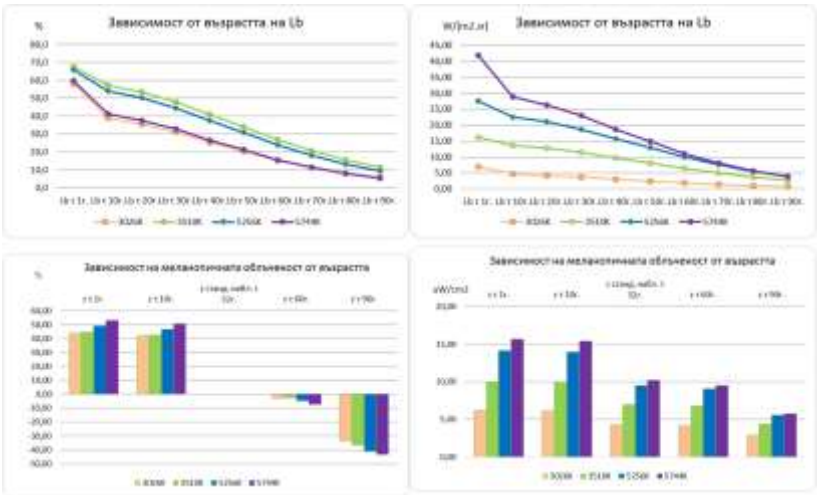


Фиг.10. *Резултати за LED ретрофит лампа със спектър на лъчение, съответстващ на CCT 5256K*



Фиг.11. *Резултати за LED ретрофит лампа със спектър на лъчение, съответстващ на CCT 5744K*

А. Измерено лъчение от LED източника ε*(λ), спектрална чувствителност B*(λ) и зависимост на τ(λ) от възрастта в относителни единици; Б. Зависимост на определената L_B от възрастта; В. Спектрално разпределение на лъчението, оценено с функцията на пропускане на човешкото око за различни възрасти и меланопичните фотопигменти; Г. Изменение на облъчеността на меланопичните фотопигменти при различни възрасти



Фиг.12. *Влияние на измененията в пропускането на човешкия зрителен анализатор и спектъра на лъчение на различните LED светлинни източници на количественото определяне на риска от наличие на синя светлина и меланопичната облъченост*

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменението на характеристиките на пропускане на човешкия зрителен анализатор оказват съществено влияние върху невизуалните процеси, протичащи в ретината, фиг.12. По-младите хора са по-чувствителни, както по отношение на риска от увреждане на ретина от наличие на лъчение в синьо-виолетовата част на спектъра, така и по отношение на формирането на меланопсин от лъчения в синьо-тюркоазената част на спектъра.

При количествено определяне на потенциалния риск от синя светлина за еднакви нива на осветеност изследването показва, че до ретината на незащитено око на дете на 1г. достигат между 58 и 68% от заснетите лъчения, които имат принос към определяне на количествените показатели. С увеличаване на възрастта количеството синя светлина намалява нелинейно, като при 90г. то е едва 6 до 11% от измереното. Възрастовите изменения също така водят до намаляване на разликите в ефективните стойности на величините (оценени с функцията на спектрална чувствителност на ретината) при различните източници. Тези разлики не надвишават 7% след 40-годишна възраст. За изследваните източници със спектрално разпределение на мощността им на лъчение, определящо посочените CCT, се наблюдава сходство между зависимостта на достигналия до ретината лъчист поток с изменение на възрастта при LED източници със CCT 3026K и 5774K. Аналогично сходство на зависимостите се наблюдават и при LED източници със CCT 3510K и 5256K. Процентните съотношения се определят от спектъра на оптично лъчение на източниците.

По отношение на облъчеността, оценена по функцията на спектрална чувствителност на фоточувствителните ганглиеви клетки на ретината също се наблюдават съществени изменения с възрастта. При 10 годишно дете облъчеността е от 42 до 50% по-висока от определената за стандартен наблюдател на възраст 32 години в зависимост от спектъра на лъчение на изследваните източници. При възраст до 60г. разликите в ефективните величини в сравнение със стандартния наблюдател са незначителни – до 8% по-ниски в зависимост от спектъра на лъчение на източниците. След тази възраст се наблюдава значителен спад. При 90г. определената меланопична облъченост за LED ретрофит лампа със CCT 5744K е с 43,5% по-ниска от тази на стандартния наблюдател.

За получаване на по-прецизно оценяване на невизуалните ефекти от оптичните лъчения е полезно да бъдат описвани всички налични данни при извършване на калибрирани измервания на спектъра на лъчение на източници. Определянето на оценените по дадена функция на спектрална чувствителност количества е целесъобразно да се извършва за конкретни условия и възрастова група наблюдатели.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ***Blue Light Hazard: New Knowledge, New Approaches to Maintaining Ocular Health***, REPORT OF A ROUNDTABLE, March 16, 2013, New York City, NY, USA

[2] Behar-Cohen F., C. Martinsons, F. Vienot, G. Zissis, A. Barlier-Salsi, J.P. Cesarini, O. Enouf, M. Garcia, S. Picaud, D. Attia, ***Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye?***, Progress in Retinal and Eye Research, Volume 30, Issue 4, July 2011, Pages 239-257

[3] Barrau C, Villette T, Cohen-Tannoudji D., ***Blue light: Scientific discovery***. Essilor. 2013 February; Pages1-49

[4] CIE TN 003:2015, ***Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry***, 2013

[5] Vilette T., ***Bad Blue , Good Blue, Eyes and Vision***, PDV N°68 Spring 2013

[6] Gronfier C., ***The Good Blue and Chronobiology: Light and Non-Visual Functions,*** PDV N°68, Spring 2013

[7] Okuno T., ***Hazards of Solar Blue Light***, *www.pointsdevue.com*, Spring 2013;

[8] Picaud S., E. Arnault, ***New discoveries and therapies in retinal phototoxicity***, PDV N°68, Spring 2013

[9] Neelam K., S. Wenting Zhou, K. Au Eong, ***The role of blue light in the photogenesis of age-related macular degeneration***, PDV N°71, Autumn 2014

[10] Loperfido F., A. Marchese, ***Exploring clinical evidence and the benefits of filtering out harmful light***, www.pointsdevue.com, July 2016

[11] Pardhan S., R. Sapkota, ***Eye complications of exposure to blue-violet light***, www.pointsdevue.com, September 2016

[12] Leid J., ***Blue Light: what are the risks to our eyes?***, www.pointsdevue.com, October 2016

[13] Dot C., Colombo L., Korobelnik J., Lamoureux A., Magan C. O.,Picaud S., Tolentino M., Wolffsohn J., ***Ocular light toxicity and the requirements for protection***, www.pointsdevue.com, April 2017

[14] CIE 203:2012, ***A Computerized Approach to Transmission and Absorption Characteristics of the Human Eye*** (Including Erratum 1)

[15] Delori FC, Goger DG, Dorey CK, ***Age-related accumulation and spatial distribution of lipofuscin in RPE of normal Subjects***, Invest Ophthalmol Vis Sci. 2001

[16] EN 62471:2008, ***Photobiological safety of lamps and lamp systems***

[17] IEC/TR 62778:2012, ***Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires***

Автори: Камелия Николова, гл. ас. д-р, катедра „Обща електротехника“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *knikolova@tu-sofia.bg*; **Ива Петринска**, доц. д-р, катедра „ECEOET“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ipetrinska@tu-sofia.bg*; **Димитър Павлов**, гл. ас. д-р, катедра „Обща електротехника“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *dpavlov@tu-sofia.bg*; **Петя Джановска**, докторант, катедра „ECEOET“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *petya.djanovska@gmail.com*.

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: проф. д-р Захари Иванов

ВЪРХУ ЕДНА ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ЗАГУБИ В АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ В ПРЕХОДЕН РЕЖИМ НА РАБОТА

Петко Петков, Димитър Димитров, Гинко Ангелов

Резюме: *В настоящата публикация се разглежда една възможност за определяне на електрическите загуби и енергия в преходен режим, основно в пусков процес на двигателя. Респектирани са времеконстантите формирани при протичане на електромагнитния и механичен преходен процес,както и продължителността на този процес във времето.За постигане на поставената цел е използвано математическо моделиране на асинхронен двигател в съчетание с теорията на „изобразяващия" вектор. Определените електрически загуби и енергия приоритетно са отчетени в активните съпротивления на статорните и роторни намотки на двигателя.*
Ключови думи: *електрически загуби, преходен режим, електрически двигател, теория на „изобразяващия" вектор*

ON A POSSIBILITY FOR DETERMINING ELECTRIC LOSSES IN INDUCTION MOTORS IN TRANSITIONAL OPERATION MODE

Petko Petkov, Dimitar Dimitrov, Ginko Angelov

Abstract: *In the work is considered an opportunity to determine the electrical energy transient losses, mainly in the starting process of the engine. The time constants formed during the electromagnetic and mechanical transition processes, as well as the prolongation of this process over time, have been taken into account. To achieve the target used mathematical modeling of asynchronous motor in combination with the current phasor theory. The determined electrical losses and energy are primarily defined in the active resistances of the motor stator and rotor windings.*
Keywords: *electrical losses, transients, induction motor, current phasor theory*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В редица електрически задвижвания, както в промишлеността, така и във водния транспорт в качеството на електрически гребни пропулсивни и подрулващи уредби на плавателните съдове се използват мощни асинхронни електро задвижвания от порядъка на десетки и стотици киловата.

Особено значение при реализиране на такъв вид електрически задвижвания се отдава на минимизиране на маховия момент на ротиращите части и прецизиране охлаждането на двигателите при промяна на електромагнитното им състояние в

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

пусков режим. Прецизиране на електрическите загуби и енергия в такъв преходен режим има и отношение към осигуряване на по-голяма енергийна ефективност при експлоатация на такива мощни електрически задвижвания с обосновано прилагане на ефективни методи и технически средства за тяхното управление.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНОТО ЕЛЕКТРИЧЕСКО ЗАДВИЖВАНЕ

Прилаганите класически методи за оценка на електрическите загуби и енергия в тези случаи се нуждаят от допълнително прецизиране. За целта в настоящата публикация се представя един подход, базиран на математическо моделиране на асинхронни двигатели в съчетание с използване теорията на „изобразяващия" вектор. Като изходни параметри за провеждане на математическото моделиране се използват тези, които съответстват на заместващата „Т"-образна схема на асинхронните двигатели [1] където:

r_s, $x_{s\sigma}$ – са съответно,активното и индуктивно съпротивление на разсейване на статорните намотки

r_r, $x_{r\sigma}$ – са съответно,активното и индуктивно съпротивление на разсейване на роторните намотки, приведени към статора

r_μ, x_μ – активното и индуктивно съпротивление в намагнитващия контур на двигателя.

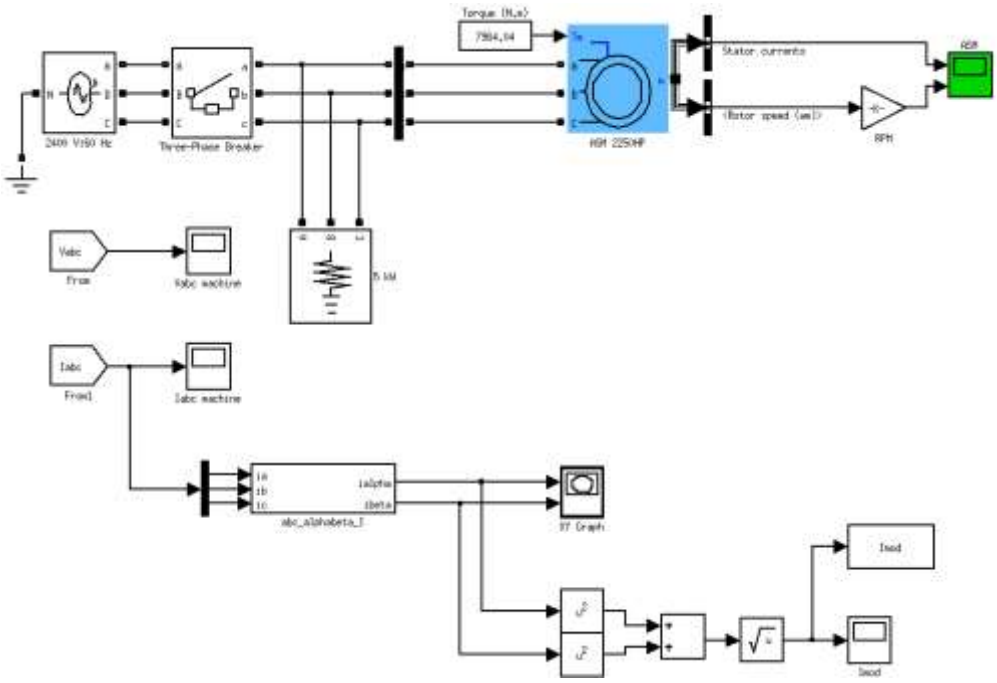
Тъй като в повечето случаи фирмите производители на електрически двигатели предоставят преобладаващо номинални данни като: $U_н$,$P_н$, $\omega_н$, $\cos\varphi_н$, $\lambda_п$, $\lambda_м$ и GD^2p, то от тези данни,чрез използване на утвърдени в практиката практично-приложни подходи [2], могат да се определят необходимите за математическото моделиране данни с използване на „MATLAB-Simulink" – програма, при която е използван математически модел на „Парк - Горев".

В настоящата публикация са поместени резултати от изследване на асинхронно електрозадвижване със следните данни на двигателя: $U_н = 2400$ V, $P_н =$, 1.6785 MW, $\omega_н = 1785$ min^{-1}, $\cos\varphi_н = 0.96$, $\lambda_п = 0.6$, $\lambda_м = 2.3$ и $J = 47.2$ kgm^2. Оценен е преходен процес на развъртане при $M_c = 7964$ Nm.Определените параметри по заместващата „Т"-образна схема са както следва:

$r_s = 0.029\ \Omega$, $x_{s\sigma} = 0.226\ \Omega$, $r_r = 0.022\ \Omega$, $x_{r\sigma} = 0.226\ \Omega$, $x_\mu = 13.04\ \Omega$

На фиг.1 е показана схемата на проведената симулация.

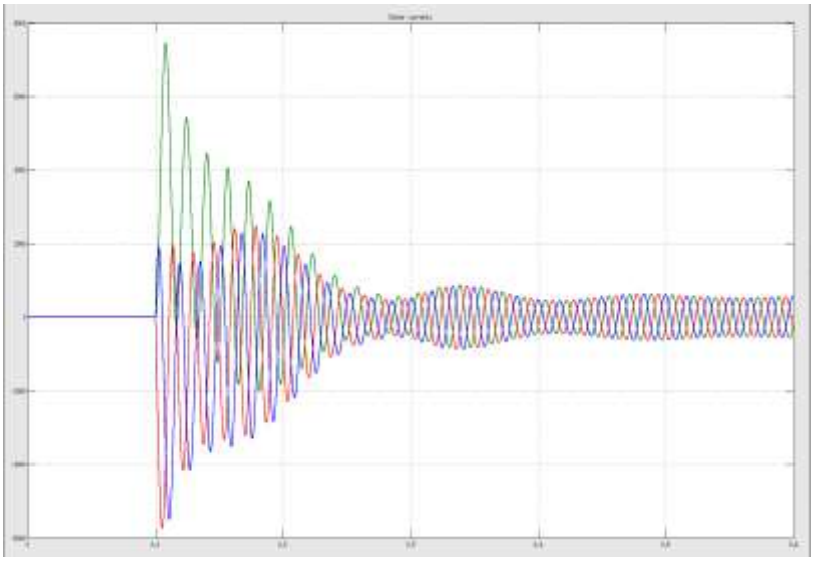
Резултати от изследване изменението на потребявания от асинхронния двигател ток, в пусков режим и до неговото затихване в установен режим, са отразени на фиг.2, в различен момент на неговото включване по отношение на напрежението. На фиг.2.а е показано изменението на пусковия ток тогава, когато електро задвижването се стартира при преминаване на напрежението на фаза „А" през нулата, а на фиг.2.б, когато то е изместено на 90 градуса. От получените моментни стойности на тока на асинхронния двигател се вижда, че влиянието



Фиг.1.

върху тяхното изменение, от момента на включването на двигателя, е по отношение изменението на захранващото напрежение във времето.

Това се отразява върху изменението на отделните стойности на токовете в съответните фази, но не и на времето за установяване на преходния процес.

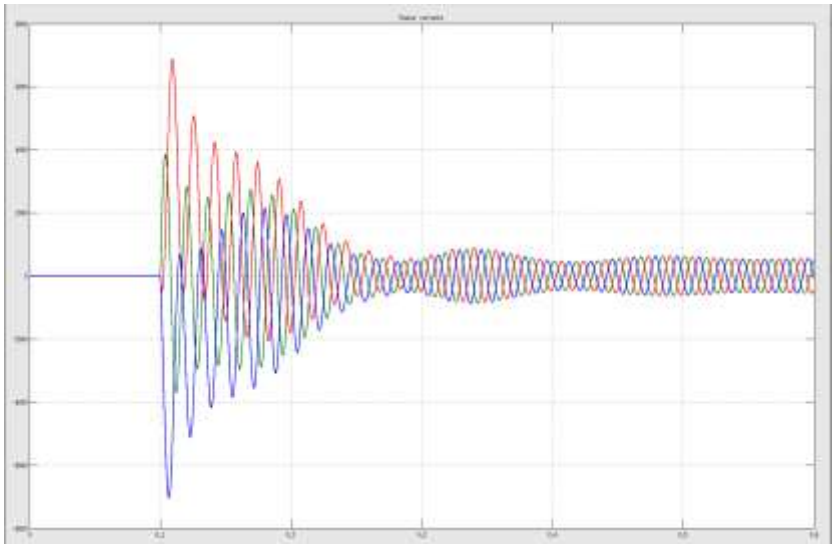


Фиг.2.а.

Това се дължи на промяната на съответните апериодични съставки на фазните токове, което се явява функция от момента на включване на двигателя по отношение на захранващото напрежение.

За количествена оценка на загубата на мощност в преходен и установен режим, съгласно предлагания подход е представено изследване на специализиран асинхронен двигател тип „AZIPOD”, използван като двигател на плавателен съд. Тези

двигатели се характеризират с много удължена външна конструкция. Това се отразява върху диаметъра на ротора, който е силно намален като размер за сметка на неговата дължина. При това положение роторите имат сравнително малки махови маси (инерционни моменти) за техните мощности. Това се отразява върху времетраенето на преходния процес, който в разглеждания случай е около 1 секунда.



Фиг.2.б.

3. МЕТОД НА „ИЗОБРАЗЯВАЩИЯ“ ВЕКТОР

За да се рационализира подхода с отчитане променливия характер на апериодичните съставящи, възникващи в зависимост от момента на включването на напрежение, то трите фазни тока *ia, ib, ic* от неподвижната трилъчева координатна система *„a,b,c”*, се преобразуват в еквивалентна ортогонална неподвижна координатна система *„αβ”* , като токове *iα,iβ* се определят по зависимостта (1).

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_a \\ i_\beta &= \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}} \end{aligned} \tag{1}$$

Така преобразуваните токове *iα, iβ* могат да формират „изобразяващ” вектор на тока, който да носи пълна и еднозначна информация за настъпващите процеси в двигателя, по отношение на потребявания от него ток, като се използва израза:

$$I_{\alpha\beta}(t) = i_\alpha + j i_\beta \tag{2}$$

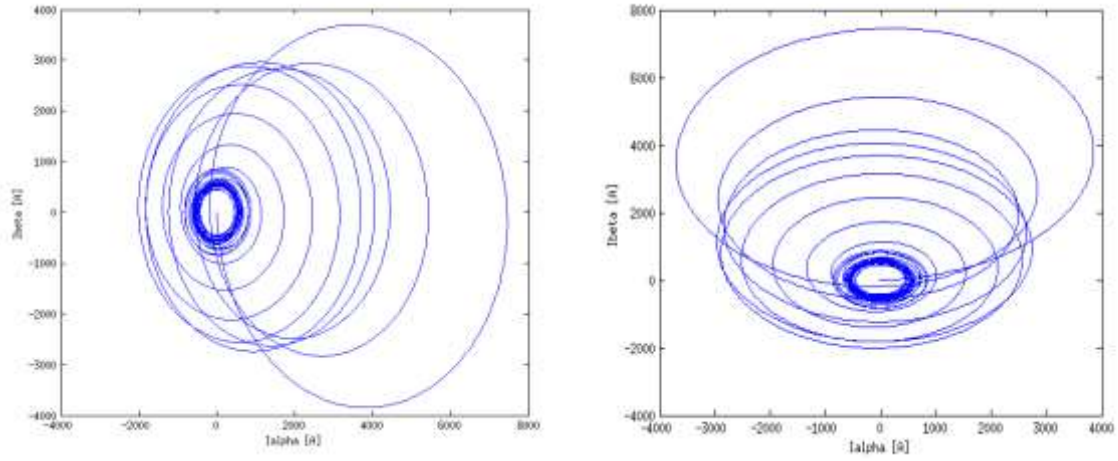
или

$$I_{\alpha\beta}(t) = |I(t)| e^{j\alpha} \tag{3}$$

където $|I(t)|$ представлява модула на „изобразяващия” вектор; α - фаза на изменение във времето на „изобразяващия” вектор.

На фиг.3 е показан ходографът на „изобразяващия” вектор на тока на асинхронния двигател в пусков режим. Ходографът на „изобразяващия” вектор на тока, съгласно фиг.3.а, е получен при включване на асинхронния двигател, когато напрежението на фаза „А”, в режим на пускане на двигателя преминава през нулата.

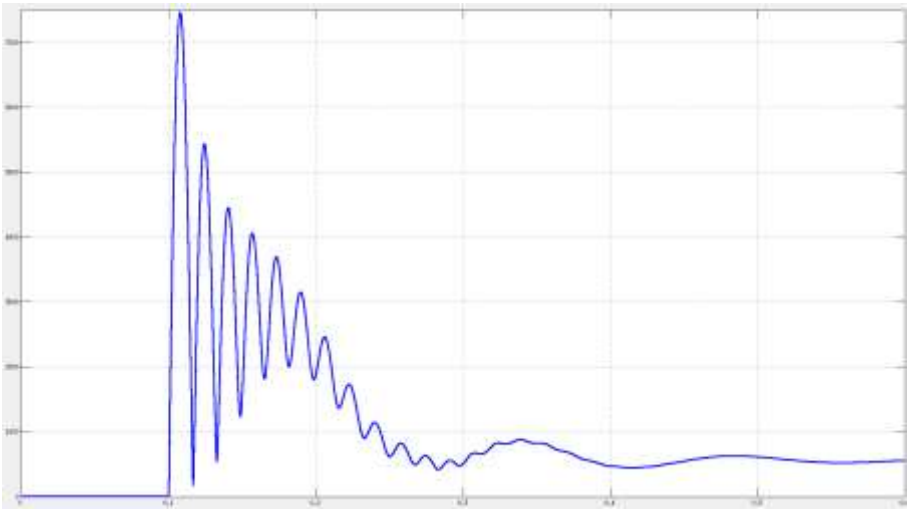
На фиг.3.б напрежението на фаза „А”, в режим на пускане на двигателя е дефазирано на 90 градуса. От съпоставянето на двата ходографа се вижда, че най-големият радиус вектор на двата ходографа остават едни и същ, но ходографите са завъртяни в равнината. Това означава, че при различни моменти на включване на двигателя, по отношение на трифазното захранващо напрежение отделните апериодични съставящи на фазните токове, сумиращи се с периодичните съставящи, се менят, но най-голямата стойност на пускови ток, като



а б

Фиг.3.

„ударна” такава, остава постоянна. При проведеното изследване е получено и изменението на модула на изобразяващия вектор на тока $|I(t)|$ във функция от времето (фиг.4).



Фиг.4.

От фиг.4 се вижда изменението на модула на „изобразяващия „вектор на тока, получен в резултат от едновременното действие на трите фазни тока с отчитане влиянието на много определящи съставки и величини като: апериодични и периодични съставки на фазните токове, времеконстантите на затихване на апериодичните и периодичните съставящи, както и въздействието на механичната

времеконстанта на задвижването, влияеща върху изменението на хлъзгането при развъртане на двигателя. Като се има предвид възможността за определяне изменението на модула на „изобразяващия" вектор $|I(t)|$ на тока и времето за протичане на електромеханичния процес на развъртане на двигателя, то електрическата енергия отделена в двигателя и преобразувала се в топлина, основно в активните съпротивления на статора и ротора на машината, то съгласно [2], може да се определи с израза:

$$\Delta E = \frac{3}{2} r_{IM} \int_0^{t_{tr}} |I(t)|^2 \, dt \tag{4}$$

където:

- r_{IM} представлява сумарното активно съпротивление на асинхронния двигател т.е:

$$r_{IM} = r_s + r'_r \tag{5}$$

- r_s - представлява активното съпротивление на статора;

- r'_r - представлява активното съпротивление на ротора, приведено към статора;

- $|I(t)|$ - представлява модул на „изобразяващия„ вектор на тока на асинхронния двигател в пусков режим на работа.

Средната стойност на електрическите загуби в пусков режим на работа се определят от равенството:

$$\Delta P = \frac{\Delta E}{t_{tr}} \tag{6}$$

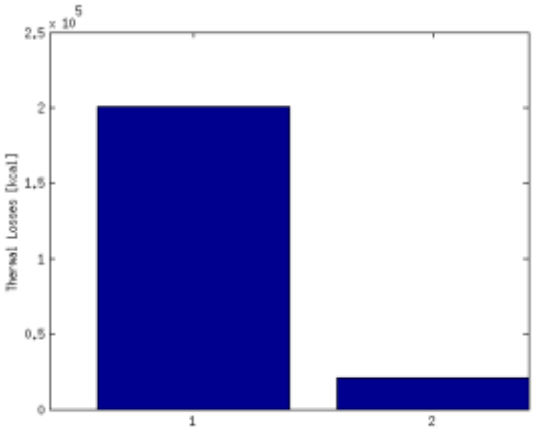
където: t_{tr} – време за развитие на електромагнитния процес на развъртане на асинхронния двигател до достигане на установен режим.

4. РЕЗУЛТАТИ

Систематизираните резултати от изследването на избрания двигател са представени в табличен вид в табл.1 и графично на фиг.5.

Таблица 1

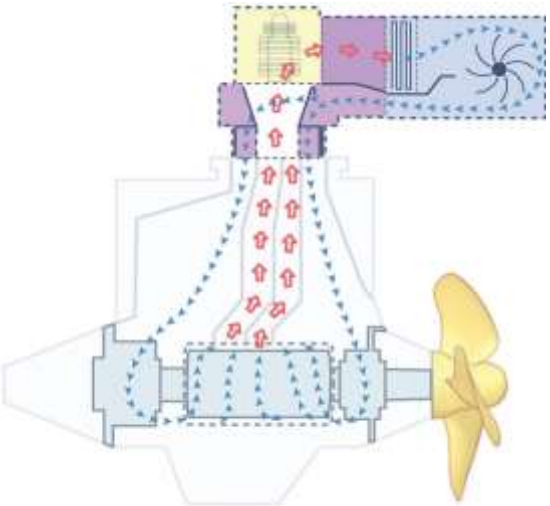
Преходен режим	Установен режим
ΔEtr= 233.71 kWh	*ΔEn= 23.79 kWh*
ΔEtr = 200955.29 kcal	*ΔEn = 20471.79kcal*
ΔPt = 467.42 kW	*ΔPn = 59.47kW*



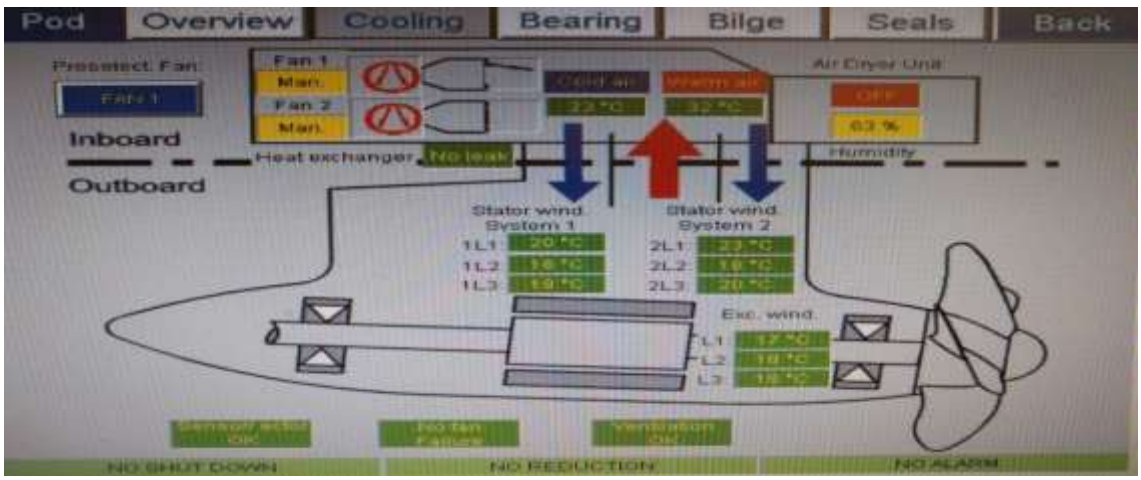
Фиг.5.

Определянето на ΔE и ΔP в преходен режим на работа на асинхронните двигатели с отчитане на електромагнитните и механични съставки създава възможност за прецизиране на процеса, свързан със загряването на мощни двигатели и по-ефективно управление на техните системи за принудително охлаждане. На фиг.6 е показано примерно изпълнение на мощен пропулсивен двигател, а на фиг.7 система за принудителното му охлаждане с нива на съответни температурни настройки фиг.8

Фиг.6.



Фиг.7.



Фиг.8.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеният подход има за цел да покаже една възможност за повишаване прецизността на отчитане на загубите на електрическа енергия в тези тежки за задвижванията преходни режими с оглед оптимизиране управлението на охлаждащите системи и реализиране на съответна енергийна ефективност при експлоатацията на подобни мощни електрически задвижвания.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Mohan N. (2014), ***Advanced Electric Drives – Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink*** , John Wiley&Sons, Inc. 2014

[2] Георгиев Г.А. (2012), ***Изследване на възможности за въздействие върху енергийната ефективност в корабни електроенергийни системи-***Дисертация, Висше Военноморско Училище „Н. Й. Вапцаров" –Варна, 2012

[3] Сыромятников И.А. (1984), ***Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей***, Москва, ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Автори: Петко Петков, доц. д-р, Технически Университет - Варна; **Димитър Димитров**, д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане", Технически Университет - Варна, E-mail address: *dimitrovdm@ieee.org*; **Гинко Ангелов**, д-р от Бургаски свободен университет.

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Георги Тодоров

ОПТИМИЗИРАНЕ РАЗМЕРИТЕ НА РОТОРА НА СИНХРОННА МАШИНА С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Цветомир Стоянов, Радослав Спасов, Пламен Ризов

Резюме: *В статията са дадени и анализирани резултатите от изследване на размерите на постоянните магнити в ротора на синхронна машина с V-образно разположени постоянни магнити, използвана при хибридни автомобили. Анализът е направен на база на първи хармоник на магнитната индукция във въздушната междина. Проведени са изследвания за постигане на размагнитване на машината.Изследванията са извършени чрез моделиране на магнитното поле в среда на програмния продукт FEMM и разработени програмни модули за изчисляване на хармоничният състав на магнитната индукция.*
Ключови думи: *синхронни двигатели с постоянни магнити, метод на крайни елементи, хармоничен състав*

OPTIMIZATION OF THE ROTOR'S SIZES OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE

Tsvetomir Stoyanov, Radoslav Spasov, Plamen Rizov

Abstract: *The results from a study of the magnet's sizes in V-shaped permanent magnet synchronous machines, used in hybrid cars, are presented and analyzed in the paper. The analysis based on the main harmonic of the magnetic flux density in the air gap. Also has been made a demagnetization researches. The analysis is performed by finite element magnetic field modeling and program modules for of magnetic flux density and total harmonic distortion coefficient calculation.*
Keywords: *Finite element method, permanent magnet synchronous machine, harmonic distortion coefficient*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Синхронните машини с V-образно разположени вкопани постоянни магнити (СМПМ) в ротора са често използвани в електрозадвижванията на хибридни автомобили. Това се дължи на следните им предимства: висока ефективност, голям скоростен диапазон и високо съотношение размери/мощност [3, 5]. Особено важно е оптималното определяне на размерите на постоянните магнити. От една страна те определят характеристиките на СМПМ, а от друга страна, високата им и често променяща се цена, води до определяне на цената на проектираната машина. Поради изискването към задвижващия електродвигател да работи в широк скоростен диапазон [1,2] е необходимо намаляване на основния магнитен поток чрез размагнитване на машината.

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Целта на настоящия доклад е посредством моделиране на магнитното поле в синхронни машини с V-образно разположени постоянни магнити и хармоничен състав на кривата на магнитната индукция във въздушната междина да се определи:

- при константен обем на постоянните магнити да се определят оптималните им размери;

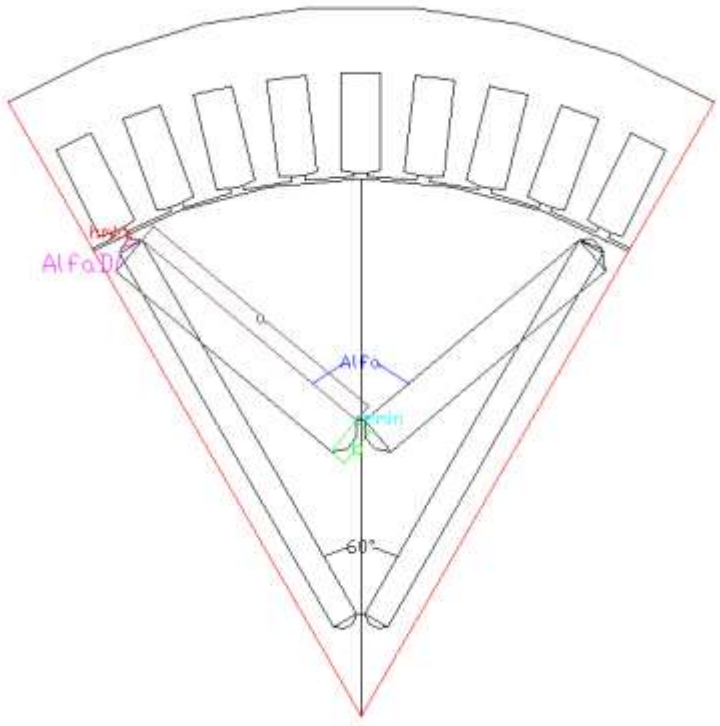
- хармоничния състав на кривата на магнитната индукция във въздушната междина, при всяко съотношение на размерите на магнита;

- обработка на получените резултати за бъдещото им използване, при съставяне на скоростната характеристика на СМПМ.

2. ПРОВЕДЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ПОСТИГАНЕ НА МАКСИМАЛНА АМПЛИТУДА НА ПЪРВИ ХАРМОНИК НА МАГНИТНАТА ИНДУКЦИЯ ВЪВ ВЪЗДУШНАТА МЕЖДИНА

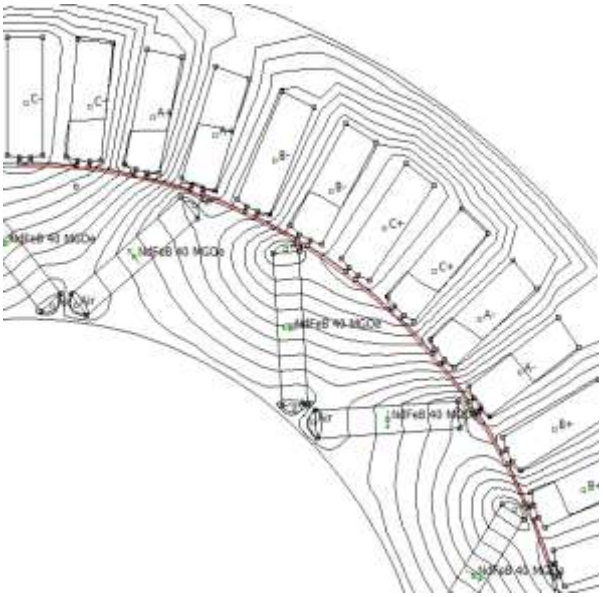
След определянето на обема на магнитите и приемането му за константа, трябва да се определи геометричното разположение на магнитите в рамките на един полюс. Това става като при създаването на геометрията ъглите Alfa и $Alfa_D$ се променят в зададени диапазони и се спазват някои ограничения, като минималните размери дадени на фиг.1 [3,4,6].

Alfa=60^0~120^0-ъгъл между магнитите, $Alfa_D$=50^0~120^0-ъгъл на дъгата на магнитното мостче, m_{min}=1 mm-минимално разстояние между магнитите, h_{min}=0.8-1.75 mm-минимално разстояние между дъгата на магнитното мостче и окръжността на ротора.



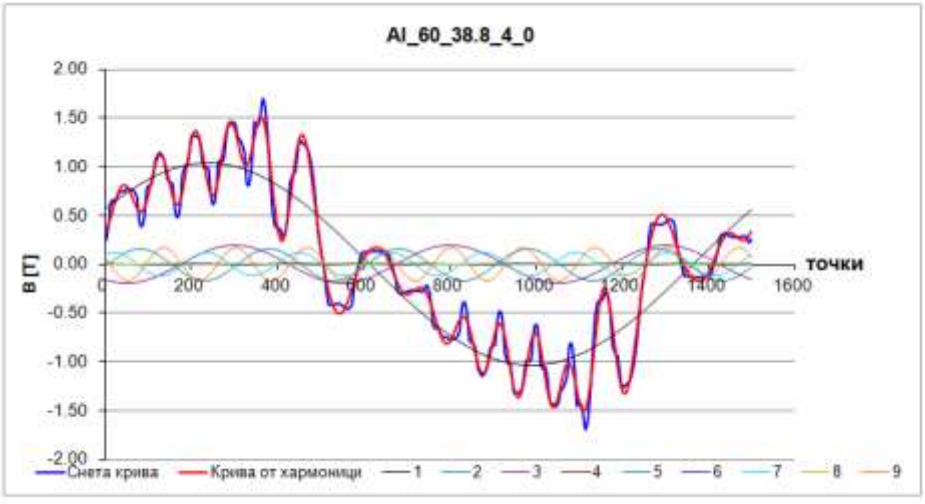
Фиг.1. Геометрично разположение на магнитите в рамките на един полюс.

При вече определен обем на магнитите, са направени следните изследвания за машини с P_2=10, 30, 60 [kW] и 2p=6, 10. Изследвани са всички възможни размери на магнитите при определена стъпка на ъгъл Alfa. Снета е кривата на магнитната индукция за 1500 точки от дъга, построена във въздушната междина за един чифт полюси (фиг.2). Еквивалентната токова плътност в канала е определена спрямо цялото му сечение и е 10A/mm^2.



Фиг.2. Дъга във въздушната междина за снемане на магнитната индукция.

На изчислените стойности на магнитната индукция е направен хармоничен анализ показан на фиг.3.



Фиг.3. Хармоничен анализ на магнитната индукция.

Данните за амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция са представени в табличен вид, заедно с размерите на магнита на табл.1 за машина с мощност P_2=10 [kW], табл.2 за машина с мощност P_2=30 [kW], и табл.3 за машина с мощност P_2=60 [kW]. Данните, означени с болд, представляват геометрията, при която е постигната магнитна индукция с максимална големина.

Табл.1

Амплитуда на първи хармоник на магнитната индукция при P2=10 [kW]

P_2=10 [KW] 2p=6				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa$_{max}$	B
[гр.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	67.2	2.3	0.50	1.02556
62	65.2	2.4	0.52	-
64	63.4	2.5	0.53	1.03082
66	61.7	2.5	0.55	-
68	60.1	2.6	0.57	-
70	58.6	2.7	0.58	-
72	57.2	2.7	0.60	1.03866
74	55.8	2.8	0.62	-
76	54.6	2.9	0.63	-
78	53.4	2.9	0.65	-
80	52.3	3.0	0.67	1.04196
82	51.2	3.0	0.68	-
84	50.2	3.1	0.70	-
86	49.3	3.2	0.72	-
88	48.4	3.2	0.73	1.0436
90	47.5	3.3	0.75	-
92	46.7	3.3	0.77	-
94	45.9	3.4	0.78	-
96	**45.2**	**3.5**	**0.80**	**1.0447**
98	44.5	3.5	0.82	-
100	43.9	3.6	0.83	-
102	43.2	3.6	0.85	-
104	42.6	3.7	0.87	1.04424
106	42.1	3.7	0.88	-
108	41.5	3.8	0.90	-
110	41.0	3.8	0.92	-
112	40.5	3.8	0.93	1.04295
114	40.1	3.9	0.95	-
116	39.6	3.9	0.97	-
118	39.2	4.0	0.98	-
120	38.8	4.0	1.00	1.04153

P_2=10 [KW] 2p=10				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa$_{max}$	B
[гр.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	**37.0**	**3.0**	**0.50**	**1.07184**
62	35.9	3.1	0.52	-
64	34.9	3.2	0.53	-
66	34.0	3.2	0.55	1.06627
68	33.1	3.3	0.57	-
70	32.2	3.4	0.58	-
72	31.5	3.5	0.60	1.06994
74	30.7	3.6	0.62	-
76	30.0	3.7	0.63	-
78	29.4	3.7	0.65	1.06119
80	28.8	3.8	0.67	-
82	28.2	3.9	0.68	-
84	27.6	4.0	0.70	1.04796
86	27.1	4.1	0.72	-
88	26.6	4.1	0.73	-
90	26.2	4.2	0.75	1.0217
92	25.7	4.3	0.77	-
94	25.3	4.4	0.78	-
96	24.9	4.4	0.80	1.06055
98	24.5	4.5	0.82	-
100	24.1	4.6	0.83	-
102	23.8	4.6	0.85	1.02219
104	23.5	4.7	0.87	-
106	23.2	4.8	0.88	-
108	22.9	4.8	0.90	1.0178
110	22.6	4.9	0.92	-
112	22.3	4.9	0.93	-
114	22.0	5.0	0.95	1.01116
116	21.8	5.0	0.97	-
118	21.6	5.1	0.98	-
120	21.4	5.2	1.00	0.9865

Табл.2

Амплитуда на първи хармоник на магнитната индукция при P2=30 [kW]

P_2=30 [KW] 2p=6				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa$_{max}$	B
[гр.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	91.8	3.0	0.50	0.9491
62	89.1	3.1	0.52	-
64	86.6	3.2	0.53	0.94983
66	84.3	3.3	0.55	-
68	82.1	3.4	0.57	-
70	80.0	3.5	0.58	-
72	78.1	3.6	0.60	0.95174
74	76.3	3.6	0.62	-
76	74.5	3.7	0.63	-
78	72.9	3.8	0.65	-
80	71.4	3.9	0.67	0.95349
82	70.0	4.0	0.68	-
84	68.6	4.0	0.70	-
86	67.3	4.1	0.72	-
88	**66.1**	**4.2**	**0.73**	**0.95815**
90	64.9	4.3	0.75	-
92	63.8	4.3	0.77	-
94	62.8	4.4	0.78	-
96	61.8	4.5	0.80	0.95559
98	60.8	4.6	0.82	-
100	59.9	4.6	0.83	-
102	59.1	4.7	0.85	-
104	58.2	4.8	0.87	0.9566
106	57.5	4.8	0.88	-
108	56.7	4.9	0.90	-
110	56.0	5.0	0.92	-
112	**55.4**	**5.0**	**0.93**	**0.95842**
114	54.7	5.1	0.95	-
116	54.1	5.1	0.97	-
118	53.5	5.2	0.98	-
120	53.0	5.2	1.00	0.9565

P_2=30 [KW] 2p=10				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa$_{max}$	B
[гр.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	47.1	4.4	0.50	1.11895
62	45.7	4.5	0.52	-
64	**44.5**	**4.6**	**0.53**	**1.12225**
66	43.3	4.7	0.55	-
68	42.1	4.9	0.57	-
70	41.1	5.0	0.58	-
72	40.1	5.1	0.60	1.12017
74	39.2	5.2	0.62	-
76	38.3	5.4	0.63	-
78	37.4	5.5	0.65	-
80	36.7	5.6	0.67	1.116
82	35.9	5.7	0.68	-
84	35.2	5.8	0.70	-
86	34.5	5.9	0.72	-
88	33.9	6.0	0.73	1.11217
90	33.3	6.2	0.75	-
92	32.8	6.3	0.77	-
94	32.2	6.4	0.78	-
96	31.7	6.5	0.80	1.10443
98	31.2	6.6	0.82	-
100	30.8	6.7	0.83	-
102	30.3	6.8	0.85	-
104	29.9	6.9	0.87	1.10093
106	29.5	7.0	0.88	-
108	29.1	7.0	0.90	-
110	28.8	7.1	0.92	-
112	28.4	7.2	0.93	1.09716
114	28.1	7.3	0.95	-
116	27.8	7.4	0.97	-
118	27.5	7.5	0.98	-
120	27.2	7.5	1.00	1.07414

Табл.3

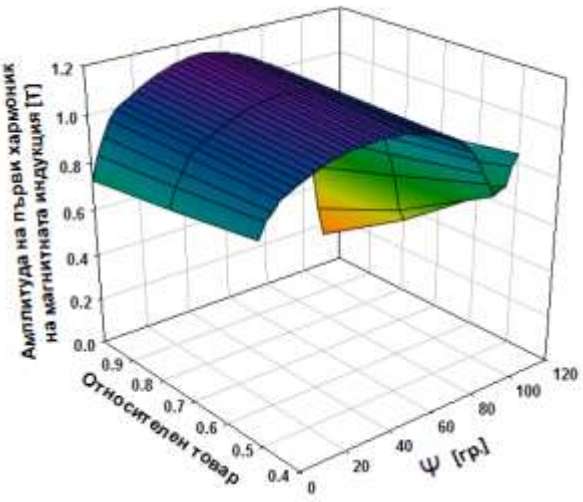
Амплитуда на първи хармоник на магнитната индукция при P2=60 [kW]

P_2=60 [KW] 2p=6				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa$_{max}$	B
[гр.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	106.4	6.5	0.50	1.01183
62	103.3	6.7	0.52	1.01369
64	100.4	6.8	0.53	1.01452
66	97.7	7.0	0.55	1.0158
68	95.1	7.2	0.57	-
70	92.7	7.4	0.58	1.01812
72	90.5	7.6	0.60	-
74	88.4	7.8	0.62	1.01953
76	86.4	8.0	0.63	-
78	84.5	8.1	0.65	1.02122
80	82.8	8.3	0.67	-
82	81.1	8.5	0.68	1.02364
84	79.5	8.6	0.70	-
86	**78.0**	**8.8**	**0.72**	**1.02623**
88	76.6	9.0	0.73	-
90	75.2	9.1	0.75	1.02399
92	73.9	9.3	0.77	-
94	72.7	9.4	0.78	-
96	71.6	9.6	0.80	-
98	70.5	9.7	0.82	-
100	69.4	9.9	0.83	1.01595
102	68.4	10.0	0.85	-
104	67.5	10.2	0.87	-
106	66.6	10.3	0.88	-
108	65.8	10.4	0.90	-
110	64.9	10.6	0.92	-
112	64.2	10.7	0.93	-
114	63.4	10.8	0.95	-
116	62.7	11.0	0.97	-
118	62.1	11.1	0.98	-
120	61.4	11.2	1.00	-

P_2=60 [KW] 2p=10				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa$_{max}$	B
[гр.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	85.3	9.5	0.50	1.07289
62	82.8	9.8	0.52	-
64	80.5	10.1	0.53	1.07509
66	78.3	10.3	0.55	-
68	76.3	10.6	0.57	-
70	74.4	10.9	0.58	-
72	**72.6**	**11.2**	**0.60**	**1.0777**
74	70.9	11.4	0.62	-
76	69.3	11.7	0.63	-
78	67.8	11.9	0.65	-
80	66.4	12.2	0.67	1.07542
82	65.0	12.5	0.68	-
84	63.8	12.7	0.70	-
86	62.6	12.9	0.72	-
88	61.4	13.2	0.73	1.07088
90	60.3	13.4	0.75	-
92	59.3	13.7	0.77	-
94	58.3	13.9	0.78	-
96	57.4	14.1	0.80	1.06945
98	56.5	14.3	0.82	-
100	55.7	14.5	0.83	-
102	54.9	14.8	0.85	-
104	54.1	15.0	0.87	1.06559
106	53.4	15.2	0.88	-
108	52.7	15.4	0.90	-
110	52.1	15.6	0.92	-
112	51.5	15.7	0.93	1.06236
114	50.9	15.9	0.95	-
116	50.3	16.1	0.97	-
118	49.8	16.3	0.98	-
120	49.3	16.4	1.00	1.05974

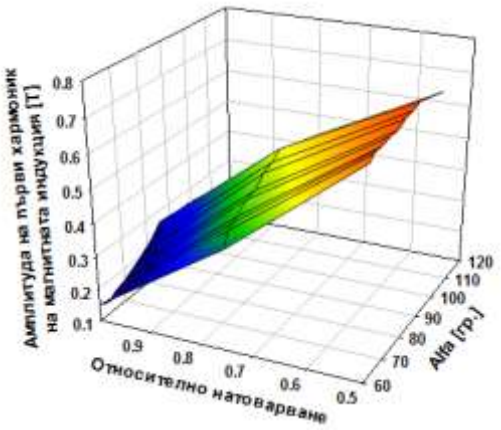
3. ПРОВЕДЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ПОСТИГАНЕ НА МАКСИМАЛНО РАЗМАГНИТВАНЕ НА МАШИНАТА

Поради изискването към задвижващия електродвигател да работи в широк скоростен диапазон е необходимо намаляване на основния магнитен поток чрез размагнитване на машината. Това се постига чрез управление на инвертора, който да осигури размагнитваща съставка на статорния ток. Изследвана е размагнитващата съставка отговаряща на 50%, 75% и 100% от номиналният ток. За определяне на зоната на максимално размагнитване на машината при P_2=60 [kW], 2p=6 и 2p=10 роторът последователно се завърта с 41 стъпки в рамките на един чифт полюси. Еквивалентната токова плътност в канала е 50%, 75% и 100% от номиналната. За отчетените стойности на магнитната индукция при всяко положение на ротора е направен хармоничен анализ (фиг.3). Кривата на изменение на амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във въздушната междина при изменението на ъгъл Ψ (между тока и е.д.н.) и натоварването е показана фиг.4.

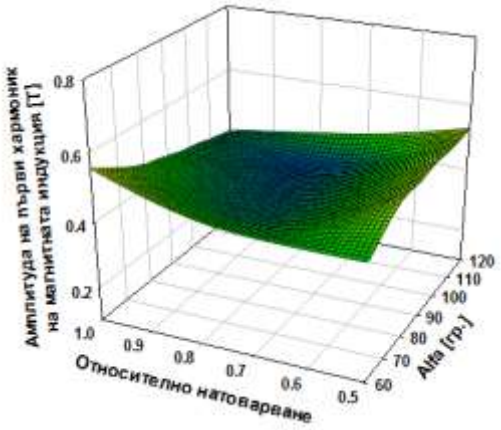


Фиг.4. Амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във въздушната междина във функция от натоварването и ъгъл Ψ.

След това за всички стойности за ъгъл Alfa от фиг.6 са създадени варианти с трите стойности на токовата плътност. След хармоничен анализ на кривата на магнитната индукция се определи стойността на първи хармоник във функция от натоварването и ъгъл Alfa. Тази зависимост е показана на фиг.5 за 2p=6 и на фиг.6 за 2p=10.



Фиг.5. Амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във функция от натоварването и ъгъл Alfa при 2p=6.



Фиг.6. Амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във функция от натоварването и ъгъл Alfa при 2p=10.

4. АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1. При проведените изследвания за оптимизиране на конструкцията на магнитната система на ротора, при които първият хармоник на магнитната индукция във въздушната междина е максимален, се оказа, че амплитудата няма изразен максимум и е почти еднаква в целия диапазон на изменение на ъгъл Alfa. Получените данни показват, че първоначално изчислените размери на магнита при проектирането се отклоняват незначително от тези, при които има максимална индукция.
2. При изследване на възможностите за размагнитване на машината, има изразена оптимална зона, при която размагнитването е максимално. Тази зона съществува при двете конструкции на машината и при различни натоварвания. Степента на размагнитване зависи от натоварването и е по-силно изразена при машина с 2p=6.
3. Имайки предвид първите два извода следва, че избора на ъгъл Alfa е достатъчно да се проведе за постигане на максимално размагнитване.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бербиренков, И. , В. Лохнин, Винтильные тяговые двигатели в электроприводе, МАМИ, 2011.

[2] Chen, L. , J. Wang, P. Lombard, P. Lazari, V. Leconte, High efficiency motor design for electrical vehicles, University of Sheffield, 2012.

[3] Hahlbeck, S., D. Gerling, Design considerations for rotors with embedded V-Shape permanent magnets, proceedings of the 2008 International conference on electrical machines, 2008.

[4] Jung, D., Y. Kim, U. Lee, H. Lee, Optimum design of the electric vehicle traction motor using the hairpin winding, Hyundai mobis Co.

[5] Tariq, A. , C. Baron, E. Strangas, Iron and magnet losses and torque calculation of interior permanent magnet synchronous machines using magnetic equivalent circuit, IEEE transactions on magnetics, vol. 46, no. 12, december 2010.

[6] Zadeh, S., R. Ghasemi, Design optimization of permanent magnet synchronous motors for high torque capability and low magnet volume, 2004.

Автори: Цветомир Методиев Стоянов, инж., докторант, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *cmetodiev@tu-sofia.bg;* **Радослав Лазаров Спасов**, доц. д-р инж. катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *rls@tu-sofia.bg;* **Пламен Миланов Ризов**, доц. д-р инж., катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *pmri@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Георги Тодоров

ПУЛСАЦИИ НА МОМЕНТА НА СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ С НЕЯВНОПОЛЮСНА И ЯВНОПОЛЮСНА КОНСТРУКЦИЯ ПРИ РАЗЛИЧНИ НАТОВАРВАНИЯ

Божидар Стоев

Резюме: *В настоящата работа са анализирани пулсациите на електромагнитния момент на синхронни двигатели с постоянни магнити с неявнополюсна и явнополюсна роторни конструкции при промяна на натоварването от базовото до три пъти над базовото. За три разглеждани машини е определено разпределението на магнитното поле при различните натоварвания и е анализиран различният характер на изменението на пулсациите на момента в зависимост от натоварването при неявнополюсните и явнополюсните двигатели.*
Ключови думи: *СДПМ, неявнополюсна, явнополюсна, пулсации на момента.*

TORQUE RIPPLES OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS WITH NONSALIENT AND SALIENT-POLE ROTOR CONFIGURATION AT DIFFERENT LOADS

Bozhidar Stoev

Abstract: *Analysis of the torque ripples of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) with non-salient and salient-pole rotor configurations operating under varying load, that is from base loading up to three times the base load is presented in the paper. The magnetic field distribution with different loads of three analyzed machines is determined and the different dependency of the torque ripples with load is analyzed for the non-salient and salient-pole rotor configurations.*
Keywords: *PMSM, non-salient pole, salient pole, torque ripples, FEA*

1. INTRODUCTION

The advancements in the field of high energy permanent magnet materials and power electronics greatly broadened the field of application for Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSM) in recent years. They have been adopted for many high performance applications such as robotics, aerospace, power tools, generation with renewable energy source, various medical equipment and electric/hybrid vehicles etc. The PM synchronous machines are built with a number of rotor configurations. Among them, surface and interior magnet rotors are the two most commonly used configurations. In the surface magnet structure (SPMSM), the magnet poles are attached to the rotor surface. Since the permanent magnets are immediately next to the air-gap and their permeability is close to the permeability of air, the equivalent cir-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

cumferential permeability is uniform. As a result, the direct and quadrature synchronous inductances are equal, similar to the non-salient electrically excited synchronous motors, which allow PMSMS with such rotor configuration to be classified as non-salient-pole synchronous motors. In the interior permanent magnet synchronous motors (IPMSM) the permanent magnets are buried inside the rotor. As the magnets are buried inside the rotor, the synchronous direct and quadrature axis inductances are no longer equal, but the direct axis inductance is lower than the quadrature. This is due to the large reluctance in the face of the permanent magnets, seen by the direct axis magnetic flux. Although this implies a reverse saliency, the IPMSMs are still classified as salient-pole synchronous motors [1, 2].

One of the highest demands regarding motors performance and the drive it is integrated in is a smooth and noiseless operation, without additional vibrations. This implies that the motor should produce a smooth torque without additional ripples. Torque ripples are one of the main reasons for increased noise and vibrations during motor operation and are affected by the high order harmonic content of the air-gap flux density distribution and the condition of the magnetic circuit in general. Since the permanent magnets in the SPMSMs are immediately close to the air-gap, the stator surface slotting has a strong effect on the air-gap flux density distribution and leads to increased rate of change of the air-gap reluctance as seen by the rotor during operation. These conditions are a premise for emergence of high torque ripples. In the IPMSMs, the air-gap is small and uniform around the rotor periphery. Also by burying the magnets inside the rotor, the effect of the stator surface slotting is decreased. Furthermore, the IPMSM rotor configurations allows for an eased application of different means for torque ripple suppression [3].

The analysis of these ripples and the means for their reduction are essential in the design process of PMSMs, as this would help to determine if the designed motor is suitable for the desired operation. Some applications require the motors to operate with increased loading for short periods of time. As the load increases, the condition of the magnetic circuit also changes, which on the other hand will affect the quality of the produced torque. In some cases, the load increase may lead to increase of the torque ripple to a stage where the motor would no longer be able to meet the requirements regarding noise and vibration. Furthermore, the vibrations will spread among the whole drive and will disrupt its work and even lead to costly damage. So the analysis of the torque ripples is essential not only for the operation with base loading, but also for all the machine operating modes, depending on the application.

The main scope of this work is to analyze the torque ripples produced by nonsalient-pole and salient-pole PMSMs during operation with base loading and when the load is increased up to three times the base load. The effect on the torque ripples with different load is illustrated by applying an iterative procedure using Finite Element Analysis (FEA), the vector diagram of the permanent magnet synchronous motor in d-q coordinate system and Park transformations.

2. ROTOR CONFIGURATIONS

2.1. Non-salient rotor configuration.

The analyzed non-salient rotor configuration is presented in Fig. 1. The motor has 12 magnet poles and three phase stator winding distributed in 36 stator slots. The permanent magnets are radially magnetized.

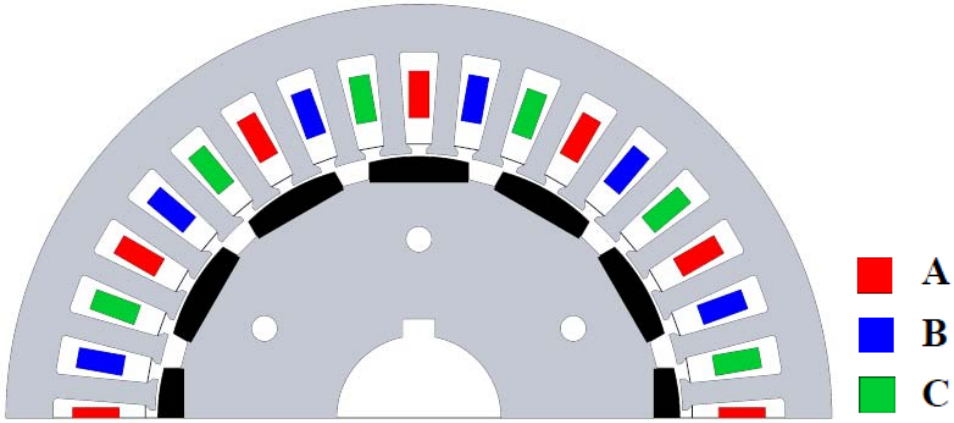
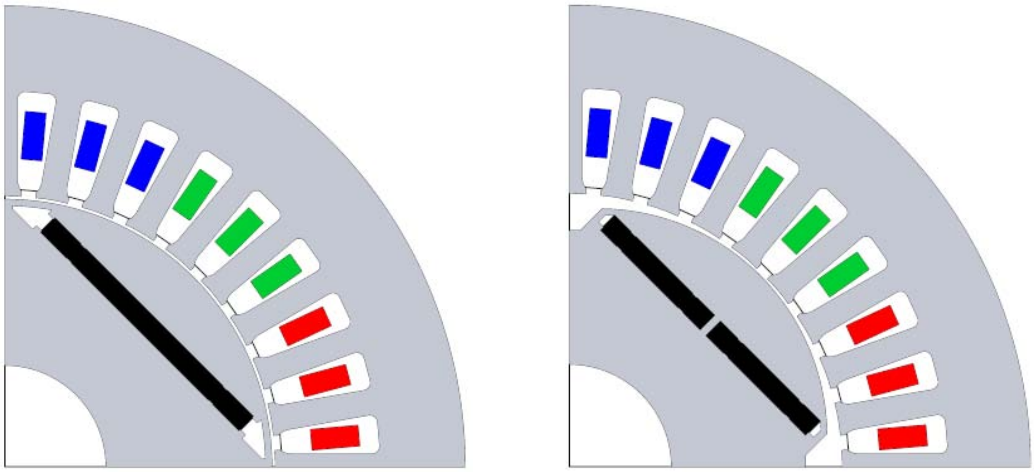


Figure 1. *Non-salient pole motor – Model 1*

2.2. Salient rotor configuration.

The analyzed salient-pole rotor configurations are presented in Fig. 2 a) and b). Both analyzed motors have the same stator geometry and windings distributed in 36 slots. The permanent magnets are also the same regarding volume, residual flux density, coercivity and magnetization direction. As can be seen in the presented figure, Model 2 has a cylindrical rotor, with uniform air-gap and integral permanent magnet per pole.

The rotor configuration of Model 3 on the other hand is designed with non-uniform air-gap, similar to the electrically exited synchronous machines. The rotor is shaped as such, in order to produce more sinusoidal air-gap flux density distribution and reduce some of the high order harmonic components [2, 3].



a) Model 2 *b) Model 3*

Figure 2. *Salient-pole motors*

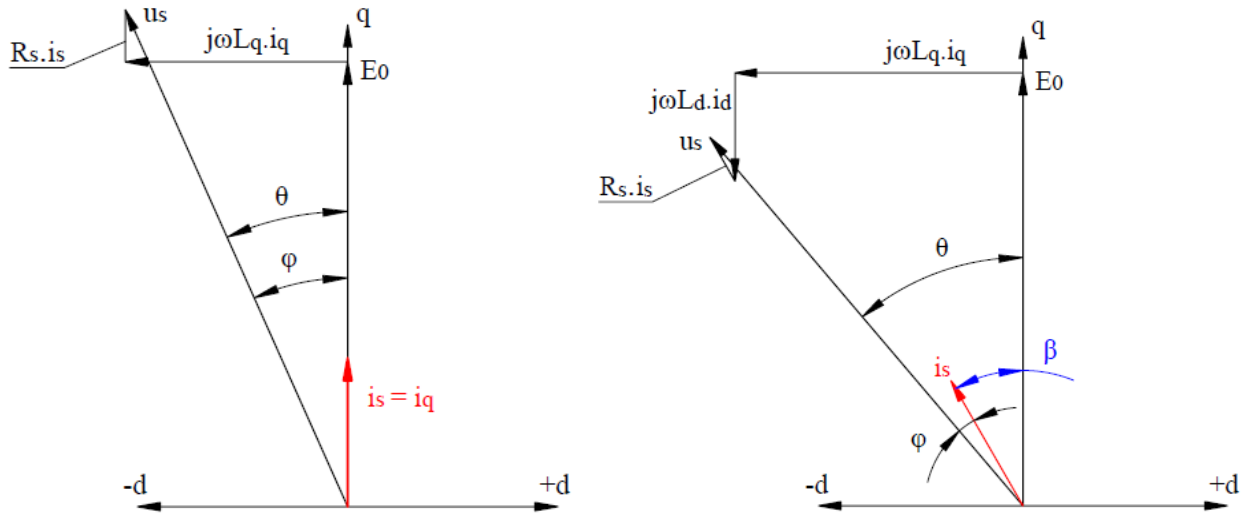
3. MACHINE PARAMETERS AND TORQUE RIPPLE FOR THE BASE LOADING

3.1. Machine parameters.

To calculate the machine parameters, models of the examined PMSM are built and Finite Element Analysis (FEA) is performed. The direct axis is aligned with phase A magnetic axis.

The parameter calculation begins with determining the phase stator currents, corresponding to the desired torque, which is assumed as base. The currents and torque are determined by an iterative procedure in which the magnitude and phase angle of the current vector are varied. For each combination the vector diagram of the PMSM is constructed in order to verify if the assumed currents and current angle balance the assigned supply voltage. The vector diagrams of the non-salient and salient pole configurations are presented in Fig. 3.

For each combination of current vector magnitude and phase angle a FEA is performed. The permanent magnet operating point is determined by calculating the equivalent m.m.f. of the magnetic circuit per pole. The magnetic circuit is divided into several sections and the m.m.f. is determined for each section, based on the flux density values obtained from FEA, the B-H curve of the used steel and the geometry of the models. After the equivalent m.m.f. is calculated, the permanent magnet operating point, the air-gap flux produced by the permanent magnet and the flux linkage, corresponding to this flux are determined to obtain the e.m.f. E_0 [4, 5].



a) Non-salient-pole motor (i_d=0) *b) Salient-pole motor*

Figure 3. *Vector diagrams of the analyzed PMSMs*

The direct and quadrature axis currents, flux linkages and synchronous inductances are determined from the phase currents and flux linkages using the results from the FEA and Park transformations. It is important to take into account that the parameters of the surface PMSM for base load are determined when i_d=0 is applied in order for the machine to produce maximum torque for a given current.

$$i_d = \frac{2}{3}\left[i_A \cos(0) + i_B \cos(-2\pi/3) + i_C \cos(-4\pi/3) \right] \quad (1)$$

$$i_q = -\frac{2}{3}\left[i_A \sin(0) + i_B \sin(-2\pi/3) + i_C \sin(-4\pi/3) \right] \quad (2)$$

$$\Psi_d = \frac{2}{3}\left[\Psi_A \cos(0) + \Psi_B \cos(-2\pi/3) + \Psi_C \cos(-4\pi/3) \right] \quad (3)$$

$$\Psi_q = -\frac{2}{3}\left[\Psi_A \sin(0) + \Psi_B \sin(-2\pi/3) + \Psi_C \sin(-4\pi/3) \right] \quad (4)$$

$$L_d = \frac{\left(\Psi_d - \Psi_{PM}\right)}{i_d} \qquad L_q = \frac{\Psi_q}{i_q} \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \left[\Psi_{PM} . i_q - \left(L_q - L_d\right) . i_d . i_q \right] \quad (6)$$

The torque of the surface PMSM is determined from equation (6), by using the first term, as the second one is zero due to its non-salient nature. The results for the base loading are presented in Table 1.

Table 1.

Parameter		Model 1.	Model 2.	Model 3.
n_1	Operating speed	500 rpm	1500 rpm	1500 rpm
T_e	Torque	11,5 Nm	4,55 Nm	4,55 Nm
u_s	Supply voltage	130 V	120 V	110 V
f_1	Supply frequency	50 Hz	50 Hz	50 Hz
i_s	Armature current	1,6 A	2,05A	2,5 A
β	Current phase angle	0	22^0	20^0
i_d	Direct axis current	0	-0,768 A	-0,936 A
i_q	Quadrature axis current	1,6 A	1,9 A	2,318 A

The air-gap flux density distribution of the examined motors is presented in Fig. 4 to Fig. 6, for the cases of non-excited stator winding (permanent magnet flux only) and the base loading.

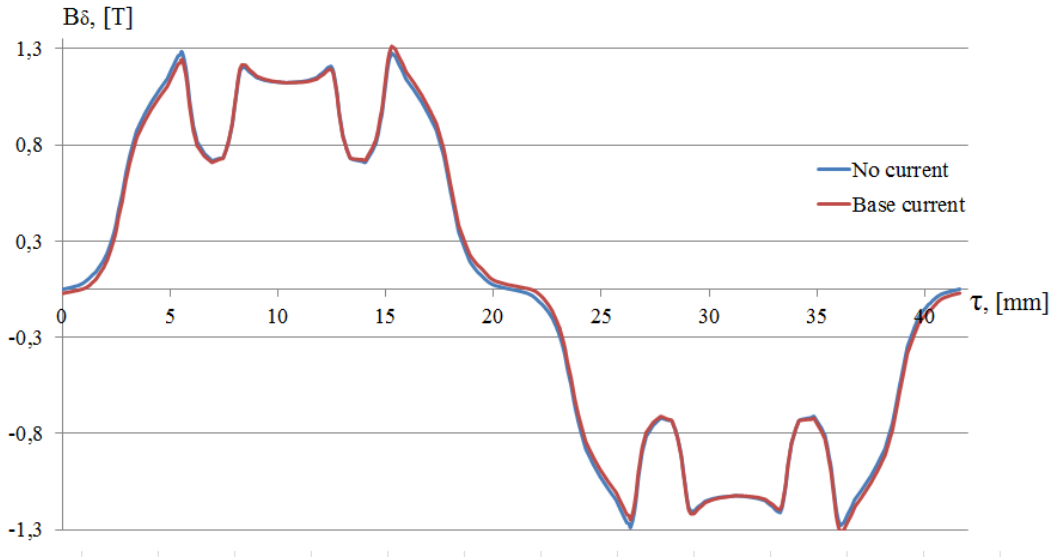


Figure 4. *Air-gap flux density distribution of Model 1.*

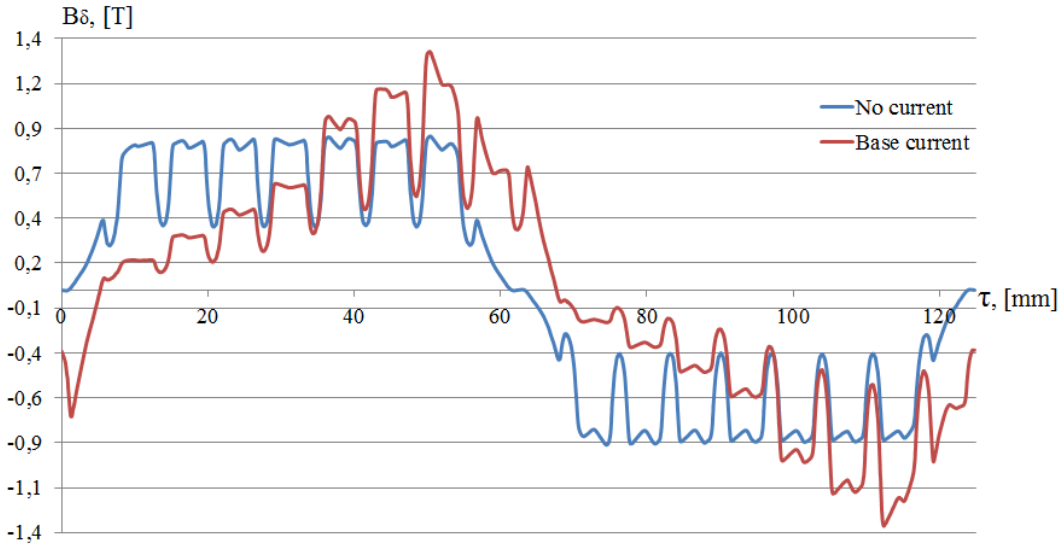


Figure 5. *Air-gap flux density distribution of Model 2.*

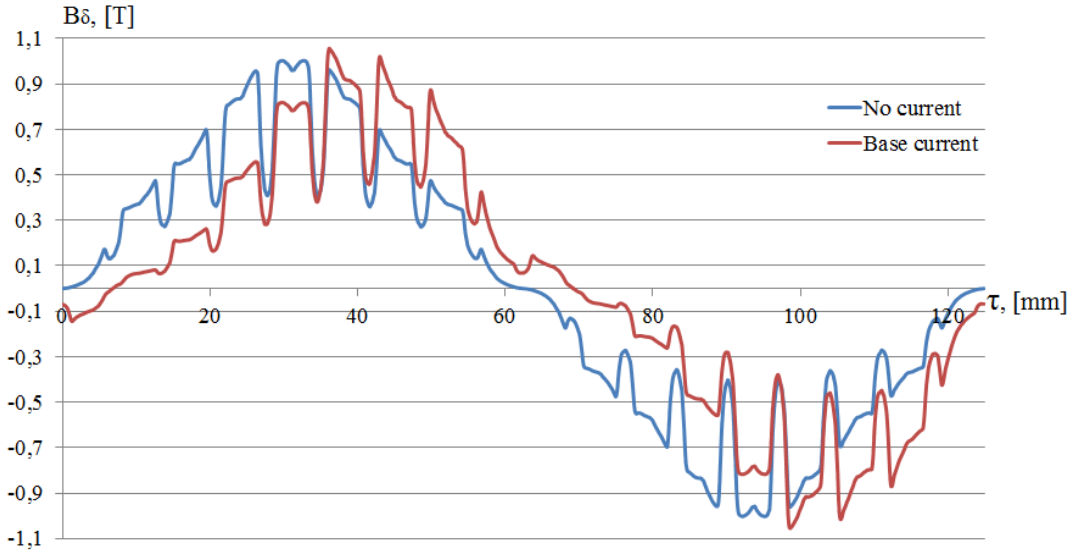
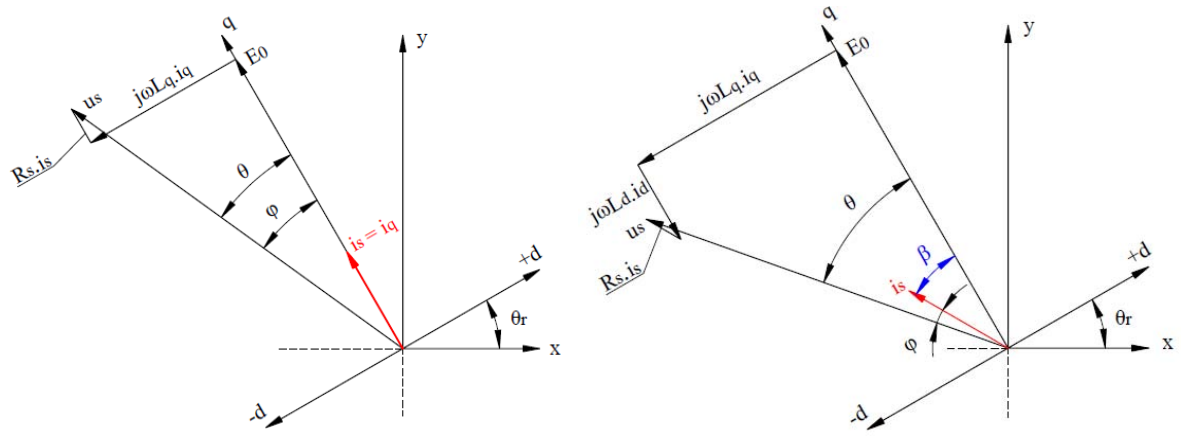


Figure 6. *Air-gap flux density distribution of Model 3.*

3.2. Torque ripples.

When the motor operates with constant load and speed, the d-q vector diagram rotates with the rotor with respect to the stationary stator reference frame [6]. In order to obtain the torque ripples of the examined motors, the rotation of the rotor and hence the vector diagram is simulated, as shown in Fig. 7. The procedure described in section 3.1 is applied for each rotating step that is for each value of the rotor position angle θr, and the obtained torque ripples are presented in Fig. 8.



a) Non-salient motor *b) Salient pole motor*

Figure 7. *Vector diagrams of the analyzed PMSMs*

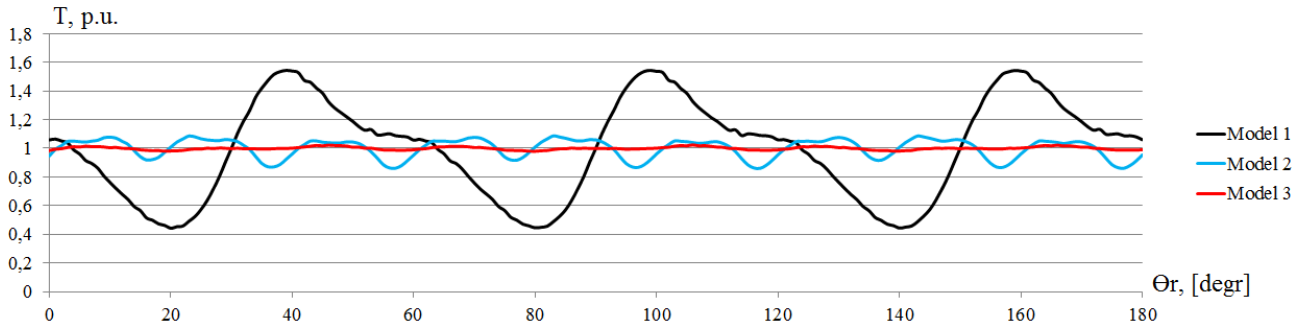


Figure 8. *Torque ripples of the examined motors at base load*

4. TORQUE RIPPLES AT DIFFERENT LOAD

Torque ripples at five different loads are analyzed, starting from the base current value, up to three times the base current value. The value of the supply voltage remains constant for each loading and the procedure described in section 3 is applied until the supply voltage criteria is met. It is important to note, that for the non-salient PMSM the direct axis current cannot be kept zero with the increase of the load at the assigned value of the supply voltage. Reason for this is that with load, respectively current increase, the armature resistance voltage drop increases. Regarding the salient pole motors, for each load a new value of the current phase angle is determined until the supply voltage assignment is met.

The obtained torque ripples are presented in Fig. 9 – Fig. 12.

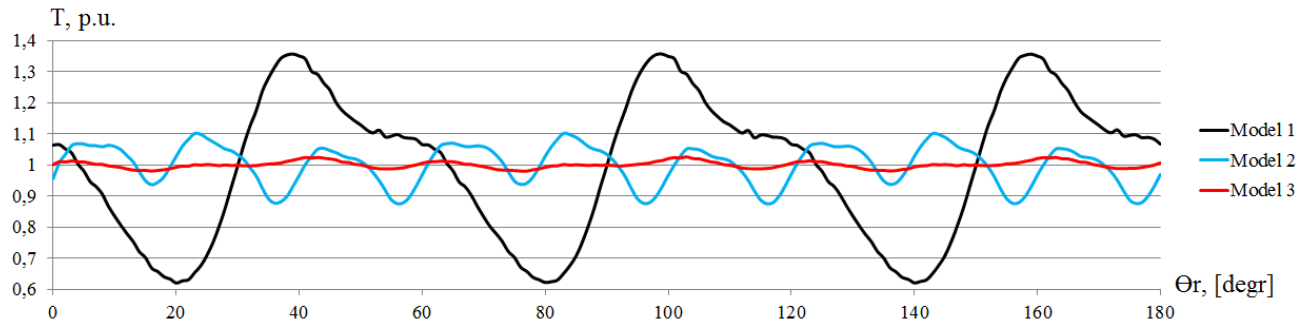


Figure 9. *Torque ripples at 1,5 times the base load*

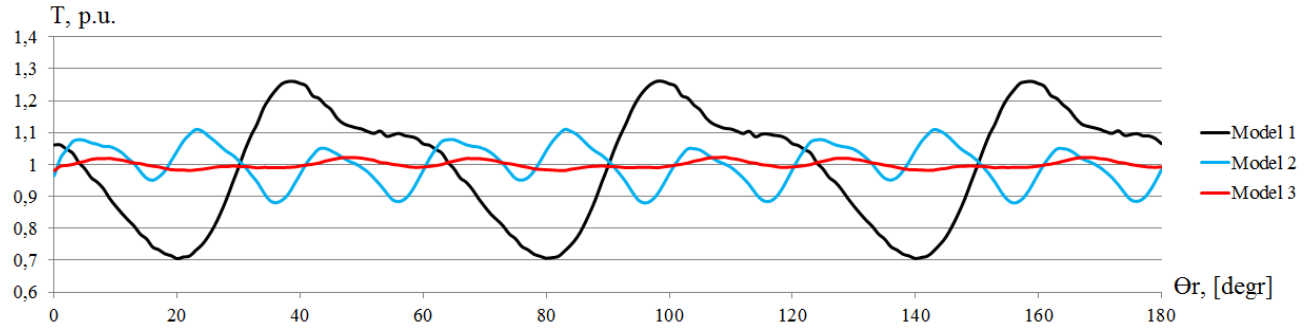


Figure 10. *Torque ripples at 2 times the base load*

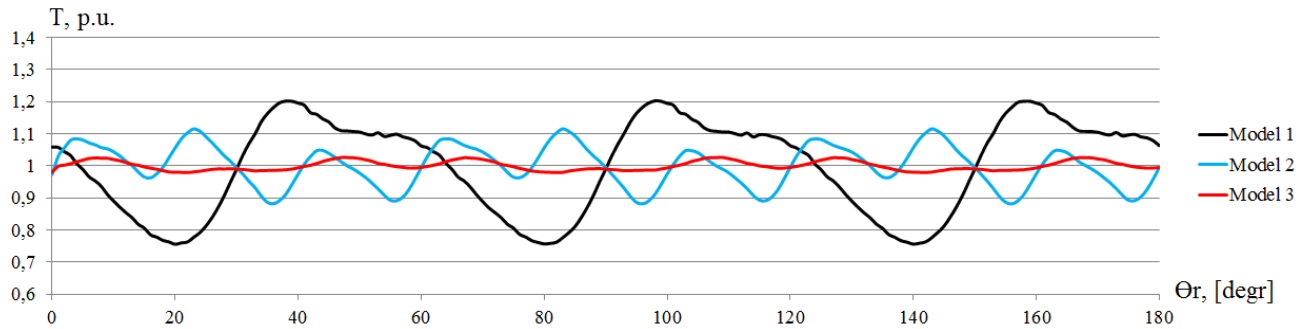


Figure 11. *Torque ripples at 2,5 times the base load*

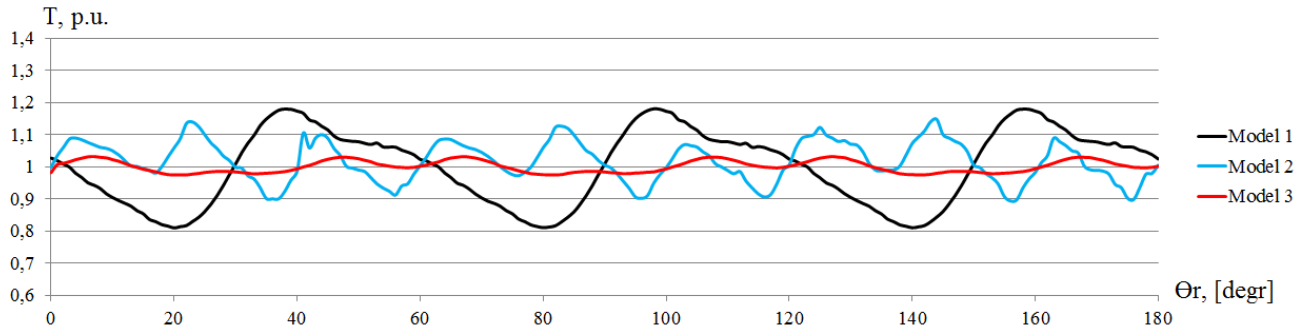
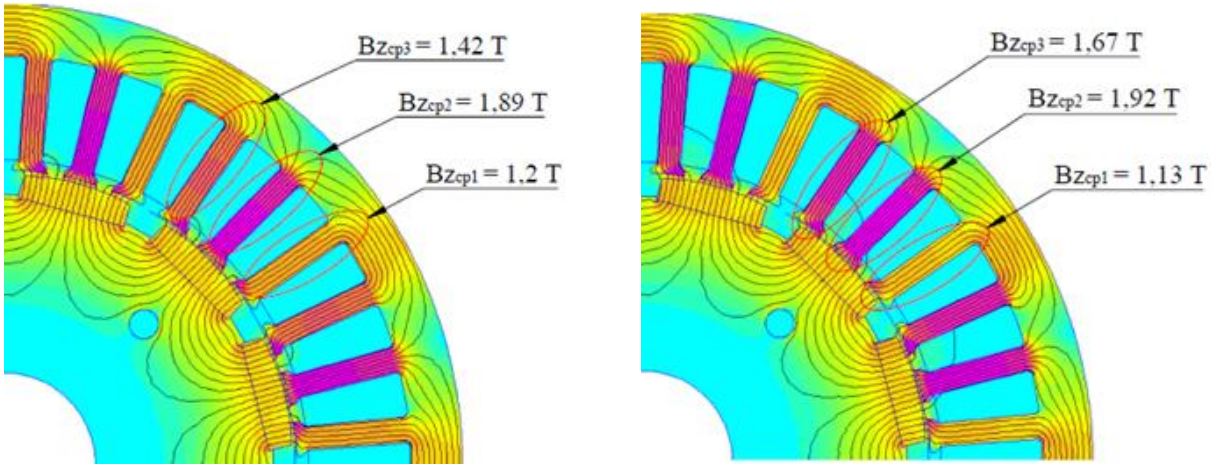


Figure 12. *Torque ripples at 3 times the base load*

It is interesting to observe from the obtained results that the torque ripple amplitudes of the non-salient-pole motor decrease with the load increase. Reason for this is the increased saturation of the stator teeth with the load increase (see Fig. 13) which reduces the fluctuations of the magnetic flux density in circumferential direction.



a) Base load *b) Three times the base load*

Figure 13. *Saturation of the stator teeth of the SPMSM*

When the stator teeth become more saturated the rotor sees a decreased rate of change of the air-gap reluctance and the effect of the stator slot openings also decreases [6, 7]. This leads to almost 40 % reduction of the torque ripple amplitudes - Fig. 14. Regarding the torque ripples of the salient-pole configurations, a notable increase is not registered. While the torque waveform of Model 2 becomes somewhat distorted with load increase, the torque waveform of Model 3 remains the same, with torque ripples not more than 2 %.

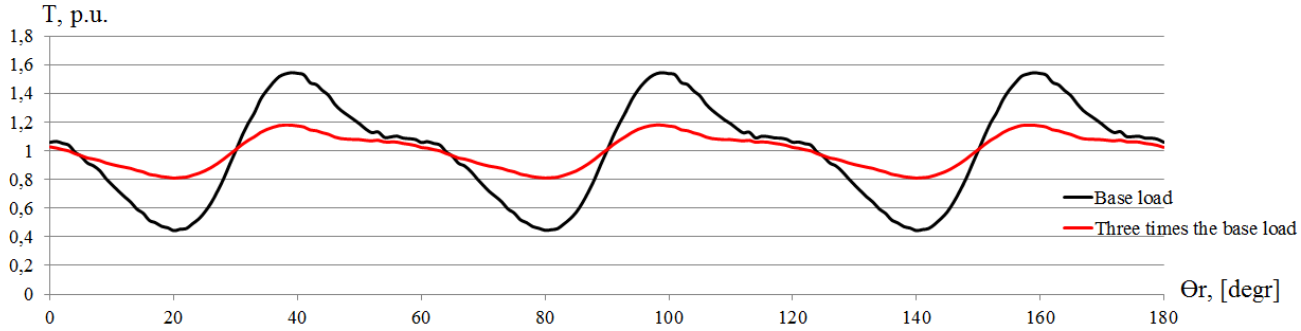


Figure 14. *Torque ripple comparison of Model 1*

5. CONCLUSIONS

The torque ripples of non-salient-pole and salient-pole rotor configurations have been examined, when the motors operate at different load. The amplitude of the torque ripples of the SPMSM (non-salient) strongly depend on the saturation of the stator teeth. As the load increases, the stator teeth become more saturated, which on the other hand weakens the effect of the stator teeth openings on the rate of change of the air-gap reluctance as seen by the rotor and on the overall torque ripples. The salient pole rotor configurations show more stable torque production at different loads. Although the motors with cylindrical rotor configuration (Model 2) exhibit far smaller torque ripples, there are still tangible torque pulsations in the torque waveform. The shaping of the rotor poles with non-uniform air-gap (Model 3) results in almost full reduction of the torque pulsations, as the air-gap flux density distribution becomes far more sinusoidal, which compensates the effect of the stator slot openings on the torque ripples.

REFERENCES

[1] Gieras J. F. and Wing M., ***Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications***, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2002

[2] Pyrhonen J., T. Jokinen, V. Hrabovcova, ***Design of rotating electrical machines – Second edition.***, John Wiley & Sons, Ltd, 2014, ISBN: 978-1-118-58157-5

[3] Stoev B., G. Todorov, ***Torque Ripple Suppression in Surface Mounted PMSMs with Distributed Windings***, 15-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 1-3 June 2017, Sofia, Bulgaria, DOI: 10.1109/ELMA.2017.7955448, pp 277-280

[4] Mi.C.C., ***Analytical design of permanent magnet traction-drive motors***, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, issue 7, July 2006, 1861-1866

[5] Mi, C. C., M. Filippa, ***Analytical method for predicting the air-gap flux of interior-type permanent magnet machines***, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, Jan. 2004, 50-58

[6] Todorov G., ***Analysis of the torque ripple of permanent magnet synchronous motors with inset and embedded magnets***, Elektrotechnica & Elektronica E+E, Vol. 50, 11-12/2015, 49-53, ISSN 0861-4717.

[7] Todorov G., B. Stoev. ***Saturation Effects on the Parameters of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Rotor Configuration***, Applied Electromagnetic Engineering for Advanced Materials from Macro- to Nanoscale. Materials Science Forum, DOI:10.4028, ISSN: 0255-5476, Vol. 856, 2016, pp 257-262, Trans Tech Publications, Switzerland

Author: Bozhidar Stoev, M. Eng., PhD student, Department of Electrical Machines, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail adress: *bdst@tu-sofia.bg*

Received 15 December 2017 **Reviewer:** M. Eng., PhD Tzvetomir Stoyanov

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРЕДПОСТАВКИТЕ ЗА ОТКАЗИ В ТОКОИЗПРАВИТЕЛИТЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЛОКОМОТИВ СЕРИЯ 61

Иван Петров, Иван Ангелов, Георги Димитров

Резюме: *В настоящата разработка са представени резултати от проведено изследване върху откази в токоизправителните блокове на електрически локомотиви Škoda 56E1 – БДЖ серия 61, настъпващи по време на експлоатация. Настоящият първи етап от изследването включва проучване на видовете откази и идентифициране на възможните предпоставки за появата им. Въз основа на получените данни е направен анализ на причините за възникване на откази в полупроводниковите преобразуватели (токоизправителните блокове) за захранване на тяговите двигатели и са формулирани конкретни изводи и препоръки.*
Ключови думи: *Електрически локомотиви Škoda 56E1 – БДЖ серия 61, токоизправители на тяговите двигатели, откази в токоизправителните блокове*

RESEARCH ON THE FAILURES IN THE RECTIFIERS OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE SERIES 61

Ivan Petrov, Ivan Angelov, Georgi Dimitrov

Abstract: *In this study are presented the results of research carried out on failures in the traction rectifier blocks of electric locomotives Škoda 56E1 - BDZ 61 series, occurring during operation. The current stage of the research includes the exploration of the types of failures and the identification of possible preconditions for their occurrence. The current first stage of the research includes the exploration of the types of failures and the identification of possible preconditions for their occurrence. On the basis of the reached results is carried out an analysis of the causes of failures in semiconductor converters (rectifier blocks) of traction motors, and particular conclusions and recommendations are made.*
Keywords: *Electric locomotives Škoda 56E1 – BDŽ 61 series, Rectifiers of traction motors, Failures in the rectifier blocks*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Локомотивите серия 61 (заводски модел Škoda 56E1) са доставени през 1994 г. по поръчка на Български държавни железници (НК „БДЖ” - тогава единна държавна структура). Основното предназначение на тези локомотиви е извършване на маневрена дейност в пътнически и товаро-разпределителни гари, но още през първите години на експлоатация те често се използват и за обслужване на крайградски пътнически влакове.

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

След структурните промени в „БДЖ” през 2008 г. и създаването на двете нови дружества – „БДЖ-Пътнически превози” ЕООД и „БДЖ-Товарни превози” ЕООД към „Холдинг БДЖ” ЕАД, локомотивите серия 61 са разпределени между тях, както следва:

- 13 локомотива към „БДЖ-Пътнически превози” ЕООД;
- 7 локомотива към „БДЖ- Товарни превози” ЕООД.

В настоящия момент повечето изправни локомотиви серия 61 се използват за обслужване на крайградски пътнически влакове.

В настоящата разработка са представени резултати от етап 1 на изследване, възложено от „БДЖ-Товарни превози” ЕООД, върху отказите в токоизправителните блокове на локомотиви серия 61 (Škoda 56E1), настъпващите по време експлоатация.

Настоящият етап от изследването включва проучване на видовете откази и идентифициране на възможните предпоставки за появата им. Въз основа на получените данни е направен анализ на причините за възникване на откази в полупроводниковите преобразуватели (токоизправителите) за захранване на тяговите двигатели и са формулирани конкретни изводи и препоръки.

2. ТЕХНИЧЕСКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА МАНЕВРЕНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЛОКОМОТИВИ ŠKODA 56E1 – БДЖ СЕРИЯ 61

Локомотивът Škoda 56E1 – БДЖ серия 61 е четириосен, електрически, маневрен, локомотив с трайна мощност 960 kW, за захранване от въздушна контактна система 25 kV, 50 Hz.

Тяговият трансформатор има четири вторични тягови намотки T01.BA, T01.BB, T01.BC и T01.BD, една намотка за възбуждане на тяговите двигатели и спомагателните машини T01.D и намотка за влаково отопление T01.C (фиг.1).

Тяговото електрозадвижване на локомотива е реализирано с четири постояннотокови тягови двигателя с независимо възбуждане (по два двигателя в талига), всеки от тях с номинална мощност 240 kW. Захранването и регулирането на тяговите двигатели се осъществява от управляеми токоизправителни блокове, отделни за котвените и възбудителните намотки на двигателите (фиг.1).

Две по две котвените и възбудителните намотки на двигателите, монтирани в отделните талиги, са свързани електрически последователно. Котвените намотки на всяка двигателна група се захранват от отделен тиристорен преобразувател, съставен от два последователно свързани управляеми несиметрични моста, които са присъединени към две независими намотки на трансформатора.

Регулирането е зоново-фазово, като във всяка зона преобразувателят работи като едноимпулсен. В табл.1 и на фиг. 2 са показани основните технически характеристики на локомотивите Škoda 56E1 [1,3].

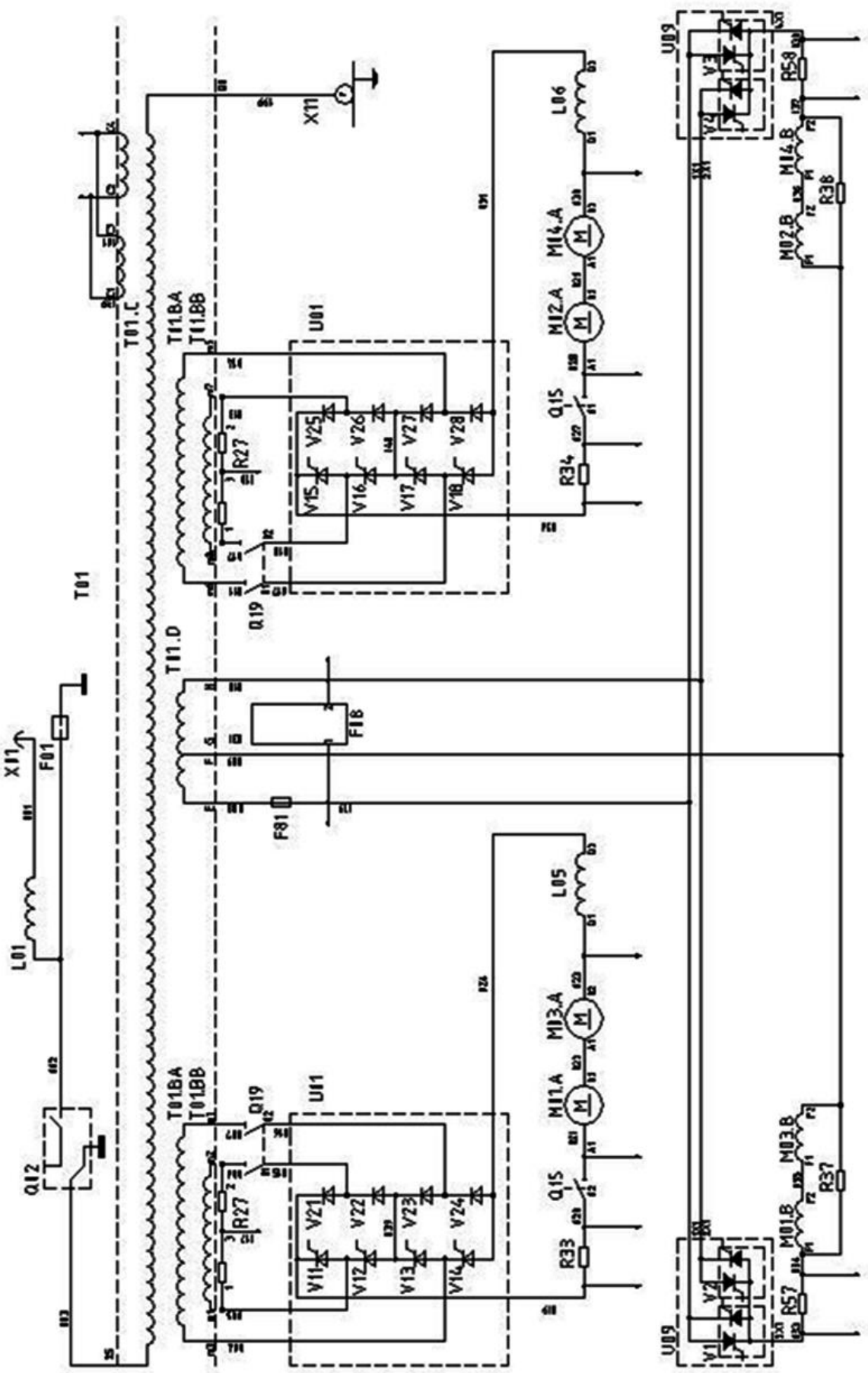

X11
F01
L01
Q12
T01
T01.C
T01.D
T01BA
T01BB
Q19
U11
R27
V11
V12
V13
V14
V21
V22
V23
V24
R33
Q15
M11.A
M13.A
L05
T11BA
T11BB
U01
V15
V16
V17
V18
V25
V26
V27
V28
R34
M12.A
M14.A
L06
F18
F81
X11
U09
V1
V2
V3
V4
R57
M01.B
M03.B
R37
M02.B
M14.B
R38
R58

Таблица 1

Технически характеристики на маневрени локомотиви Škoda 56E1 – БДЖ серия 61

Модел локомотиви:	56E1
Серия и брой за БДЖ:	БДЖ: 61 001–020 (общо 20 локомотива)
Производител:	Škoda - Plzen, Czech Republic
Година на производство:	1991-1992
Колоосна формула:	Bo'Bo'
Минимални радиуси на вписване в криви:	120 m (в открит път) 90 m (при скорост 10 km/h) 60 m (при скорост 5 km/h)
Собствена маса:	74 t
Маса падаща се на една колоос:	18,5 t
Максимална скорост:	80 km/h
Захранваща контактна система:	25 kV, 50 Hz
Трайна мощност по окръжността на търкаляне на колелата:	960 kW
Максимална теглителна сила:	212,9 kN (ограничена по сцепление)
Трайна теглителна сила:	122,1 kN (до 27,1 km/h)
Диаметър на колелата, нови/износени:	1050/974 mm
Брой и тип тягови двигатели:	4 бр., постояннотокови с независимо
Тягови двигатели, модел и мощност:	ČKD TE 009, 240 kW
Мощност и захранващо напрежение на влаково отопление:	300 kVA; 1,5 kV 50 Hz
Система за управление:	Škoda

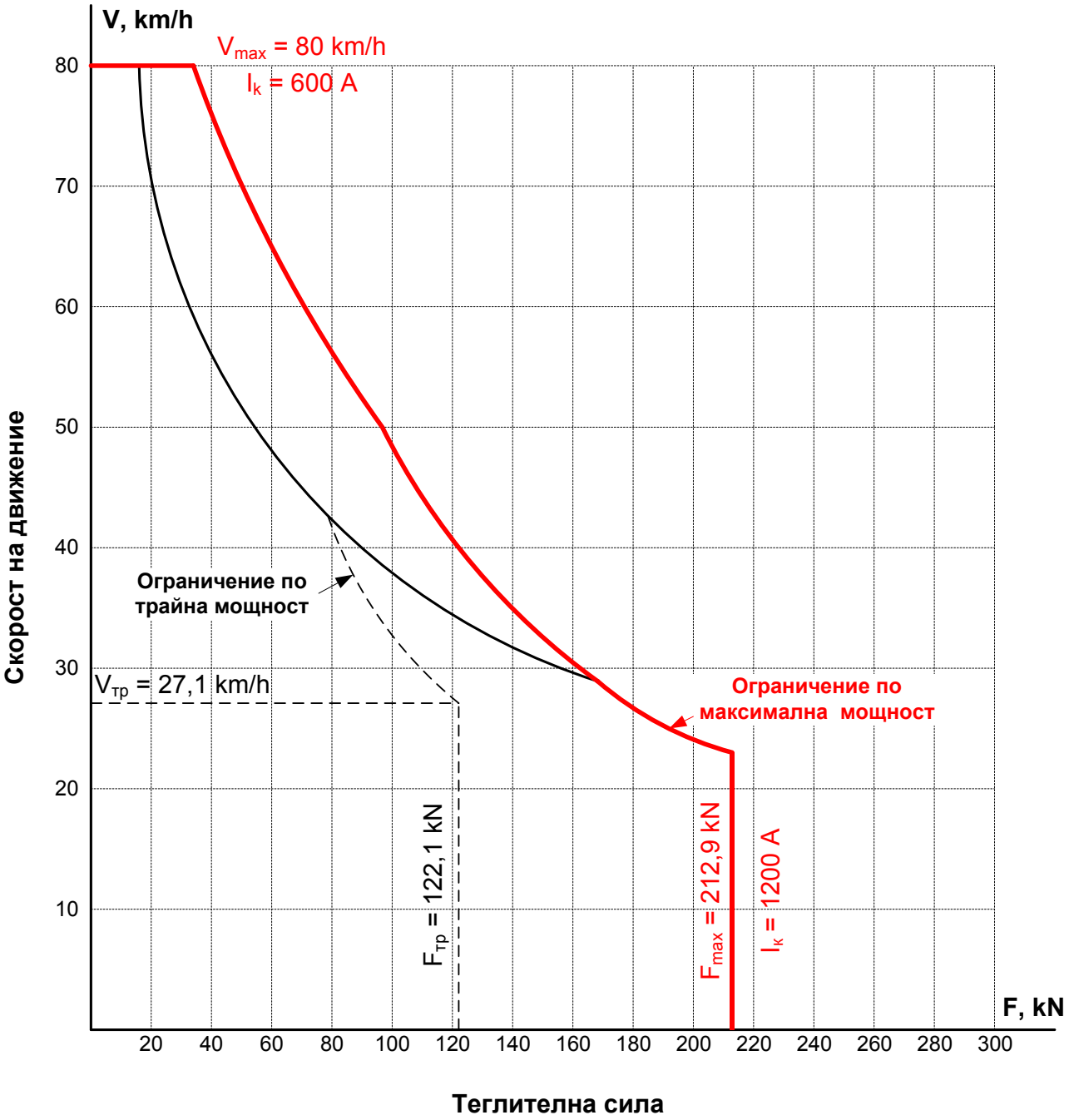
3. ТЕХНИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ НА ТОКОИЗПРАВИТЕЛИТЕ ЗА ТЯГОВИТЕ ДВИГАТЕЛИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ЛОКОМОТИВИ ŠKODA 56E1 – БДЖ СЕРИЯ 61

Тяговите токоизправителни блокове на локомотив серия 61 са конструирани с използване на силови полупроводникови вентили (тиристори и диоди) таблетъчен тип (фиг.1 и фиг.3). Всеки един от токоизправителните блокове за захранване на котвените намотки е изграден от тиристори тип TV 978-1000/24 NDO и диоди тип DV878-1600/24. Охлаждането на полупроводниковите елементи в токоизправителите е маслено, с принудителна циркулация на маслото. Охлаждането на маслото се осъществява в маслен радиатор, принудително обдухван от вентилатор.

Основните електрически параметри на котвения преобразувател са:

- Номинално напрежение - 750 V;

- Траен ток - 740 А;
- Краткотраен ток (за 5 минути) - 1200 А.



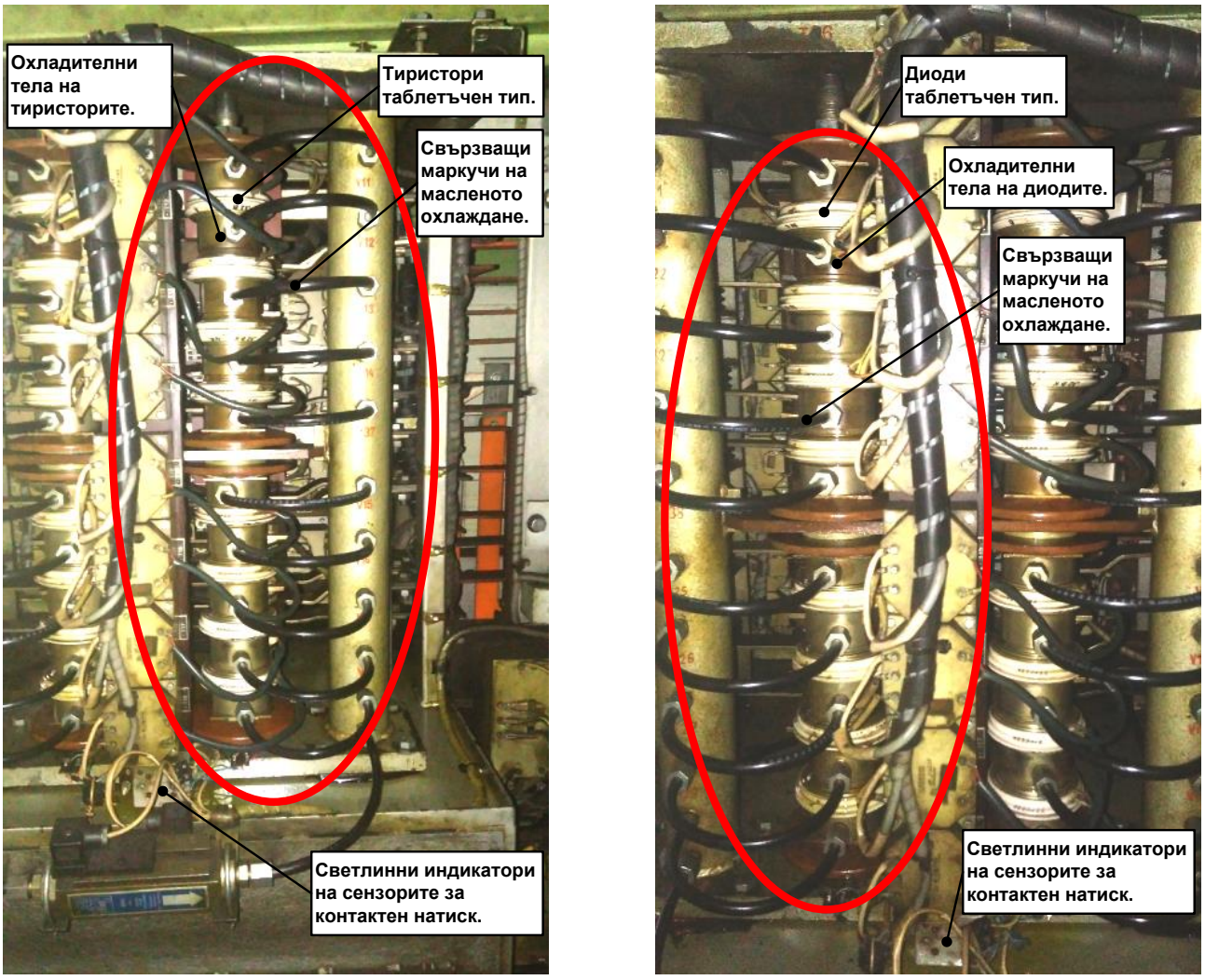
Фиг.2. Теглителна характеристики на маневрени локомотиви серия 61

Основните електрически параметри на токоизправителя на възбудителните намотки са:

- Номинално напрежение - 2x165 V,
- Траен ток -150 А,
- Краткотраен ток (за 5 минути) - 170 А.

Полупроводниковите вентили на котвения преобразувател са монтирани в специална рама, която е предназначена и за разпределяне на силата на натиск върху

тиристорите и диодите. Контактният натиск върху тях и охлаждащите тела се контролира чрез сензори за контрол на натиска, изпълнени с микропревключватели. Сензорите (микропревключвателите) са настроени за сила на натиск от 30 kN, като (фиг.3).



а) **б)**

Фиг.3. Токоизправител на котвените намотки на тяговите двигатели на локомотиви Škoda 56E1 – БДЖ серия 61

а) разположение на тиристорите; б) разположение на диодите

Основните технически параметри на тиристорите тип TV 978-1000/24 NDO и диодите тип 5SDD 48H3200 (използвани при ремонти като аналог на DV878-1600/24) са посочени съответно в табл.2 и табл.3.

Посочените в табл.2 и табл.3 технически параметри на полупроводниковите вентили се отнасят само конкретните типове тиристори и диоди. При използване на техни аналози част или всички технически параметри могат съществено да се различават, например при оригиналните диоди DV878-1600/24 максималната им работна температура е 125°C, а номиналната сила на натягане е 30000 N.

Таблица 2

Основни технически параметри на тиристори тип TV 978-1000/24 NDO

Електрически параметри	Стойност
$\mathbf{U_{dc}}$ (U_{RRM}, U_{CEO}, U_{max})	2400 [V]
$\mathbf{I_{dc\ max}}$ (T_c/T_a=25÷160°C)	1290 [A]
$\mathbf{I_{dc\ max}}$ (T_c/T_a=70÷79°C)	1290 [A]
du/dt (критична скорост на нарастване на напрежението)	1000 [V/μs]
di/dt (критична скорост на нарастване на тока)	50 [A/μs]
$\mathbf{t_f}$ (време за изключване)	800000 [ns]
Топлинни и механични параметри	**Стойност**
$\mathbf{T_{min}}$ (минимална работна температура)	-40 [°C]
$\mathbf{T_{max}}$ (максимална работна температура)	125 [°C]
$\mathbf{R_{th-c}}$ (топлинно съпротивление преход-корпус)	0,016 [°C/W]
$\mathbf{F_{min}}$ (минимална сила на натягане)	27000 [N]
$\mathbf{F_{max}}$ (максимална сила на натягане)	33000 [N]
$\mathbf{F_{nom}}$ (номинална сила на натягане)	30000 [N]

Таблица 3

Основни технически параметри на диоди тип 5SDD 48H3200 (аналог на DV878-1600/24)

Електрически параметри	Стойност
$\mathbf{U_{dc}}$ (U_{RRM}, U_{CEO}, U_{max})	3200 [V]
$\mathbf{I_{dc\ max}}$ (T_c/T_a=25÷160°C)	4708 [A]
$\mathbf{I_{dc\ max}}$ (T_c/T_a=70÷79°C)	4708 [A]
$\mathbf{U_F}$ (максимално обратно напрежение)	1,2 [V_{DC}]
$\mathbf{I_R}$ (обратен ток)	100000 [μA]
$\mathbf{I^2t}$ (T_c/T_a =25°C, t = 8,3 ms)	17622 [$A^2s.10^3$]
Топлинни и механични параметри	**Стойност**
$\mathbf{T_{min}}$ (минимална работна температура)	-40 [°C]
$\mathbf{T_{max}}$ (максимална работна температура)	160 [°C]
$\mathbf{R_{th-c}}$ (топлинно съпротивление преход-корпус)	0,008 [°C/W]
$\mathbf{F_{min}}$ (минимална сила на натягане)	45000 [N]
$\mathbf{F_{max}}$ (максимална сила на натягане)	55000 [N]
$\mathbf{F_{nom}}$ (номинална сила на натягане)	50000 [N]

4. АНАЛИЗ НА ВЪЗМОЖНИТЕ ПРИЧИНИ ЗА ПОЯВА НА ОТКАЗИ В ТОКОИЗПРАВИТЕЛНИТЕ БЛОКОВЕ НА ЛОКОМОТИВИ ŠKODA 56E1 – БДЖ СЕРИЯ 61

Теоретично възможните причини за поява на откази в токоизправителните блокове на маневрените локомотиви Škoda 56E1 – БДЖ серия 61са следните:

- Изгаряне на тиристори и/или диоди причинено от прегряване;
- Електрически пробиви на тиристори и диоди, следствие непогасени пренапрежния;
- Механични счупвания на полупроводниковите вентили, следствие при-

лагане на по-висока сила на натиск от допустимата за конкретната конструкция тиристори и диоди.

Установените при изследването причини за откази в токоизправителите на котвените намотки са следните:

➢ **Причини от неелектрически характер:**

• Автоматичното изключване на маслената помпа след изключване на тягата води до спиране на циркулацията на охлаждащото масло и допълнително прегряване на тиристорите и диодите;

• Изгаряне на тиристори и/или диоди предизвикано от прегряването им, следствие намален топлообмен между охладители и вентили от по-високо топлинно съпротивление R_{th-v} (топлинно съпротивление корпус-охладител) при недостатъчен контактен натиск;

• Прекъсване охлаждането на токоизправителите, следствие нарушаване целостта на хидравличните съединения, свързани към охладителните тела на силовите полупроводникови елементи;

• Недостатъчно охлаждане на маслото, следствие запушвания в маслениият радиатор;

• Механични счупвания на таблетъчните вентили при загряването им, причинени от пренатягане, следствие нефункциониращи сензори за контрол силата на натиск между вентилите и охлаждащите тела.

➢ **Причини от електрически характер:**

• Манипулиране от страна на машинистите на защитното реле, подаващо сигнал към електронния блок за блокиране на тягата при нарушен режим на охлаждане на токоизправителите;

• Електрически пробиви на тиристори и диоди предизвикани от непогасени пренапрежния от защитните R-C групи, следствие стареене на кондензаторите в тях.

Поради липса в локомотивните депа на точна отчетност за вида и броя на настъпилите откази в токоизправителните блокове, не беше възможно да се направи анализ за честотата и отделната тежест (дял) на всеки от тях.

5. ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

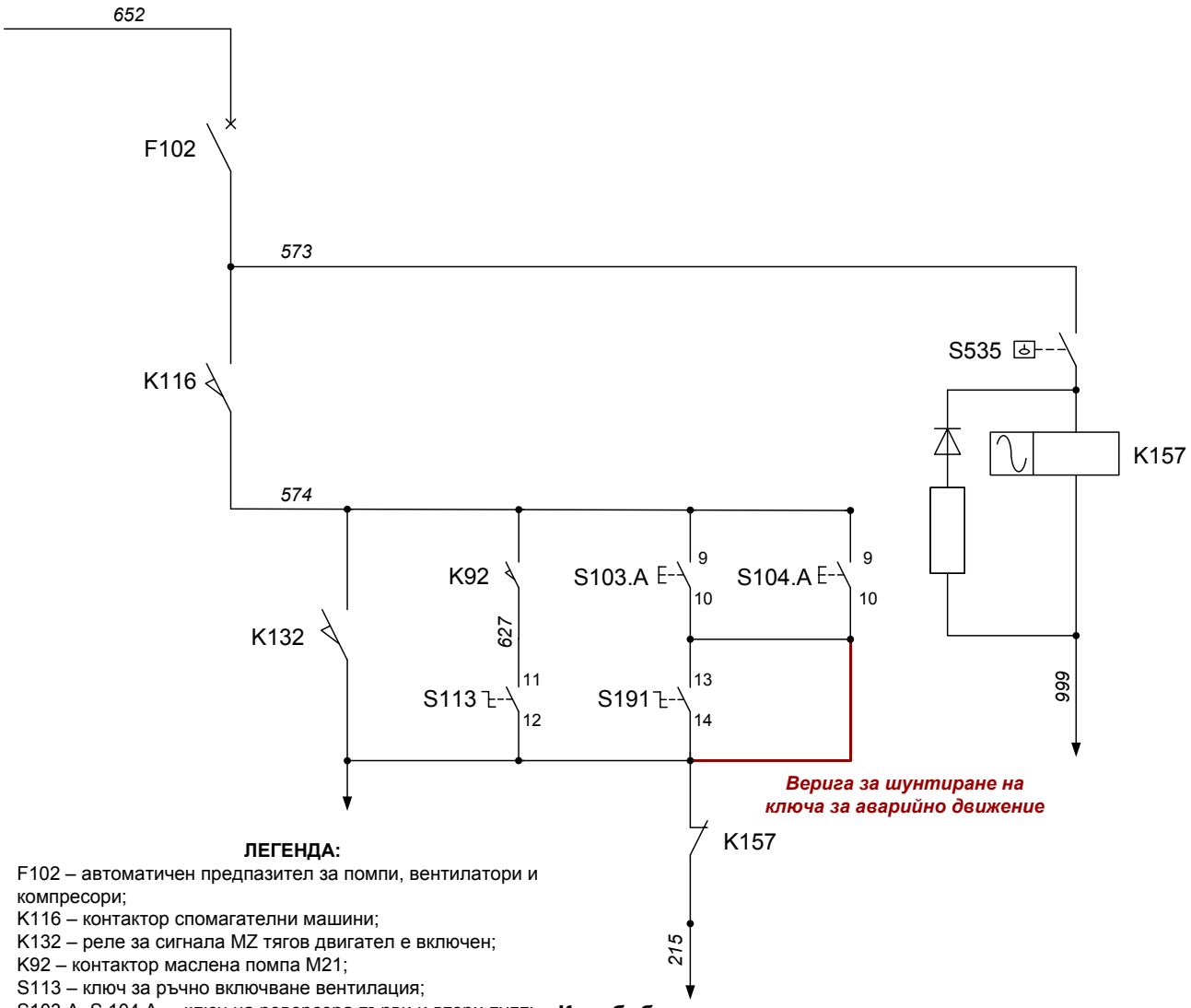
Получените резултати от проведеното изследването позволяват да са направят следните изводи:

❖ След спиране на помпата, горещо масло остава в маркучите към охладителните тела, те се нагряват до висока температура и се ускорява стареенето им.

❖ Нарушената механична якост на маслените съединения към охладителите води до скъсване, предизвикано от рязкото повишаване на налягането в охладителната система при последващото стартиране на маслената помпа.

❖ Съществуващата система за контрол на охлаждането на токоизправителите не е достатъчно ефективна, тъй като контролира само дебита на охлаждащото масло, но не и темпертурата му [2].

❖ Автоматиката за блокиране на тягата при нарушен дебит на охлаждащото масло е лесно достъпна за манипулиране от страна на машинистите.



Фиг.4. Схема за преустройство на електрическата верига за управление на маслената помпа на локомотиви Škoda 56E1 – БДЖ серия 61

6. ПРЕПОРЪКИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НАДЕЖДНОСТТА НА ТОКОИЗПРАВИТЕЛНИТЕ БЛОКОВЕ

➢ **Препоръки за реализиране в краткосрочен план:**

• Да се заменят използваните в момента силиконови хидравлични връзки (маркучи) към охладителните тела на полупроводниковите вентили с подходящи за целта масло- и термоустойчиви такива, като с това ще се повиши надеждността и ще се намалят отказите в токоизправителния блок.

• Да се преустрои електрическата верига за управление на маслената помпа, като контакторът за включване на двигател-помпата М21 остава захранен и след поставяне на тяговия контролер в $0^{-во}$ положение (фиг. 4).

➢ **Препоръки за реализиране в перспективен план:**

• Да се възложи проектиране и изработване на електронен блок за контрол и управление на маслената охладителна система, свързан със системата за контрол на тягата, и защитен от възможност за външно манипулиране.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Локомотивите серия 61 са конструирани за извършване на маневрена работа. Използването им за обслужване на крайградски пътнически влакове изисква от машинистите специфични умения за управление, които значително се отличават от тези прилагани при влаковите локомотиви.

Установените при изследването различни по характер откази в токоизправителите на котвените намотки, изискват по-детайлно изследване причините за тяхното възникване, което е предвидено за следващия етап на изследването. На този етап от работата, предлаганото преустройство в схемата за управление на маслената помпа в охладителната система на тяговите токоизправители, както и подмяната на използваните в момента силиконови хидравлични връзки (маркучи) с такива, предназначени за работа при високи температури, ще доведе до повишаване експлоатационната надеждност на маневрените електрически локомотиви Škoda 56E1 – БДЖ серия 61.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Деянов Д., С. Деянов, ***Локомотивите на Българските държавни железници***, София, 2008, стр. 302-304

[2] Пантев П., П. Ценов, Ч. Джамбазки, Г. Димитров, ***Системи за управление на електрическите локомотиви***, София, 1997, стр. 126-128

[3] ŠKODA-Plzen, ***Техническа документация на електрически локомотиви 56E1(серия 61)***, БДЖ, 1994

Автори: Иван Петров Петров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail adress: *ivanpetrov60@abv.bg*; **Иван Колев Ангелов**, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електрически транспорт”, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail adress: *ivanang@tu-sofia.bg*; **Георги Иванов Димитров**, ас. инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail adress: *dimitrov_gd@mail.bg*.

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: гл. ас. д-р Тодор Йонов

ИЗГРАЖДАНЕ НА СТЕНД ЗА РАБОТА С МОДУЛ ЗА ВЕКТОРНО ИЗМЕРВАНЕ (PMU)

Димитър Богданов, Тони Димитров
Александра Хальясмаа, Станислав Ерошенко

Резюме: *Електро Енергийните Системи (ЕЕС) със своята сложност налагат прилагането на надеждни и ефективни средства за наблюдение (измерване), управление и защита. В резултат на своята сложност и покриване на големи територии (цели държави, континенти), последствията от повредите в ЕЕС за кратко време могат да се разпространят върху голяма част или върху цялата енергосистема, да предизвикат авария в системата и да причинят значителни икономически загуби. Една от съвременните технологии за повишаване надеждността на ЕЕС е въвеждането на система за наблюдение и защита базирана на Модулите за Векторно Измерване (PMU). В статията са представени някои основни аспекти на приложението на PMU и концепцията за изграждане на стенд за лабораторна работа с PMU модул в лаборатория „Релейна Защита“ на Технически Университет - София.*
Ключови думи: *векторно измерване, стенд, лаборатория, демонстрация*

DESIGN OF LABORATORY TEST SYSTEM FOR EXPERIMENTAL WORK WITH PHASOR MEASUREMENT UNIT (PMU)

Dimitar Bogdanov, Toni Dimitrov
Alexandra I. Khalyasmaa, Stanislav A. Eroshenko

Abstract: *The Electrical Power Systems (EPS) impose requirements for reliable and effective monitoring (measurement), control and protection. These requirements result of the EPS complexity and the fact that vast territories are covered – countries, continents. The consequences of faults in the EPS for a very short time can extend to large-scale disturbances and to cause cascading faults leading to serious economic loses. One of the contemporary technologies for EPS reliability improvement is the implementation of systems for monitoring and protection based on the Phasor Measurement Units (PMU). In the paper is presented some overview information for PMU application and the design of laboratory facility for work with PMU in the „Relay Protection“laboratory of Technical University of Sofia.*
Keywords: *phasor measurement unit, laboratory model, demonstration*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Отсъствието на синхронизация между системите за измерване и защита разположени в различни точки на ЕЕС затруднява формирането на оптимални сигнали за овладяване на смущения и аварии обхващащи голяма територия. Без

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

синхронизирани измервания и регистрации на събития анализът на възникналите събития е труден [4,5,6]. При анализ на записи от събития, отсъствието на точна синхронизация води до проблеми свързани с определяне на първопричините за повредата, последователностите от действия на апаратурата и цялостното развитие на процесите. Съвременното техническо решение за ограничаване на тези проблеми е възможността за прилагане на Модулите за Векторно Измерване (в англоезичната литература – PMU/Phasor Measurement Unit, /това съкращение ще бъде използвано в статията/). Тези устройства позволяват синхронизирани измервания в реално време на напреженията, токовете, мощностните потоци и показателите за качество на енергията в ЕЕС [1,7]. Стойностите на токовете и напрежението се регистрират като комплексна амплитуда, което позволява те да бъдат регистрирани като „вектори“ – по модул и фазов ъгъл спрямо началото на координатната система. За опорно време „репер“ се използва единното време (UTC), което се формира в PMU от получените сателитни сигнали от системата за глобално позициониране (GPS). Опорната (еталонна) честота се формира на база на UTC в модула. По този начин, анализът на състоянието на ЕЕС се осъществява чрез синхронизирани измервания, едновременно в различни точки от структурата й. При загуба на GPS сигнал – PMU модулите осигуряват маркиране по време на база на вградения часовник. При възстановяване на GPS приемането се прави корекция на времето на вградения часовник.

2. СМУЩЕНИЯ В ЕЕС, НЕОБХОДИМОСТ ОТ СИНХРОНИЗИРАНИ ИЗМЕРВАНИЯ

Нормалната работа на ЕЕС изисква непрекъснато поддържане на баланса „производство – потребление” (баланс на мощностите). Той се осъществява чрез регулиране на мощността на генераторите и честотата. Причини за нарушаване на баланса могат да бъдат:

- Аварийно изключване на някои от елементите на системата – при повреда или недопустим режим.
- Дефицит на активна мощност в резултат отпадане на генератори, недостиг на първичен ресурс за производство на ел. енергия.
- Понижаване на честотата (дефицит на мощност, повишен товар).
- Отклонение на напрежението (промяна на товара, проблеми с балансирането на реактивната мощност).
- Лъжливо заработване или незаработване на системната автоматика и защити (софтуерни проблеми, неправилна настройка, външни смущения и въздействия).

Автоматичните действия за овладяване на процесите в ЕЕС могат да се използват като разпределени средства, централизирана система или комбинация от двете. Елементите от такава система са прилаганите АЧР (Автоматика за Честотно Разтоварване), АПАХ (Автоматика за Предотвратяване на Асинхронния Ход), АПВ (Автоматично Повторно Включване), АРВ (Автоматичното Регулиране на Възбуждане със съответните функции за форсиране на възбуждането) и др. [8,9].

При „класическите“ генератори в ЕЕС – електрически машини задвижвани от

турбини (водни, парни, газови) или ДВГ, основен фактор за овладяване на процесите е възможността турбинният/двигателният регулатор и възбудителната система да осигурят съответните коригиращи (регулиращи) действия по отношение на честотата (f_G) респективно активната мощност (P_G) и напрежението (U_G) респективно реактивната мощност (Q_G), за да се запази устойчивата работа на ЕЕС [10,11].

Математически за всеки синхронен генератор в ЕЕС ъгълът на ротора δ_i (i = 1,2, ... n) се определя от уравнението, с което може да се характеризира процеса на люлеене:

$$\frac{\delta_i(t)}{dt} = \omega_i(t) - \omega_0 \quad (2.1)$$

$$\frac{d\omega_i(t)}{dt} = \frac{1}{M_i}[Pm_i(t) - Pe_i(t)] \quad (2.2)$$

където: - M е инерционният момент; - Pm е механичната мощност на вала на агрегата; - Pe е изходната мощност; - ω е скоростта на генераторния ротор;

При възникване на повреда, генерираната електрическа мощност претърпява промяна, но механичната входна мощност остава непроменена (ако няма въздействие на първичния двигател). Ако интервалът на вземане на измервания Δt е много кратък, се приема, че производството на електроенергия е постоянно през този интервал от време. Следователно уравнението на люлеенето в дискретна форма за всеки генератор е изразено по следния начин:

$$\Delta t = t_k - t_{k-1} \quad (2.3)$$

$$\Delta\omega_i(t_k) = \frac{Pm_i(t_k) - Pe_i(t_k)}{M_i}\Delta t \quad (2.4)$$

$$\omega_i(t_k) = \omega_i(t_{k-1}) + \omega_i(t_k) \quad (2.5)$$

$$\delta_i(t_k) = \delta_i(t_{k-1}) + \frac{1}{2}[\omega_i(t_{k-1}) + \omega_i(t_k)]\Delta t \quad (2.6)$$

Последните уравнения (2.5), (2.6) могат да бъдат разгледани по обратната теорема на Ойлер и на трапецовидното правило [15,16]. Стойностите на ъглите за всеки момент се изчисляват от измерванията на големината и фазата на напреженията и токовете, осигурени от PMU устройства, разположени на шините за високо напрежение на системата. Тази процедура е необходима, тъй като PMU устройствата не предоставят информация, която може да се използва директно за анализ на динамичната устойчивост. PMU измерват електрически променливи в реално време (напрежения и токове), докато механичните променливи са необходими за динамичната оценка на стабилността (например ъгъл и скорост на ротора на генератора). За да се изведе ъгъла на генераторния ротор, уравнението, което трябва да се използва, е:

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{(X_q + X_e)I\cos\varphi}{V_t + (X_q + X_e)I\sin\varphi}\right) \quad (2.7)$$

Където съответно: -I токът, - Vt напрежението и ъгълът на напрежение -φ за съответната се получават от монтирания PMU. Xe представлява съпротивлението между изводите на машината и точката в мрежата, където е инсталирано устройството PMU, докато Xq е напречният реактанс. Използва се достатъчно малък интервал на вземане на измервания Δt = 0,4167 ms (или друг подходящ) [12].

PMU измерват величини с честота 50/60 Hz (напрежения и токове) с различна (подлежаща на настройка) честота на сканиране („sampling”). Примерна интензивност на записани стойности може да бъде 48 точки за период (2400 измервания за секунда при 50Hz / 2880 измервания за секунда при 60Hz/). Аналоговите сигнали се преобразуват в цифрови (двоични) посредством Аналого-Цифров Преобразувател (АЦП) (Analog to Digital converter /ADC/) отделно за всяка фаза. Следва да се има предвид че броя измервания обикновено е фиксиран, а подлежи на настройка броя записани стойности. Синхронизацията на преобразуването от АЦП се осъществява посредством тактов генератор (часовник) с висока точност за обща синхронизация от системата за глобално позициониране GPS [2,3], като на всяка записана стойност се добавя запис за време по UTC.
Моментната стойност на изменяща се синусоидално величина може да бъде представена чрез комплексно число, познато като фазов вектор:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \tag{2.8}$$

Векторно тази моментна стойност може да бъде представена както следва:

$$x(t) = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} (\cos\phi + j\sin\phi) \tag{2.9}$$

Трябва да се отбележи, че при векторно представяне, честотата ω не участва. Големината (модулът) на фазовия вектор е ефективната стойност на синусоидата $X_m/\sqrt{2}$ и неговият фазов ъгъл е ϕ - фазовият ъгъл и (2.8). Положителните фазови ъгли се измерват в посока обратна на часовниковата стрелка от реалната ос. Тъй като честотата на синусоидата се подразбира във векторното определение, ясно е, че всички фазови вектори, които са включени в същата векторна диаграма трябва да имат една и съща честота. Когато се осъществяват реални векторни измервания, входните сигнали не са с постоянни параметри и тяхната честота може да се изменя. При дисбаланс между производство и потребление на електрическа енергия в обединена ЕЕС е възможно в резултат от оформянето на зони с различна честота да се стигне до сегментиране (разпадане на зони) [12,13,14].
За изграждане на система за ЕЕС базирана на PMU е необходимо изграждането на сървър(и) за събиране (концентрация) на данните. Концентраторът (Phasor Data Concentrator /PDC) обработва информацията, наблюдава и управлява PMU – обикновено от няколко до няколко десетки. В централната база алгоритмът за обработка на данни формира информация за системата като цяло за всички генератори и подстанции в системата през зададения интервал. Алгоритмът за обработка на данни може да бъде част т.нар. „Система за запазване целостта на системата“ (SIPS – System Integrity Protection).
Като информационни канали при различни приложения досега са били използвани телефонни линии, GSM канали, оптични канали за комуникация и др. Перспективен начин за пренасяне на информация, с оглед на развитие на съвременните технологии, са канали изградени от фибро-оптични кабели, с възможност за пренасяне на информация с висока плътност, малки смущения и малки закъснения.

3. ФУНКЦИОНАЛНО ОПИСАНИЕ НА МОДУЛ 1133А

В лаборатория „Релейна защита“ към ТУ-София бяха проведени лабораторни опити свързани със синхронизирани измервания на сигнали. Опитите бяха проведени с PMU модул 1133А на фирма Arbiter Systems [2].

Модулът 1133А на Arbiter Systems (фиг.1) се състои от няколко блока:

- GPS синхронизатор (разпознаване и обработка на сигналите);
- Токови и напреженови входове;
- Програмируеми усилватели;
- Мултиплексори;
- АЦП (аналого-цифрови преобразуватели);
- Цифров сигнален процесор;
- Хост процесор;
- Дисплей, светодиоди и бутони;
- Входно изходен I/O (input/output) модул.

Мултифункционалният измервателен модул на Arbiter Systems®, Inc. Модел 1133A Power Sentinel™ комбинира шест функции в едно компактно устройство (височина 44 mm), конструирано за вграждане в стандартни 19“ шкафове. Модулът 1133А предлага висока точност, гъвкавост и мултифункционалност. Функционално модулът осигурява поддръжка за синхронизирани приложения, с възможност да поеме водеща роля в измерването и анализа за обекта, към който е присъединен. Може да се използва и за основен часовник „master clock” за обекта и да синхронизира по UTC други блокове от системата за управление и защита. Определянето на фазовия ъгъл на системата вектори в точката на измерване, отчитането на показателите за качеството на енергията, високата точност на измерване на честотата и отклоненията във времето осигуряват функционални възможности за измерване на количества енергия за търговски цели, паралелно с функциите за WAM (Wide area Measurement)/WAP(Wide Area Protection). Разширената технология, включваща технологията за анализ на цифровия сигнал EnergyDSA ™ на Arbiter, позволява гъвкава и структурирана по усмотрение на потребителя работа [2].

Фиг.1. Модул 1133 А (външен вид).

Модулът 1133А дава възможност за измерване на величини осигурявайки висока точност от 0.025 % (собствена точност на измерване, точността на ТТ/НТ следва да бъде отчетена допълнително). Сравнявайки тази точност с традиционните измервателни устройства, които са точност типично не по-висока от 0.1 %, той е изключително полезен. Някои от основните параметри на PMU 1133А са представени в табл.1.

Аналоговите входни сигнали пропорционални на тока и напрежението в съответната точка на измерване, както и калибриращите сигнали се подават посредством

синхронизиран мултиплексор към двуканално АЦП. Всеки сигнал се измерва („семплира“) с интензивност от 10240 отчитания за секунда.
Сигналите за ток и напрежение за всяка фаза се измерват едновременно за да се елиминират грешките в изчисляването на мощността, които биха възникнали при отсъствие на едновременно измерване. Синхронизацията на часовника управляващ измерването на PMU модула е в рамките на 1 микросекунда, което позволява директно сравняване на фазови ъгли за ЕЕС и точно измерване на енергия за търговски цели.
PMU модулът може да осигури прецизно измерване на параметрите на мощностния поток, респективно енергията с нейните показатели на качество в непрекъснат режим, като прехвърля информация към сървър (концентратор) за данни за съответния обект (PDC). Целесъобразно е монтирането на PMU модул на всяко присъединение, където това е икономически целесъобразно. За възлови подстанции, съсредоточени генериращи мощности, системообразуващи линии и др. места в ЕЕС може да осигурява ценна информация която да позволи както покриване на голяма територия с функции за измерване и защита, така и за след авариен анализ. Форматът на данните регистрирани от PMU „coma separated values“ (*.CSV) позволява обработка с различни софтуерни средства, включително MSOffice Excel. Практически PMU модулът може да бъде интегриран в системи за събиране и обработка на данни за обекти както от тип SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), така и в други структури.
За правилната работа на PMU е необходимо антената за приемане на GPS сигнали да бъде монтирана на подходящо място. Мястото на монтаж трябва да осигурява добър хоризонт с постоянна видимост към траекториите на сателитите. Изборът на място може да бъде извършен с еталонни приемници за установяване на траектории, но може да се проведат опити с временно разполагане на GPS антената на различни места и отчитане на броя приемани сигнали (брой следени сателити). Използваната антена е представена на фиг.2.
За безопасната и безпроблемна работа на модула следва да има защита от атмосферни пренапрежения. Такава възможност се осигурява със защитен модул Arbiter Systems Model AS0094500 представен на фиг.3. Модулът AS0094500 защитава свързаното оборудване от вредните въздействия на атмосферното статично електричество и от шумове от близки попадение на мълнии или други електрически събития свързани с електромагнитната съвместимост на кабела за сигнал от антената. За правилната работа на защитния модул трябва да има осигурено добро заземяване на клемата за връзка към земя.

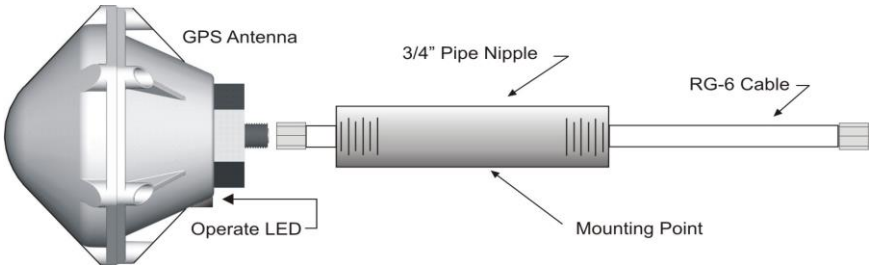
4. РЕЗУЛТАТИ ОТ СИНХРОНИЗИРАНИ ИЗМЕРВАНИЯ

За правилната работа на PMU е целесъобразно свързване към ТТ и НТ в съответната точка на ЕЕС. В лаборатория „Релейна защита“ опити бяха проведени посредством регистриране на 3-фазното захранващо напрежение. Предстои изграждане на стенд с товарни елементи, чийто импеданс да имитира товар. Реално измерване може да се изпълни при свързване към ТТ/НТ на ниво средно напрежение в някой от трафопостовете захранващи ТУ-София.

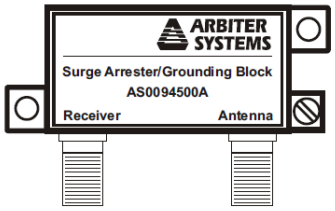
На фиг.4 е представен кратък време интервал (1s) с регистрирани стойности на 3-те фазни напрежения (на 14 Август 2017).

Таблица 1

Входове		
	Номинален обхват	Допустим обхват
Токови (3L/1L)	2.5- 5 -10 -20 A	2.9 -5.9 -11.7 -23.5 A
U (3L/1L)	0 ÷ 69 – 120 – 240 – 480 V	88 – 175 – 350 – 700 V
Мощност	Продуктът е с номинално напрежение и ток (W, VA, VAR)	
Честота	45 ÷ 65 Hz, Хармоници – до 3 kHz	
Компенсация		
ТТ, НТ	Фазова компенсация ТТ с 12-точкова нелинейна интерполация	
Трансформатор	Компенсация на загуби в стоманата и намотките	
Изходни връзки	Свалящ се клемен блок, приемайки от 0.2 до 4 mm2 (AWG 24 до AWG 10) твърди или спираловидни проводници	
Интерфейс		
Светодиоди за състояние	Работа (зелено), Часовник (зелено), Аларма (червено), Повреда (червено)	
Дисплей	2 x 20 символа течен кристал (LCD)	
Бутони	8 бутона за състояние	
Флаш памет и съхранение да данни		
Капацитет	32 MB. Броят на записаните записи зависи от избраните елементи.	
Данни	Избираеми от всички функции, измерени и сумирани от модула. Всеки запис се съхранява с маркери за време.	
Интервали на запис	По избор. По подразбиране 15 min. Могат да бъдат избрани и други интервали от една минута. Данните за събитията се съхраняват при настъпване на събитието.	
Експлоатация	100 000 цикъла на съхранение (минимум).	
Синхронизация		
Проследяване	GPS-L1, 12-канален (следи до 12 спътника).	
Свързване	Обикновено до 2 min	
Точност	UTC-USNO ± 1 μs (нужен е 1 сателит с подходяща позиция).	



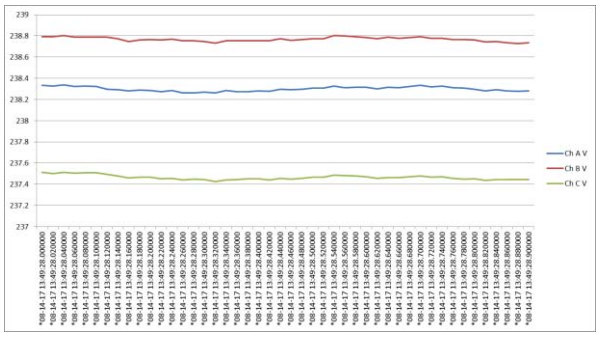
Фиг.2. GPS антена.



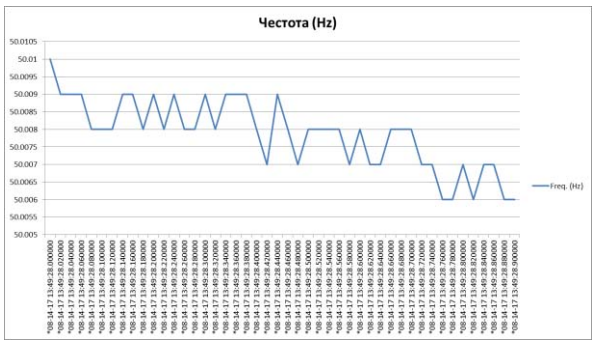
Фиг.3. Защита от пренапрежения.

Таблица 2

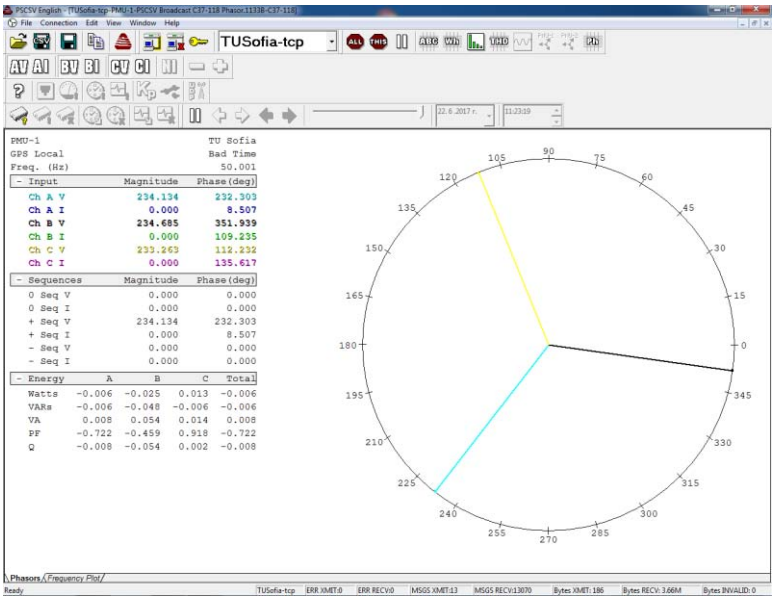
Размери	77.5 d x 66.2 mm
Тегло	170g.
Свързване	тип F
Мощност	Модулът 1133A осигурява +5 V DC, които се подават по кабела
Кабел	50Ω / до 15 m (може и по-дълги кабели)



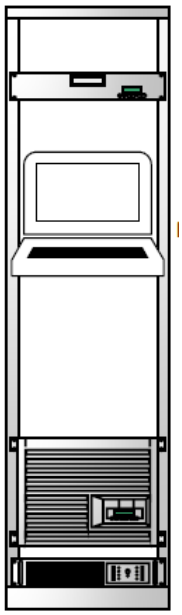
Фиг.4. Регистрирани стойности на фазни напрежения.



Фиг.5. Регистрирани стойности за стойността на честотата.



Фиг.6. Регистрирани стойности за стойността на честотата.



Фиг.7. Лабораторен стенд.

Софтуерът за връзка с модула позволява да се следи за обема заета памет. Състоянието на паметта може да бъде прочетено и от екрана на самия PMU модул. Софтуерът за събиране на данни от PMU позволява последваща обработка и изчисляване на различни параметри характеризиращи товаровия график (измерения профил на мощностния поток), количества енергия, показатели за качество на енергията и др.

На фиг.5 е представен кратък време интервал (1s) с регистрирана стойността на честотата (14.08.2017). На фиг.6 е представено изображение от софтуера за визуализация на регистрираните данни във „векторен“ вид.

5. ИЗГРАЖДАНЕ НА СТЕНД ЗА ЛАБОРАТОРНА РАБОТА С PMU МОДУЛ В ЛАБОРАТОРИЯ „РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА“ НА ТУ-СОФИЯ

Изграждането на стенд на база на модула 1133A, с цел провеждане на лабораторни демонстрации, ще бъде осъществено в лаборатория „Релейна защита“ в Технически Университет – София, Електротехнически факултет. За целта всички необходими компоненти за постановката ще бъдат монтирани в 19“ RACK (шкаф за електронна техника), както е представено на фиг.7.

Предвижда се монтаж на PMU, компютър (сървър), UPS и блок монитор + клавиатура за монтаж в шасито. Компютърът ще изпълнява функцията на локален PDC, който посредством LAN на ТУ-София може да бъде свързан към международни сървъри за концентриране на данни от PMU.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С нарастващия интерес към PMU и системите за мониторинг на големи територии (WAMS), налице е перспективата тези модули да бъдат прилагани на все повече места в ЕЕС по целия свят. До голяма степен успехът на това прилагане зависи от спазването на стандартите в индустрията, касаещи PMU. Осъществяването на PMU технологиите изисква инвестиция и ангажимент от страна на предприятията и системните оператори. Инвестицията включва: проучвания, закупуване на оборудване и внедряването му, поддръжка, разпределение на ресурсите и обучение. За да могат предприятията и системните оператори да направят стъпка към въвеждането на PMU в ЕЕС, е желателно да установят и изберат ключови приложения, които ще бъдат от полза на отделните системи и взаимосвързаните мрежи като цяло.

Данните от PMU могат да бъдат използвани за целите на зашитата ЕЕС, като в реално време се регистрират недопустими отклонения на параметрите на работа на ЕЕС / зони от нея.

Направените измервания в лаборатория „Релейна защита“ на ТУ-София дават информация за локалните параметри на крайна точка на ЕЕС.

Изграждането на стенд включващ PMU, сървър за концентриране на данни и необходимите аксесоари ще даде възможност за демонстрация на технологията на студентите.

Свързването със сървър обхващащ територията на ENTSO-E ще позволи обмяна на информация с други точки на обединената Европейска система.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 50160:2010 - ***Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените електрически мрежи***.

[2] Arbiter Systems, ***Model 1133A power sentinel GPS-synchronized power quality revenue standard operation manual***, file available at: WWW.ARBITER.COM

[3] Каталози на фирма Arbiter Systems, сайт: www.arbiter.com.

[4] A.Guzmán, D.Tziouvaras, E.O. Schweitzer, Ken E. Martin, ***Local and wide-area network protection systems improve power system reliability***, 2004.

[5] J.Bertsch, C.Carnal, D.Karlsson, J. McDaniel, K.Vu, ***Wide-Area Protection and Power System Utilization***, Proceeding of the IEEE, Vol. 93, No. 5, May 2005.

[6] A. Phadke, J. Thorp, “Synchronized Phasor Measurements and Their Applications”, New York: Springer, USA, 2008.

[7] Matanov N., S. Siderov, ***Algorithm for evaluating the basic characteristics of the electromagnetic compatibility of electrical power systems by digital analyzer***, Collection of scientific works of the X International Scientific and Technical Conference, Saransk, December 13 - 14, 2012. pp. 239-248.

[8] M. Begovic, D. Novosel, D. Karlsson, Ch. Henville, G. Michel, ***Wide-Area Protection and Emergency Control***, IEEE, Proceeding of the IEEE, Vol. 93, No. 5, May 2005.

[9] K. Narendra, D. Rangana Gurusinghe, A. Rajapakse, ***Dynamic Performance Evaluation and Testing of Phasor Measurement Unit (PMU) as per IEEE C37.118.1 Standard***, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008

[10] R B. Singh, N.K. Sharma, A.N. Tiwari, K.S. Verma, S.N. Singh, ***Applications of phasor measurement units (PMUs) in electric power system networks incorporated with FACTS controllers***, International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 3, No. 3, 2011, pp. 64-82, 2011

[11] Д. Богданов, Н. Харизанова, ***Модули за векторно измерване (PMU) за системи за релейна защита***. Публикация на Научна Конференция „ЕФ2014“, гр. Созопол, България, 2014 г.

[12] Y. Mitani, T. Kudo, A. Satake, K. Basri, ***Monitoring the Wide Area Power System Dynamics by Phasor Measurement Units Based on Campus WAMS Strategy***. Proceedings of the 19th World Congress The IFAC, Cape Town, SA. Aug. 24-29, 2014

[13] North American Synchrophasor Initiative (NASPI) ***Performance & Standards Task Team (PSTT) Guide for Installation of Multi-Function Phasor Measurement Units (MF-PMUs)*** October 10, 2014.

[14] Paul Wright, Project Coordinator ENG52: ***SmartGrids2 "Measurement Tools For Grid Stability and Quality Management"*** M18 Workshop, 3rd February 2016.

[15] D. E. Echeverría, J.L. Rueda, ***Improved method for Real-Time Transient Stability Assessment of Power Systems***, IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2012.

[16] A. Allen, S. Santoso, E. Muljadi, ***Algorithm for Screening Phasor Measurement Unit Data for Power System Events and Categories and Common Characteristics for Events Seen in Phasor Measurement Unit Relative Phase-Angle Differences and Frequency Signals,*** Technical Report NREL/TP-5500-58611, August 2013 *https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58611.pdf*.

Автори: **Димитър Христов Богданов**, доц. д-р инж., катедра „Електроенергетика", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail adress: *dbogdanov@tu-sofia.bg*; инж. бак. **Тони Руменов Димитров**, дипломант, кат. „Електроенергетика", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; **Alexandra I. Khalyasmaa**; **Stanislav A. Eroshenko**; Automated electrical systems department; Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; Ekaterinburg, Russia

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Николай Матанов

ТЕХНИКО-ИКОНОМИЧЕСКА ОЦЕНКА НА ПРИЛОЖЕНИЕТО НА БАТЕРИИ ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ

Виктор Гърбев

Резюме: *В докладът е извършен преглед на практическите аспекти, свързани с приложението на индустриални акумулаторни батерии като системи за съхранение на енергия в електроенергийната система. Направен е преглед на моделите на работа и е предложена принципна структура на модел за технико-икономическа обосновка. Разгледани са и някои нормативни ограничения за практическата работа на този тип системи в пазарите на енергия и спомагателни услуги.*
Ключови думи: *акумулаторни батерии в ЕЕС, технико-икономическа обосновка, нормативни ограничения*

TECHNO-ECONOMIC ASSESSMENT IN IMPEMENTING BATTERY ELECTRICITY STORAGE

Viktor Garbev

Abstract: *This report contains a review of the practical issues related to the implementation of battery storage in the power systems. It presents an overview of the possible use cases and a suggestion for basic structure of techno-economic modeling. In addition, the report analyses some of the regulatory barriers which currently limit the implementation of battery systems in the power and ancillary serves markets.*
Keywords: *battery storage in power systems, techno-economical modeling, regulatory barriers*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Изменението на структурата на енергийния пазар, растящият дял на ВЕИ и изменението на кривата на потребление изменят задачата за първично регулиране на честотата и вторично регулиране на честотата и обменните мощности в ЕЕС. Специално за България, при увеличаване на дела на ВЕИ в системата, резервът за вторично регулиране „надолу“ ще бъде недостатъчен за осигуряване на необходимото ниво на управляемост на ЕЕС. Това от своя страна предполага изграждането на нови балансиращи източници, характеризиращи се с висока маневреност по отношение на спиране/пускане и голяма скорост на изменение на работната активна мощност [1].

Едно от възможните технологични решения е инсталирането на системи за съх-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ранение на ел. енергия от типа “battery storage“ - индустриални акумулаторни батерии (ИАБ). Те имат предимството на кратки срокове на изграждане, ниска степен на вредно влияние върху околната среда и бърза, автоматизирана активация.

Въпреки своите предимства, тази технология все още не се прилага широко на пазарен принцип (изключение са САЩ, Великобритания и др.) поради следните ограничения: (i) сложност при съставянето на модел за технико-икономическа целесъобразност и (ii) нормативни ограничения за участие в пазара на енергия и спомагателни услуги.

В разработката са разгледани някои от практическите аспекти, свързани с приложението на системите тип ИАБ и е направен литературен и справочен преглед на съществуващите приложения.

Изведен е принципен модел за активация (диспечиране) и технико-икономически модел на работата на примерна ИАБ система с Lithium-Ion батерия. Посочени са и някои препоръки за развитие на нормативната база, което може да позволи практическото приложение на технологията в ЕЕС на България.

2. ПРИЛОЖЕНИЯ НА ИАБ В ЕЕС

Възможностите за балансиране на ЕЕС се предоставят чрез изменение на работната мощност на производители, предоставяне на услуги чрез междусистемни връзки с други контролни зони, изменение на товара на потребители или чрез активиране на системи за съхранение на енергия.

Системите за съхранение на енергия използват различни принципи на преобразуване на електроенергията. Те биват: механични/кинетични (Помпено-акумулаторни ВЕЦ), електрически (кондензатори), химически (водородни клетки), термодиначни (компресиран въздух), термични и електрохимически (акумулаторни батерии).

Към края на 2015 г. в световен мащаб в ЕЕС работят повече от 50 ГВт мощности за съхранение на енергия, като 95% от тях са системи тип ПАВЕЦ. Развитието на технологиите и поевтиняване на себестойността на литиево-йонните батерии е предпоставка за по-широкото им приложение в бъдеще [2]. Цената на този тип ИАБ спадна с над 70% за последните години, което ще позволи икономически ефективно инсталиране на над 8 ГВт ИАБ до 2025 г. [3]. В страни като САЩ и Великобритания вече работят или са в процес на изграждане ИАБ с мощност между 1 МВт и 100Мвт.

Освен технологичното развитие и спадащите цени, ИАБ имат следните предимства като една от бъдещите технологии за балансиране в ЕЕС:

Гъвкави модулни конфигурации – ИАБ могат да се изпълняват като самостоятелни системи с мощност от няколко КВт до десетки и дори стотици МВт

Сравнително ниска степен на въздействие върху околната среда – системите заемат малка площ и не предполагат значителни изменения на ландшафта, изграждане на масивна железобетонна инфраструктура или предграждане на реки.

Географско разположение – ИАБ не изискват наличие на водни или други ресурси в близост, което ги прави подходящи за страни, в които няма налични

подходящи географски дадености или пък налични възможности са вече изчерпани.

Недостатъците свързани с приложението на ИАБ в ЕЕС са:

- Сложността на оценка на технико-икономическа целесъобразност поради спецификите на технологията, което възпрепятства инвестициите.
- Сравнително по-краткия експлоатационен живот.
- Деградацията (намаляване на използваемия капацитет) на батериите във функция от циклите на презареждане и температурните изменения.
- Сравнително по-малките възможности по отношение на енергиен капацитет (отдаване на енергия за повече от няколко часа).

3. ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА УЧАСТИЕ НА ИАБ В ЕНЕРГИЙНИТЕ ПАЗАРИ

Системите използващи ИАБ имат широк диапазон от приложения (фиг.1) в енергийните пазари в зависимост от:

- Вида на предоставяна услуга: енергия или мощност
- Пазар, на който участва собственика на системата: арбитраж на пазара ден-напред или в рамките на текущия ден, пазар на спомагателни услуги и др.
- Оператор на системата: потребител, производител, независим доставчик на услуги или мрежови оператор.
- Място на разположение на ИАБ: преди мястото на присъединяване на потребителя/производителя към ЕЕС или директно към ЕЕС като независим обект.

Съществуват изследвания за работа на ИАБ в ЕЕС, които най-често отчитат само един модел на използване (use case) – работа на балансиращ пазар, работа по изместване на товара (load shifting) или работа по доставка на услуги на системния оператор (регулиране на честота и мощност). Икономическата целесъобразност при тези случай се постига при много малко изолирани случай.

В същото време редица индустриални проучванията по въпроса [2, 3, 4] за приложение на ИАБ показват, че в повечето случаи инвестицията може да е икономически оправдана само, ако системите предоставя комбинация от услуги (service stacking). В този случай логиката е подобна на предоставянето на системни услуги от ТЕЦ – едновременно участие в енергия пазар и в пазара на спомагателни услуги.

Един от най-напредналите пазари за приложение на ИАБ е Великобритания, където освен възможностите за ценови арбитраж, системи за съхранение могат да участват пълноценно в търгове са спомагателни услуги [5]. Най-голям интерес

има към специално организирания търг за т.нар. Enhanced Frequency Response (комбиниращ първично и вторично регулиране).

Приложение	Услуги	Период
Изолирани системи и резервно захр.	Съхранение и отдаване ден/нощ	8-12 часа
	Аварийно захранване	1 мин- 1 час
Стабилизиране на мощност (зад електромера)	Крактовременно "стабилизиране" на мощност	1-15 мин
	Стабилизиране на мощност в рамките на деня	1-12 часа
Пазар на енергия и балансиращи услуги	Покриване на небалансите на група потребители	1-6 часа
	Балансираща мощност предоставена на ЕСО	1-6 часа
Спомагателни услуги	Първично регулиране на честота	1-15 сек
	Вторично регулиране на честота и мощност	30 сек -15 мин

Фиг.1. *Възможни приложения на ИАБ*

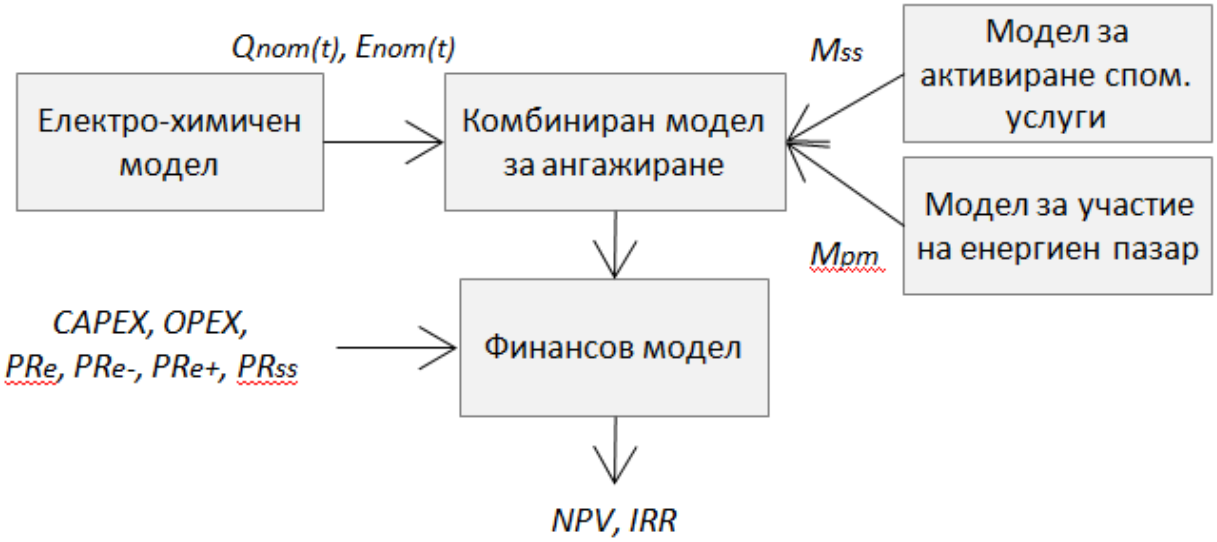
Недостатък на съществуващите изследвания е липсата на всеобхватен модел, който да опише работата на ИАБ при едновременното участие в пазара на енергия и пазара на спомагателни услуги (резерв) от гледна точка на независим оператор на системата за съхранение на енергия.

4. КОМБИНИРАН МОДЕЛ ЗА РАБОТА НА ИАБ В ЕНЕРГИЯ ПАЗАР И ПАЗАРА НА СПОМАГАТЕЛНИ УСЛУГИ

На фиг.2 е предложена блок-схема на комбиниран модел за диспечиране (ангажиране) на ИАБ и оценка на икономическа целесъобразност.

Електро-химичния модел на батерията задава ограничителните условия за максимален и минимален заряд/разряд (Dept of Discharge), времеви характеристики, степента на деградация, капацитет и енергия. Моделът за активиране от системния оператор извежда заданието (оценка, очакване) за продължителност и честота на активиране на услугата за предоставяне на резерв. Очакването за отда-

ване и съхранение на енергия на балансиращ пазар също се отчита като параметър. Комбинирания модел за ангажиране на системата определя работните режими и продължителността на работа за даден период отчитайки ограничителните условия. Финансовият модел отчита икономическите показатели – инвестиционни и оперативни разходи, цени на енергия и предоставяни услуги и извежда показатели за икономическа целесъобразност (Нетна Настояща Стойност и Норма на Възвръщаемост).



Фиг.2. *Блок-схема на комбиниран модел за ангажиране и оценка на икономическа целесъобразност на ИАБ*

Глобална целева функция е максимизиране на нетната настояща стойност max(NPV) . Ако моделът се разглежда от гледна точка на независим инвеститор, то при относителни фиксирани разходи за експлоатация целевата функциця може да се апроксимира като постигане на максимални нетни приходи ***max(REV)*** във функция от заангажирането за предоставяне на спомагателни услуги и участие на енергийния пазар

$$\max(REV) = \sum_{t=1}^{T} REV_{ss} + REV_{pm} - C_{chagre} - C_{lc} \quad (1)$$

където

$$REV_{ss} = P_{ss} * T_{ss} * Pr_{ss} * \alpha \quad (2)$$

са приходите от предоставяне на системна услуга за съответния период според предоставаната и активирана мощност за даден период (α е бинарен коефициент, отразяващ активирането), а (3)

$$REV_{pm} = P_{pm} * T_{pm} * Pr_{pm} * \beta \quad (3)$$

представляват приходите от ценови арбитраж на енергийния пазар.

Специфичен елемент участва с отрицателен знак в (1) има смисъл на разходи, отразяващи деградацията на ИАБ при всеки цикъл на разглеждане и съответния разход за подмяна при достигане на долна граница на предписания работен капацитет.

$$C_{lc} = \sum_{n=1}^{N} \frac{rc}{lc_n} d_i \quad (4)$$

В литературата се намират различни предложения за изчисляване и отразяване на фактора деградация и намаляване на ефективността [6,7].

Предоставената мощност ***Pss*** за спомагателна услуга за дадения период има водеща роля пред участието на пазар на енергия. То се прави автоматично от системния оператор на съответната зона. Операторът на ИАБ може да състави очакване (прогноза) за активиране от страна на системния оператор и да отчете този параметър във финансовия модел. Участието на енергийния пазар е с мощност ***Ppm*** подчинено на системната услуга. Тази част от диспечирането на ИАБ може да се оптимизира като собственика на системата приложи модел за оптимално участие на пазара, отчитащ ценовите криви в различните времеви зони.
След определяне на нетните приходи за съответните периоди ***t*** (седмици, месеци), може се определя критерият за икономическа целесъобразност:

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} \left[\frac{1}{(1+r_t)^t} * REVt \right] \quad (5)$$

Икономическата целесъобразност има силно изразена зависимост от:

- цената и честота на активиране на системните услуги по регулиране на честота и мощност,
- разликата в почасовите цени на пазар на енергия,
- броят циклите на активиране и разряд, водещи до деградация на батерията, както и степента на разряд при всеки цикъл..

Моделираната по този начин оценка за икономическа целесъобразност би имала смисъл, ако съответните източници на приходи са достатъчно предвидими (например чрез дългосрочни договори предоставяне на резерв). В противен случай, инвестицията в ИАБ би била високо рискова.

5. НОРМАТИВНИ ОГРАНИЧЕНИЯ

Друг практически проблем за приложението на ИАБ в ЕЕС са някои нормативни ограничения, които не отчитат спецификите на тази нова технология. За успешното интегриране в пазара следва да бъдат направени промени и въведени ясни технически критерии и пазарни правила [2].

Към момента системният оператор в България провежда търгове за студен ре-

зерв и отделно сключва договори за закупуване на балансираща енергия (ДБЕ) от производители и потребители.

Съгласно Правилата за провеждане на търгове за закупуване на разполагаемост за студен резерв [8], участници могат да бъдат само производители от ТЕЦ. ЕСО може да провежда годишни, полугодишни, месечни или извънредни търгове за закупуване на разполагемост.

По отношение на доставчиците на балансираща енергия, договорите могат да бъдат следните типове [9, 10]:

- П - ДБЕ за участие в първично регулиране
- В - ДБЕ за участие във вторично регулиране
- Т - ДБЕ за участие в третично регулиране
- СР - ДБЕ за активиран студен резерв.
- Комбинация от горните

Нужно е да се направи по-прецизна дефиниция на „Участник” и „Обект” на участник.

Съгласно сегашната дефиниция "Обект" е „всяка обособена по отношение на измерването на електрическата енергия производствена или потребяваща единица на търговския участник.

Обектът може да е блок, турбогрупа, електрическа централа или каскада на производител, както и фабрика, завод или инсталация на потребител.”

В договорите пък е дадена възможност само за два типа „блокове”: Г-генериращ и Т-товар.

Система използваща ИАБ ще изисква собствена нова дефиниция, тъй като тя обхваща и двете категории.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очаква се системите за съхранение на енергия използващи ИАБ да имат все по-голямо приложение в ЕЕС. Следва да бъдат доразвити технико-икономическите модели за комбинирано предоставяне на услуги, като се отчетат реални параметри на системите и се изведе модел за очаквано заангажиране и използваемост на основа на реалните нужди на дадена контролна зона.

В допълнение на технико-икономическото моделиране следва да се конкретизират предложенията за нормативни промени, което да позволи обосновано и ясно регламентирано участие на тази технология (имаща хибридни характеристики едновременно на потребители и производител).

ЛИТЕРАТУРА

[1] ECO (2017), ***План за развитие на преносната електрическа мрежа на България за периода 2017-2026 г.,*** ECO ЕАД, 2017, стр. 15-16

[2] ENTSO-E (2016), ***Energy storage and storage services: ENTSO-E position***, ENTSO-E, 2016, стр. 5

[3] Kempener R., Borden E. (2015), ***Battery storage for renewable: market status and technology outlook***, IRENA Report, 2015

[4] Bradbury C. (2014), ***Storage business models in the GB market, report to Elex-on,*** Pöyry Management Consulting, 2014, стр. 47-48

[5] Papadopoulos P., Laguna-Estopier A. (2016), ***The Business Case of Storage***, UK Power Networks, 2016

[6] Venkatesh J., Chen S., Tinnakornsrisuphap P., Rosing T. (2015), ***Lifetime-dependent Battery Usage Optimization for Grid-Connected Residential Systems***, University of Cali-fornia, San Diego, 2015

[7] Arjan S. Sidhu, Michael G. Pollitt, and Karim L. Anaya (2017), ***A Social Cost Benefit Analysis of Grid-Scale Electrical Energy Storage Projects: Evaluating the Smarter Net-work Storage Project***, Cambridge Working Paper in Economics, 2017

[8] ECO ЕАД. (2017), ***Правила за провеждане на търгове за закупуване на разполагаемост за студен резерв***, ECO ЕАД, 2017

[9] ECO ЕАД. (2017), ***Регистър на доставчиците на балансираща енергия***, ECO ЕАД, 2017

[10] ECO ЕАД. (2017), ***Документи за участие на либерализиран пазар***, ECO ЕАД, 2017

Автор: Виктор Гърбев, маг. инж. докторант, катедра Електроенергетика, Елек-тротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vgarbev@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Ангел Цолов

ИЗМЕРВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ЕЛЕГАЗА И ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ИЗОЛАЦИОННИТЕ МУ СВОЙСТВА

Цветелина Богоева, Борислав Бойчев, Камен Матеев

Резюме: *Съвременните екологични проблеми налагат оценка на влиянието върху околната среда на намиращия се в атмосферата елегаз. Това налага ползвателите на съоръжения с елегаз да вземат съответните мерки при експлоатацията им, за да не се допуска изтичане.*
Ключови думи: *Елегаз, SF6, примеси, КРУЕ*

MEASUREMENT OF SF6 PARAMETERS AND IMPACT ON ITS INSULATION PROPERTIES

Tsvetelina Bogoeva, Borislav Boychev, Kamen Mateev

Abstract: *Today's ecological problems require an assessment of the impact of located in the atmosphere SF6 on the environment. This requires that the users of equipment with the sulfur hexafluoride take appropriate measures in their operation to prevent leakage.*
Keywords: *Sulfur hexafluoride, SF6, GIS*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните екологични проблеми налагат оценка на влиянието върху околната среда на намиращия се в атмосферата елегаз.

Въпросът за намаляването на неговите емисии в атмосферата е част от Европейската програма за изменения в климата (ECCP) от 2001 г., в рамките на която е разработен комплекс от мерки поотделно за производителите на електрически съоръжения с елегаз и ползвателите им.

Това налага производителите и ползвателите на съоръжения с елегаз да вземат съответните мерки при експлоатацията им, за да не се допуска изтичане [4].

Частта за производителите включва:

- постоянно подобряване на конструкцията с цел намаляване на емисиите по време на експлоатацията и улесняване на поддръжката;
- намаляване на емисиите по време на производството;
- улеснено извеждане от експлоатация и рециклиране.

Частта за ползвателите, от своя страна, съдържа изисквания за:

- подобряване на сервизното обслужване на съоръженията за много големи токове;

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

- ползване на херметизирани съоръжения винаги, когато това е възможно;
- максимално бърза замяна или ремонт на съоръжения с установено наличие на изтичане на газ;
- внимателно извеждане от експлоатация и рециклиране на елегаза за повторно използване.

2. СЪЩИНСКА ЧАСТ
2.1. ПРИМЕСИ

Елегазът съдържа примеси. От всички най-опасен е флуороводородът, тъй като е силно токсичен и води до бърза корозия на метални части. Особено съществено за експлоатацията на прекъсвачи е, че възникващата електрическа дъга между отварящите се контакти разлага малка част от елегаза в сяра и флуор, които след прекратяването ѝ отново се съединяват в елегаз, докато примесите на влага пречат на този процес и водят до образуването на флуороводород.

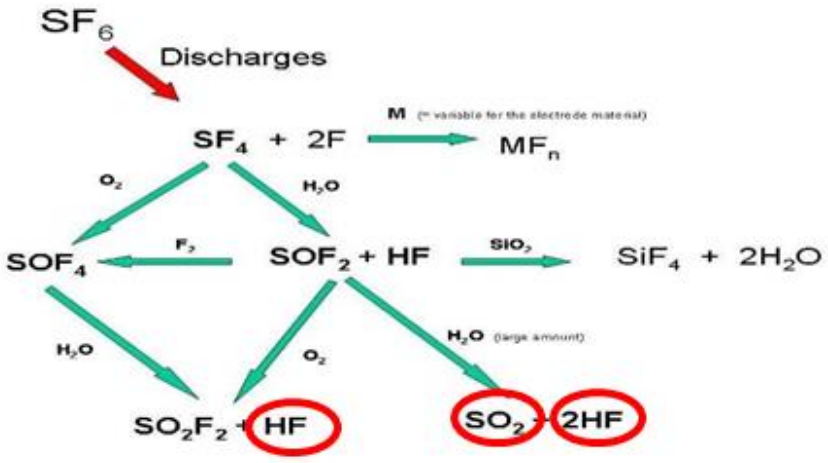
Освен флуороводород поради електрическата дъга се появяват още десетина други химични съединения, някои от които също са токсични.

Подобно на флуороводорода те също са в много малки количества, но независимо от това и добрите уплътнения срещу изтичането на газ, тяхното съществуване е нежелано, най-малкото защото също могат да променят свойствата на елегаза. Това е основната причина да се предпочита използването на прекъсвачи с вградени абсорбиращи вещества (например активиран двуалуминиев триокис. [3]

2.2. ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА ПРОДУКТИТЕ ОТ РАЗЛАГАНЕ НА ЕЛЕГАЗА

При повишаване на напрежението в разпределителните мрежи, има опасност от аварийни изключвания и поява на частични разряди в елегазовите съоръжения.

В последните години тези случаи на недопустимо повишаване на напрежението в някои точки на мрежите зачестиха, поради присъединяване на възобновяеми енергийни източници.[6,7]



Фиг.1. Продукти на разлагане на SF6

Продуктите на разлагане на SF6 (фиг.1), които са пряка последица от частичните разряди, реагират с вода и въздух и някои силно корозивни продукти, като например флуороводород (HF) [1].

Разложените вещества, реагират с повърхността на изолаторите от епоксидна смола.

Образуват се вещества, съдържащи флуор върху изолационните повърхности.

Въздействието им е следното [2]:

- Метални повърхности:

Корозия → Намаляване на оперативната безопасност на комплектните разпределителни уредби с елегазова изолация (КРУЕ)

- Изолационни повърхности (епоксидна смола):

Реакция с повърхността → Намаляване на електрическата повърхност → Бързо увреждане на КРУЕ

SO2 е единственият продукт за разграждане, който е дългосрочно откриваем в газовата фаза. Връзката между концентрацията на SO2 и общото количество разлагане на продуктите е 1: 4. [5]

HF е стабилен в газова фаза, но реагира с всички видове повърхности и следователно не е дълготрайно откриваем в оборудването.

H2S не е продукт на разграждане. Не може да бъде генериран по време на разряд.

2.3. ИНСТРУМЕНТИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА SF6 ГАЗ

На пазара съществуват различни производители на инструменти за измерване.

Основните параметри, които трябва да измерват са следните:

Концентрация на SF6 (%)

Влага

Съдържание на SO2 (ppmV)

Основните инструменти за измерване са:

Инструмент за измерване на обемното съдържание в % на елегаз в смеси с въздух или азот.

Този инструмент се използва за измерване на чистотата/концентрацията на SF6 газа, която е изключително важна за изолационните му свойства и диелектричната якост за гасене на дъгата в електрическото оборудване средно и високо напрежение. Инструментът може да се използва за измерване на чист SF6 газ или на смеси SF6/N2 и SF6/ CF4.

Инструмент за измерване на съдържанието на влага в SF6 газ

Измерване на влагата с индикация на температурата на оросяване

Съдържанието на влага в SF6 газа е най важният критерий за оценяване на ка-

чеството му. Този инструмент е проектиран специално само за измерване на съдържанието на влага в SF6 газ. Неговият измервателен сензор има висока устойчивост срещу замърсяване от продуктите от рекомбинация на SF6 газа в сравнение с конвенционалните сензори, с което се удължава живота му.

Интегрираният дебитомер определя точното количество SF6, което е необходимо за измерването, с което се избягва ненужното източване на газ от камерата на оборудването. Измерванията не се влияят от налягането и околната температура.

SF6 Мултианализатори

SF6 Мултианализатор БЕЗ система за връщане на газа в камерата

SF6 Мултианализатор СЪС система за връщане на газа в камерата

Този мултифункционален инструмент позволява измерването на до 6 параметъра с една операция:

ОПЦИИ: съдържание на HF, H2S и CO concentration (в ppmV за всеки)

Първо се измерва съдържанието на SO2 и ако се констатира стойност над допустимата процесът на измерване спира автоматично. Газът следва да се връща в камерата или в друг съд, като така се избягва замърсяването на другите сензори и на вътрешността на инструмента.

SF6 анализаторът трябва да е удобен за работа и поддръжка и да гарантира висока точност на резултатите.

2.4. ЕС РЕГЛАМЕНТИ И СТАНДАРТИ

Регламент на ЕС No. 517/2014

Регламент за изпълнение (ЕС) No. 2066/2015

Регламент за изпълнение (ЕС) No. 1191/2014

Регламент за изпълнение (ЕС) No. 2068/2015 IEC 60376

БДС EN 60376:2006 - Спецификация на техническия клас на серен хексафлуорид (SF6) за използване в електрически съоръжения (IEC 60376:2005)

БДС EN 60480:2006 - Указания за проверка и обработка на серен хексафлуорид (SF6), взет от електрическо съоръжение и спецификация за неговото повторно използване (IEC 60480:2004)

БДС EN 62271-4:2013 - Комутационни апарати за високо напрежение. Част 4: Работни процедури за обработка на серен хексафлуорид (SF6) и неговите смеси (IEC 62271-4:2013)

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разработката е направен анализ на примесите съдържащи се в елегаза, както и въздействието им върху компонентите на оборудването.

Направен е преглед на характеристиките на инструменти за измерване на качеството на SF6 газ и описана нормативната база по отношение на използването на елегаз в България и Европейския съюз.

ЛИТЕРАТУРА

[1] SF6 analysis for AIS, GIS and MTS Condition Assessment (Draft, 2012-04-20) By CIGRÉ WG B3-25 (AA2) D Fuchsle, F Meyer, P Sieber, D Kopejtkova, R Kurte, L-R Jänicke, P Glaubitz, P Jannick, T Saida, I Ring, A Bosma, E Duggan, N Kane, S Northcote, E Dullni, D Mutter, M-C Lessard

[2] The impact of decomposition products in SF6 on the electrical surface strength of epoxy resin, MARTIN WEMBER, DIRK PEIER, University of Dortmund, Institute for High Voltage and Electrical Equipment

[3] Сп. Енерджи ревю, бр. 4, 2013

[4] Комутационни апарати за високо напрежение. Част 202: Комплектни подстанции за високо/ниско напрежение, изработени в заводски условия (IEC 62271-202:2014)

[5] Cigré: Ръководство за рециклиране на SF6

[6] Добрилов, Д., А. Цолов, П. Данчев, Асинхронен компенсатор на реактивна мощност – част 2, сп. Енергетика, май-юни 2017

[7]] Добрилов, Д., А. Цолов, Изследване факторите, влияещи върху напрежението в точките на присъединяване на малки ВЕЦ, IV Научна конференция ЕФ 2012

Автори: Цветелина Богоева, асистент, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *tbogoeva@tu-sofia.bg*; **Борислав Богданов Бойчев**, асистент д-р инж., катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (ECEOET), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *bojchev@tu-sofia.bg*; **Камен Матеев**, Елконтрол ООД - София, E-mail address: *kmateev@elcontrol.eu*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Симона Петракиева

МАГНИТОМЕХАНИЧЕН РЕЗОНАНС В ТОРОИДАЛНИ МАГНИТОПРОВОДИ

Михаела Славкова, Костадин Миланов, Минчо Минчев

Резюме: *В статията се разглежда магнитомеханичен резонанс в тороидални магнитопроводи от магнитно меки материали с висока магнитострикция. Той се наблюдава при повишени честоти, при съвпадане на честотата на възбудителното магнитно поле с тази на механичния резонанс на тороида. Явлението е съпроводено със съществено увеличение на загубите в магнитопровода и е нежелан ефект при експлоатацията му. В работата е изследвано влиянието на съотношението на външния към вътрешния диаметър на тороидални лентови магнитопроводи върху магнитомеханична резонансна честота. Дадени са резултати от изчисления на тази честотата за конкретни геометрични съотношения и различни марки магнитно меки материали. Показано е, че влиянието съотношенията е значимо. Препоръчано е, при окончателния избор на тороидални магнитопроводи да се изчислява и честотата, при която настъпва магнитомеханичен резонас с цел да не бъде допусната появата на явлението.*

Ключови думи: *магнитомеханичен резонанс, магнитострикция*

MAGNETOMECHANICAL RESONANCE IN TOROIDAL CORES

Michaela Slavkova, Kostadin Milanov, Mintcho Mintchev

Abstract: *The article examines magnetomechanical resonance in toroidal magnetic cores made of soft magnetic materials with high magnetostriction. It is observed at higher frequencies, when the frequency of the excitation magnetic field coincides with that of the mechanical resonance of the toroid. The phenomenon is accompanied by a substantial increase in core losses and is an undesirable effect at its operation. The influence of the ratio of the outer to the inner diameter of toroidal strip wound cores on the magnetomechanical resonance frequency, has been studied. Results of calculations of this frequency are given for specific geometric ratios and various soft magnetic materials. It has been shown that the influence ratios are significant. It is recommended for the final selection of toroidal magnetic cores, to be calculated the frequency at which magnetomechanical resonance occurs so as to prevent the occurrence of the phenomenon.*

Keywords: *magnetomechanical resonance, magnetostriction*

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Резонансът е явление, при което честотата на външното въздействие се изравнява с честотата на собствените трептения на системата и е съпроводено с рязко нарастване на амплитудата на принудените механични трептения, които достигат своя максимум. В механичните конструкции резонансът води до усилване на механичните вибрации като резонансната честота зависи от формата, размера и др. конструктивни и механични параметри на системата (инерционен момент, модул на Юнг и др.) [1-5] При намагнитването на магнитно меки материали, с различна от нула магнитострикция, може да се наблюдава резонанс следствие на наслагване на честотата на механичните трептения причинени от магнитострикцията с тази на механичния резонанс. Тогава настъпва явлението магнитомеханичен резонанс (magnetomechanical resonance) или магнитоеласти-чен резонанс (magneto-elastic resonance), което е съпроводено с рязко увеличаване на загубите в магнитопровода. Това може да доведе до появата на пукнатини или разрушаването му и затова е от особена важност да се изчисли предварително честотата, при която може да настъпи магнитомеханичен резонанс за дадения магнитопровод, с цел да се избегне работа му при тези честоти. [1-5]

Магнитострикцията (λs) е явление, при което се променят размерите на феромагнитния материал по време на намагнитването му. Причина за магнитострикцията е диполното взаимодействие между магнитните моменти на електроните, което зависи от междуатомното разстояние и в аморфните феромагнетици се определя от неподредени атомни конфигурации. Магнитострикцията зависи от първоначалната композиция на сплавта.

В табл.1 са представени стойностите на магнитострикцията за някои магнитно меки сплави [6,7-15].

С високи стойности на магнитострикцията се отличават - аморфна сплав на желязна основа, два типа пермалой и висококачествен ферит, а аморфните сплави на кобалтова основа са с близка до нула магнитострикция [6].

Създадени са аморфни и нанокристални сплави на кобалтова основа с нулева магнитострикция. Магнитострикцият силно се влияе от съдържанието на силиций (Si) в α-Fe нанокристалите, но не и от съдържанието на силиций в аморфната фаза [3, 7-15]. Термообработката може в значителна степен да намали големината на магнитострикцията и сплавта с по-високо съдържание на силиций да се окаже с по-ниска магнитострикция [3, 7-15]

Характерно е, че за материалите с линеен (F) хистерезисен цикъл, процесът на намагнитването е контролиран от ротацията на вектора на намагнитване в приложеното поле. А при материалите с правоъгълен или (Z) хистерезисен цикъл намагнитването се определя от преместването на 180 градусовите доменни граници, което не води до промяна в дължината на материала.[9]

В [1] явлението магнитомеханичен резонанс е наблюдавано в тороидални лентови магнитопроводи, изработени от богати на желязо аморфни сплави, характеризиращи се с висока индукция на насищане, висока магнитострикция и ниска магнитна анизотропия (Metglas 2605SM и Metglas 2605S-3A). Те са с висок коефициент на магнитомеханично куплиране.

Таблица 1

МАТЕРИАЛ	СЪСТАВ НА СПЛАВТА	ЗАГУБИ (20kHz, 200mT)	МАГНИТНА ИНДУКЦИЯ НА НАСИЩАНЕ	МАГНТОСТРИЦИЯ	ОТНОСИТЕЛНА МАГНИТНА ПРОНИЦАЕМОСТ (50Hz)	МАКСИМАЛНА РАБОТНА ТЕМПЕРАТУРА
		[W/kg]	Bs, [mT]	λ_S, [10^{-6}]	μ_i– μ_{max}, [-]	[°C]
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКА СТОМАНА (НАДЛЪЖНО ОРИЕНТИРАНА)	$Fe_{97}Si_3$	> 1.000	2.000	9	2.000 - 35.000	~120
ПЕРМАЛОЙ ТИП I (СТАНДАРТЕН)	$Ni_{45}Fe_{55}$	> 150	1.550	25	12.000 - 80.000	130
ПЕРМАЛОЙ ТИП II (СТАНДАРТЕН)	$Ni_{54}Fe_{46}$	> 100	1.500	25	60.000 - 125.000	130
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКА СТОМАНА (УСЪВЪРШЕНСТВАНА)	$Fe_{93.5}$ $Si_{6.5}$	40	1.300	0.1	16.000	130
АМОРФНА СПЛАВ НА Fe ОСНОВА	$Fe_{76}(Si,B)_{24}$	18	1.560	27	6.500 - 8.000	150
ВИСОКОКАЧЕСТВЕН ФЕРИТ	MnZn	17	500	21	1.500 - 15.000	100/120
ПЕРМАЛОЙ (УСЪВЪРШЕНСТВАН)	$Ni_{80}Fe_{20}$	> 15	800	1	150.000 - 300.000	130
АМОРФНА СПЛАВ НА CO ОСНОВА A	$Co_{73}(Si,B)_{27}$	5.0	550	< 0.2	100.000 - 150.000	90/120
АМОРФНА СПЛАВ НА CO ОСНОВА B	$Co_{77}(Si,B)_{23}$	5.5	820	< 0.2	2.000 - 4.500	120
АМОРФНА СПЛАВ НА CO ОСНОВА C	$Co_{80}(Si,B)_{20}$	6.5	1.000	< 0.2	1.000 - 2.500	120
НАНОКРИСТАЛНА СПЛАВ ТИП I	FeCuNbSiB	4.0	1.230	0.1	20.000 - 200.000	120/180
НАНОКРИСТАЛНА СПЛАВ ТИП II	FeCuNbSiB	4.5	1.350	2.3	20.000 - 200.000	120/180
НАНОКРИСТАЛНА СПЛАВ ТИП III	FeCuNbSiB	8.0	1.450	5.5	~ 100.000	120/180

Това означава, че при определена честота на възбудителното поле може да настъпи резонансно явление, обусловено от наслагването на механичния резонанс с честотата на възбудителното поле. За определяне на честота, при която може да настъпи магнитомеханичен резонанс там се извеждат формула за тороидален магнитопровод като използват апроксимацията с трептящ тънък пръстен: [1]

$$f_n = \frac{1}{l_{Fe}}\sqrt{\left(n^2+1\right)\frac{E}{D}}\ ,\ \text{Hz} \qquad (1)$$

където:

l_{Fe} е дължината на средната магнитна линия на магнитопровода, m

E е модулът на Юнг, N/m^2

D (ρ) е плътността на материала, kg/m^3

n - цяло число, представящо броя от всички стоящи вълни насложенини върху основните трептения (n=0) като най-високата стойност на n=8.

При наличие на магнитомеханични явления, механичните резонанси ще причинят съществено увеличение на загубите L при резонансните честоти. Пак от същия източник [1] се дава характерактеристиката на измерваните загуби L в маг-

нитопровода като функция на честотата в отсъствие на магнитострикционно обусловени механични резонанси.

$$(L/f) = P_h + P_e f \quad (2) \quad \left(\frac{L}{f}\right) = P_h + P_e f \text{ , J/kg} \tag{2}$$

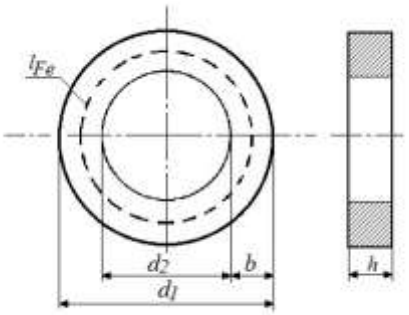
където f е възбудителната честота (< 100kHz), а (P_h) и (P_ef) са съответно загубите от хистерезис и загубите от вихрови токове в магнитопровода за цикъл. Уравнение (2) представя собствените или магнитни загуби.

2. ЦЕЛ

Целта на статията е да се изследва влиянието на съотношението на външния към вътрешния диаметър на тороидални лентови магнитопроводи със стандартизирани конструктивни параметри според IEC 60635:1978/AMD1:1997/ DIN 42311:1980-01, изработени от магнитно меки материали с висока магнитострикция върху честотата, при която настъпва магнитомеханичен резонанс. Изведени са специфични зависимости за определяне на тази резонансна честота.

3. ОБОСНОВКА

Тороидалните лентови магнитопроводи са магнитни вериги без въздушна междина, с постоянно сечение. На фиг.1 са дадени основните размери на магнитопроводите [16].



Фиг.1. *Основни размери на тороидални магнитопроводи*

където d_1 е външен диаметър, d_2 е вътрешен диаметър на магнитопровода, h е височината на магнитопровода и зависи от ширината на лентата, b е дебелина на магнитопровода, а l_{Fe} е средната дължина на магнитната силова линия

Стандартът, който е ползван е IEC 60635:1978 или DIN 42311, който се отнася за лентови тороидални магнитопроводи от магнитно мек материал [16]. Той включва изисквания към размерите на лентата, препоръки за дебелина на лентата, защита на магнитопровода и коефициент на запълване.

За магнитопоровода са известни следните отношения, дефинирани в стандарта:

$$d_1 = k_1 . d_2 \tag{3}$$

а на база на (3) се получава (4)

$$l_{Fe} = \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{k_1 . d_2 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{d_2 (k_1 + 1)}{2} \cdot \pi = d_2 \cdot \frac{(k_1 + 1)}{2} \cdot \pi \tag{4}$$

От тук, имайки предвид (1) - зависимостта изведена в [1], може да се запише (5)

$$f_n = \frac{1}{l_{Fe}}\sqrt{\left(n^2+1\right)\frac{E}{D}} = \frac{1}{d_2 \cdot \frac{(k_1+1)}{2}\cdot\pi}\sqrt{(n^2+1)\frac{E}{D}} = \frac{1}{d_2}\cdot\frac{1}{\pi}\cdot\frac{2}{(k_1+1)}\sqrt{\left(n^2+1\right)\frac{E}{D}} \qquad (5)$$

След окончателна преработка се получава (6)

$$f_n = \frac{1}{d_2}\cdot\frac{1}{\pi}\cdot\frac{2}{(k_1+1)}\sqrt{\left(n^2+1\right)\frac{E}{D}} \qquad (6)$$

Поради нехомогенността на полето в радиално направление за тороидални лентови магнитопроводи съществуват препоръчителни съотношения между външния d_1 и вътрешния d_2 диаметър. В стандарт IEC 60635:1978/AMD1:1997 и DIN 42311:1980-01 са дадени три основните съотношения на външния към вътрешния диаметър на тороида съответно *k_1=1.25; 1.6 и 2.0.* Оттук може да се изведат и три честоти на магнитомеханичен резонанс в зависмост от съотношението на външния към вътрешния диаметър на тороида. Т.е. независимо от факта, че три магнитопровода са с еднакъв вътрешен диаметър, изработени са от един и същ магнитно мек материал, в зависимост от съотношението *k_1* резонансните явления настъпват при различна честота. Данните и съответните изрази са дадени в табл.2

Таблица 2

съотношение	$k_1 = d_1/d_2 = 1.25$	$k_1 = d_1/d_2 = 1.6$	$k_1 = d_1/d_2 = 2.0$
множител	$\frac{1}{\pi}\cdot\frac{2}{(k_1+1)} = 0.28$	$\frac{1}{\pi}\cdot\frac{2}{(k_1+1)} = 0.24$	$\frac{1}{\pi}\cdot\frac{2}{(k_1+1)} = 0.16$
магнитомеханична резонансна честота	$f_n = \frac{0.28}{d_2}\cdot\sqrt{\left(n^2+1\right)\frac{E}{D}}$	$f_n = \frac{0.24}{d_2}\cdot\sqrt{\left(n^2+1\right)\frac{E}{D}}$	$f_n = \frac{0.16}{d_2}\cdot\sqrt{\left(n^2+1\right)\frac{E}{D}}$
брой стоящи вълни	*n=0*	*n=0*	*n=0*
магнитомеханична резонансна честота	$f = \frac{0.28}{d_2}\cdot\sqrt{\frac{E}{D}}$	$f = \frac{0.24}{d_2}\cdot\sqrt{\frac{E}{D}}$	$f = \frac{0.16}{d_2}\cdot\sqrt{\frac{E}{D}}$

Известно е, че за материали с правоъгълен хистерезисен цикъл съотношението на външния към вътрешния диаметър *$\kappa_1=d_1/d_2$* трябва да е не по-голямо от 1,25 всеки път, когато е възможно. За останалите материали отношение по-голямо от 2 не трябва да се превишава.[6, 12, 13] За материали с правоъгълен хистерезисен цикъл се предлагат още две съотношения *κ_1=1.10 и 1.05.* За тях данните са представени в табл.3.

Магнитомеханичен резонанс може да настъпи не само в лентови, но и в магнитопроводи направени от ферити. По данни от Ferroxcube [2], формулата за из-

числение на хармоничната резонансна честота за магнитопроводи от MnZn е:

$$f_r = \frac{5700}{\pi \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)}, \text{ kHz} \qquad (7)$$

където d_1 е външният диаметър [mm], а d_2 е вътрешният диаметър [mm] на магнитопровода.

Таблица 3

съотношение	$k_1 = d_1/d_2 = 1.10$	$k_1 = d_1/d_2 = 1.05$
множител	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1+1)} = 0.30$	$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1+1)} = 0.31$
магнитомеханична резонансна честота	$f_n = \frac{0.30}{d_2} \cdot \sqrt{(n^2+1)\frac{E}{D}}$	$f_n = \frac{0.31}{d_2} \cdot \sqrt{(n^2+1)\frac{E}{D}}$
брой стоящи вълни	*n=0*	*n=0*
магнитомеханична резонансна честота	$f = \frac{0.30}{d_2} \cdot \sqrt{\frac{E}{D}}$	$f = \frac{0.31}{d_2} \cdot \sqrt{\frac{E}{D}}$

В [4] се използва аналогична на (1) формула за изчисление на магнитомеханичната резонансната честота :

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.r}\sqrt{\frac{E}{\rho}}, \text{ Hz} \qquad (8)$$

където:

r е радиусът на средната магнитна линия на магнитопровода, m ;

$r=l_{Fe} / 2\pi$, *m* ;

E е модулът на Юнг, N/m^2;

D (ρ) е плътността на материала, kg/m^3;

Като се преработи се стига до израза:

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.r}\sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{2\pi.\frac{l_{Fe}}{2\pi}}\sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{l_{Fe}}\sqrt{\frac{E}{\rho}}, \qquad (9)$$

$$l_{Fe} = \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{k_1.d_2 + d_2}{2} \cdot \pi = \frac{d_2(k_1+1)}{2} \cdot \pi = d_2 \cdot \frac{(k_1+1)}{2} \cdot \pi$$

$$f_r = \frac{1}{l_{Fe}}\sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{d_2} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{(k_1+1)}\sqrt{\frac{E}{\rho}}, \qquad (10)$$

Изразът (10) е аналогичен на тези, получени в табл.2 и табл.3.

В табл.4 са дадени изчислените магнитомеханични резонансни честоти за магнитопровод изработен от три марки аморфни магнитно меки метални сплави.

В табл.5 са дадени изчислените магнитомеханични резонансни честоти за три магнитопровода с еднакъв вътрешен диаметър, но различни външни диаметри, които са изработени от една и съща аморфна метална сплав. Целта е да се покаже, че независимо от факта, че магнитопроводите са с еднакъв вътрешен диаметър и са от един и същ магнитно мек материал, магнитомеханичният резонанс може да настъпи при различна честота в зависимост от съотношението на външния към вътрешния диаметър. Колкото по-голямо е съотношението между външния и вътрешния диаметър на магнитопровода, толкова по-ниска е резонансната честота на магнитомеханичния резонанс при равни други условия.

Таблица 4

материал	d_1	d_2	l_{Fe}	r_{Fe}	k_1	E	ρ	f
	m	*m*	*m*	*m*	*-*	GN/m^2	kg/m^3	*kHz*
Metglass 2605SA1	***0.020***	***0.016***	***0.0565***	***0.0090***	***1.25***	***110***	***7180***	***68.5***
Metglass 2605HBM1	***0.020***	***0.016***	***0.0565***	***0.0090***	***1.25***	***120***	***7330***	***70.8***
Metglass 2605CO	***0.020***	***0.016***	***0.0565***	***0.0090***	***1.25***	***110***	***7560***	***66.7***

Таблица 5

материал	d_1	d_2	l_{Fe}	r_{Fe}	k_1	E	ρ	f
	m	*m*	*m*	*m*	*-*	GN/m^2	kg/m^3	*kHz*
Metglass 2605S-3	***0.020***	***0.016***	***0.0565***	***0.0090***	***1.25***	***167***	***7300***	***83.7***
Metglass 2605S-3	***0.025***	***0.016***	***0.0644***	***0.0103***	***1.60***	***167***	***7300***	***71.7***
Metglass 2605S-3	***0.032***	***0.016***	***0.0754***	***0.0120***	***2.00***	***167***	***7300***	***47.8***

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените проучвания и изчисления във връзка с явлението магнитомеханичен резонанс в тороидални лентови магнитопроводи може да се обобщи, че колкото по-голямо е съотношението между външния и вътрешния диаметър на магнитопровода, толкова по-ниска е резонансната честота на магнитомеханичния резонанс при равни други условия.

Във връзка с безопасната работа на тороидалните лентови магнитопроводи от магнитно меки материали с висока магнитострикция е желателно предварително да се изчисли честотата на магнитомеханичния резонанс, за да се избегне неговата поява.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ramanan, V.R.V., Smithr, C.H., Barberi, L., (1985) ***Magnetomechanical resonant losses in metallic glasses***, J.Appl.Phys 57 (1), 1985, pp.3493-3495

[2] Ferroxcube, (2008) ***Data sheet 3R1 Material specification***, 2008

[3] Lashgari, H.R., Chu, D., Shishu Xie, Huande Sun, Ferry, M., Li, S., (2014) ***Com-***

position dependence of the microstructure and soft magnetic properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline alloys: A review study, J.Non-Cryst.Solids 391, 2014, pp. 61-82

[4] Thottuvelil, V., Wilson, T., Owen, H., (1984) ***Unusual High-Frequency Behavior of Some Amorphous Metallic-Alloy Tape-Wound Magnetic Cores,*** IEEE Trans. Man. 20 (4), 1984, pp.570-578

[5] Schwarz, R. B., Kuokkala, V.-T., (1992), ***Magnetostrictive resonance excitation,*** US 5150617 A, 1992

[6] Ferch, M., (2003), ***Nanocrystalline core materials for modern power electronic designs,*** MAGNETEC Gmbh., Langenselbold, Germany, 2003

[7] Herzer, G. (1997), ***Nanocrystalline soft magnetic alloys,*** Handb. Magn. Mater. 10 (3), Elsevier, 1997, pp.415-462

[8] Herzer, G., (2013) ***Application oriented development of amorphous and nanocrystalline soft magnetic materials,*** VAC Gmbh., Hanau, Germany, 2013

[9] Liebermann, H., (1993) ***Rapidly Solidified Alloys: Processes, Structures, Properties, Applications***, Marcel Dekker, NY-Basel-Hong Kong, 1993

[10] Honeywell & Allied Signal Inc., (2001), ***High frequency cores for electronics, Products and Solutions***, 2001

[11] VAC Gmbh., (1989) ***Amorphous metals VITROVAC alloys and applications,*** PV-006, Hanau, 1989.

[12] VAC Gmbh., Boll, R. (1990) ***Weichmagnetische Werkstoffe***, Hanau, 1990

[13] VAC Gmbh., (1996) ***Soft Magnetic Materials and Semi-finished Products***, Hanau, 1996.

[14] VAC Gmbh., (1989) ***Toroidal strip wound cores of VITROVAC 6025Z***, PV-007, Hanau, 1989.

[15] VAC Gmbh., (1983) ***Toroidal Strip Wound Cores***, FS-M 10, Hanau, Germany, 1983

[16] ***IEC 60635:1978 / AMD1:1997 Toroidal strip wound cores made of magnetically soft material / DIN 42311:1980 -01***

Автори: Михаела Славкова, ас. д-р, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: *michaela_ds@tu-sofia.bg*; **Костадин Миланов**, гл. ас. д-р, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: *кmilanов@tu-sofia.bg*; **Минчо Минчев**, проф. дтн, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: *mintchev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Кръстьо Хинов

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОКОВИ СЕНЗОРИ БАЗИРАНИ НА ЕФЕКТА НА ХОЛ

Мехмет Шен, Йоско Балабозов, Кръстьо Хинов, Боян Иванов, Иван Ячев

Резюме: *В настоящата работа е представен прототип на експериментална постановка с приложение на микроконтролерна система и направените с нея експериментални изследвания с токови сензори, базирани на ефекта на Хол. Представени са част от резултатите, получени при използването на токов сензор MLX12209.*
Ключови думи: *токови сензори, ефект на Хол, микроконтролерни системи*

EXPERIMENTAL STUDY OF CURRENT SENSORS BASED ON THE HALL EFFECT

Mehmet Sen, Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Boyan Ivanov, Ivan Yatchev

Abstract: *In the present work a prototype of an experimental system based on a microcontroller and obtained experimental results with current sensors based on Hall effect are presented. Some of the results obtained using the MLX12209 current sensor are presented.*
Keywords: *current sensors, Hall effect, microcontroller systems*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

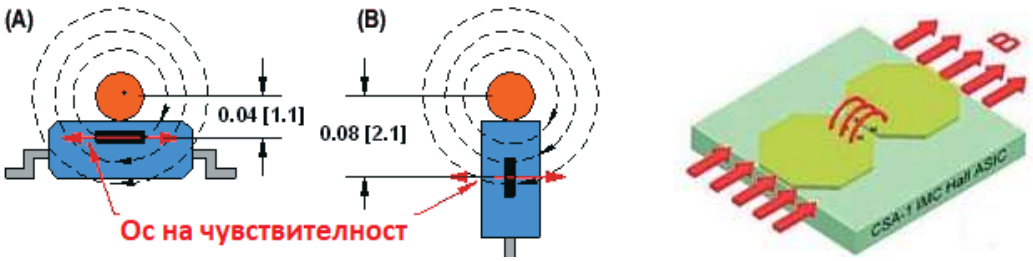
На базата на ефекта на Хол са разработени и се предлагат голям брой сензори, които имат широко приложение в различни области за контрол и измерване на дебит на течности, определяне на обороти на електрическите машини, измерване на електрически и магнитни величини и други [1-11].

Сензорите на Хол намират все по-масово приложение и за измерване на протичащия ток през определена електрическа верига. Важен параметър на този тип сензори е чувствителността, която дава зависимостта на изходния сигнал на сензора от големината на измервания ток. Поради относително ниската си чувствителност, конвенционалните сензори на Хол се нуждаят от допълнителни магнитни вериги, които увеличават тяхната цена, размер и тегло [7, 9]. Примери с използване на магнитни концентратори при токови сензори базирани на ефекта на Хол са разгледани в [8, 9]. Непрекъснато търсене на нови конструктивни варианти, както и появата на нови материали като графен (graphene) [12], води до появата на фундаментално нови решения. Едно такова решение са сензорите с вградени магнитни концентратори, които имат подобрена чувствителност

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

спрямо конвенционалните сензори от този тип. Принципна конструкция на такива сензори е показана на фиг.1.



а) б)

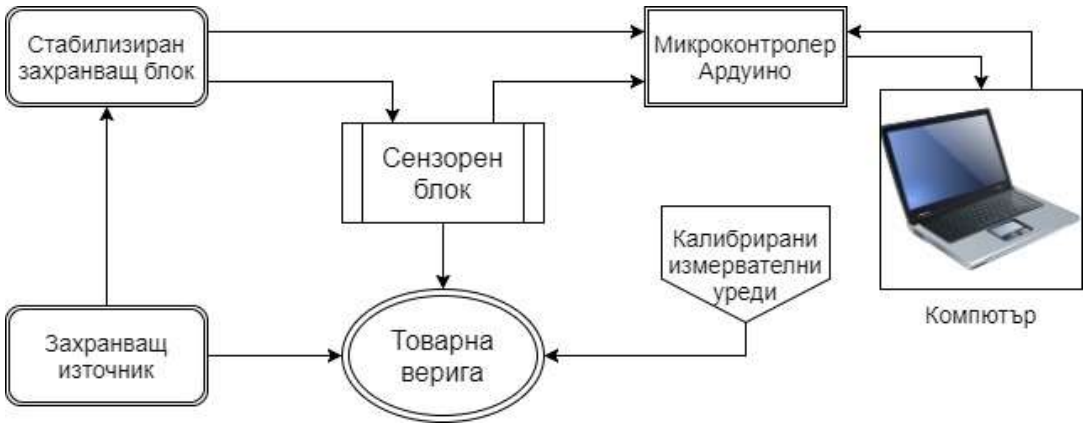
Фиг.1. Обобщен изглед на токови сензори: а) сензори с различна ос на чувствителност; б) схематично разположение на магнитни концентратори. [7]

Предимства на токовите сензори базирани на ефекта на Хол спрямо класическия начин за измерване на ток, чрез поставяне във веригата на нискоомен резистор, се състоят в това, че веригата не се прекъсва и че се разсейва значително по-малка мощност. Друга съществена особеност е възможността за измерване на променливи магнитни полета и токове с висока честота (до 100 kHz).

Основната цел на настоящата работа е да се представят резултатите получени от изследването на токови сензори базирани на ефекта на Хол. За постигането й е разработена подходяща експериментална постановка.

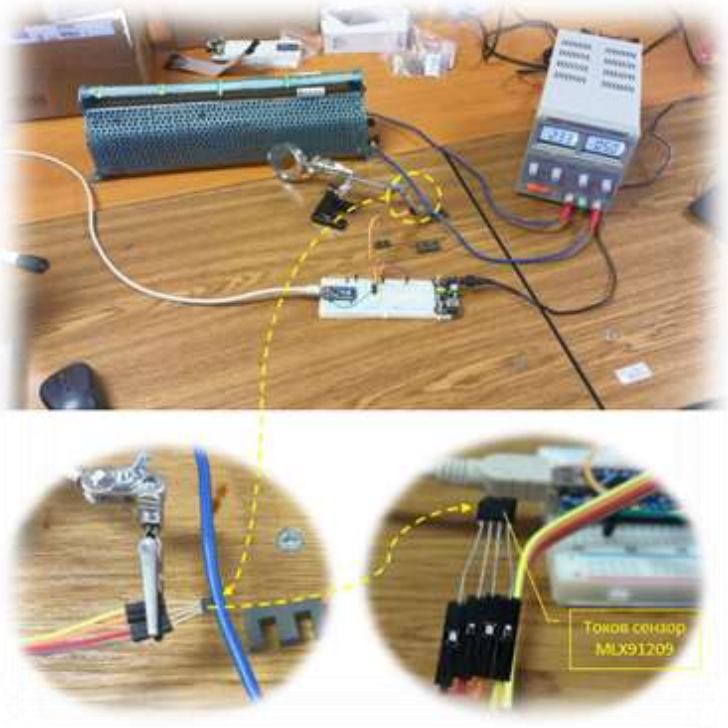
2. РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА

На фиг.2 е дадена блокова схема на разработената експериментална постановка. В основата на системата е използвана микроконтролерна система, чрез която направените от сензорния блок измервания се обработват и изпращат към компютър, където могат да се представят в графичен вид. Товарната верига е реализирана с възможност за регулиране на товара, така че да се изследва съответния сензор при различни стойности на тока. Чрез калибрирани измервателни уреди се отчита зададения ток в товарната верига и тези стойности се сравняват с измерените стойности от изследвания токов сензор.

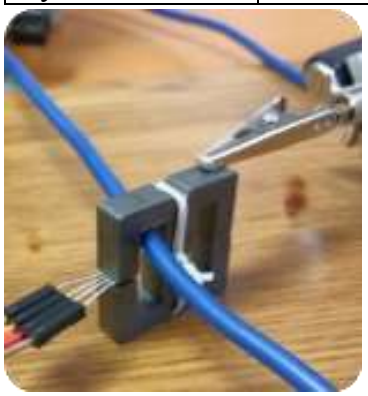


Фиг.2. Блокова схема на експерименталната система.

На фиг.3 са дадени снимки от опитната постановка и някои от основните параметри на изследвания токов сензор. При измерванията е използван сензор за измерване на ток MLX12209, който по същество е линеен сензор на Хол с аналогов изход. Възможно е използването и на други сензори от този тип с разработената постановка, без това да налага промени в основните ѝ компоненти. Поради относително малките токове, които се измерват (до 5A) и специфичните параметри на изследвания сензор, се налага монтирането му във въздушната междина на феритен магнитопровод, така че да се концентрира магнитното поле в зоната на сензора и да се увеличи точността на получените резултати.

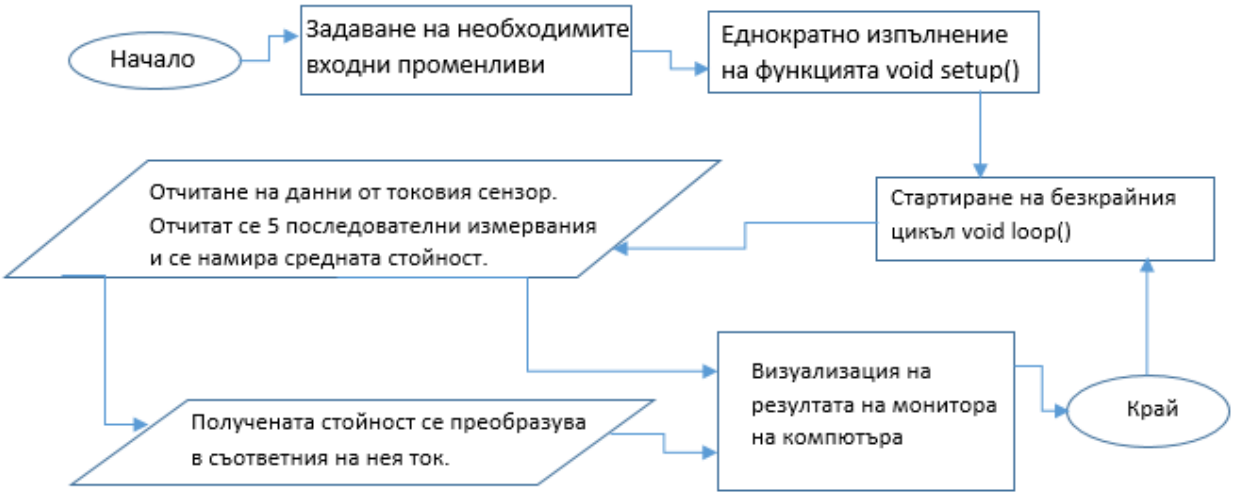


Основни параметри MLX12209	
Захранващо напрежение	5 V DC
Гранични стойности на магнитното поле	от ±15 mT до ±450 mT
Чувствителност	50 mV/mT



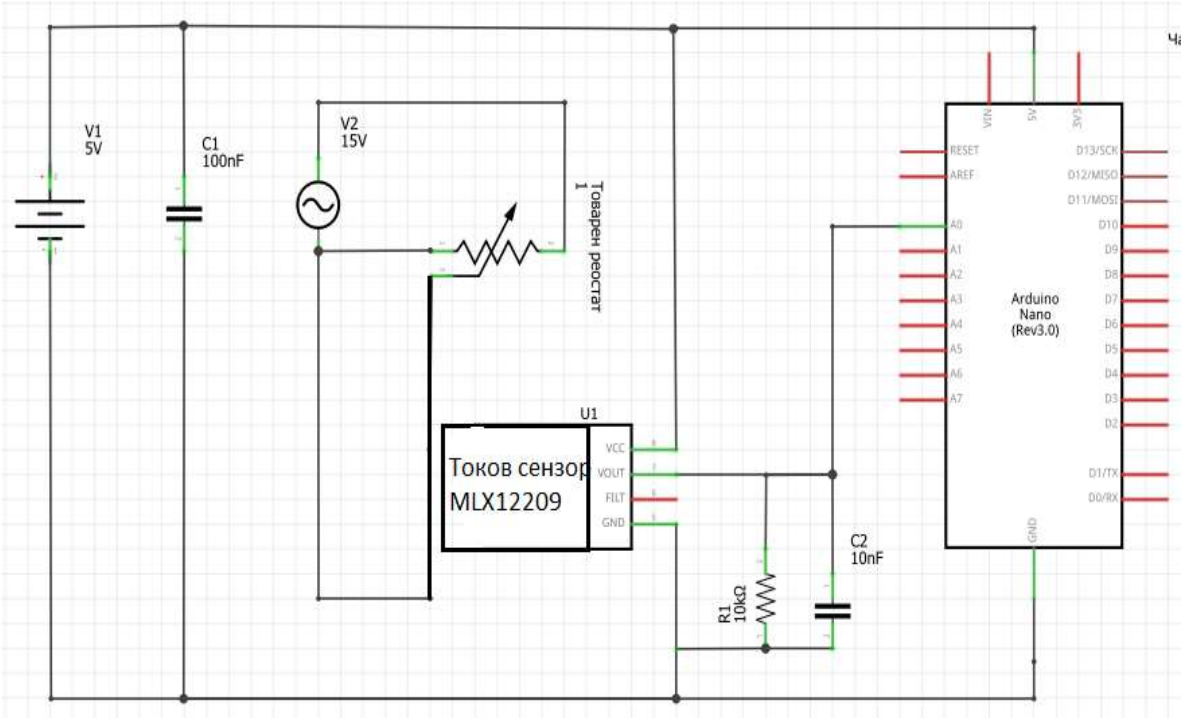
Фиг.3. Снимки на опитната постановка и основни параметри на използвания токов сензор.

Разработеният софтуер за контролера изпълнява алгоритъма на фиг.4.



Фиг.4. Алгоритъм на работа на микроконтролерната система.

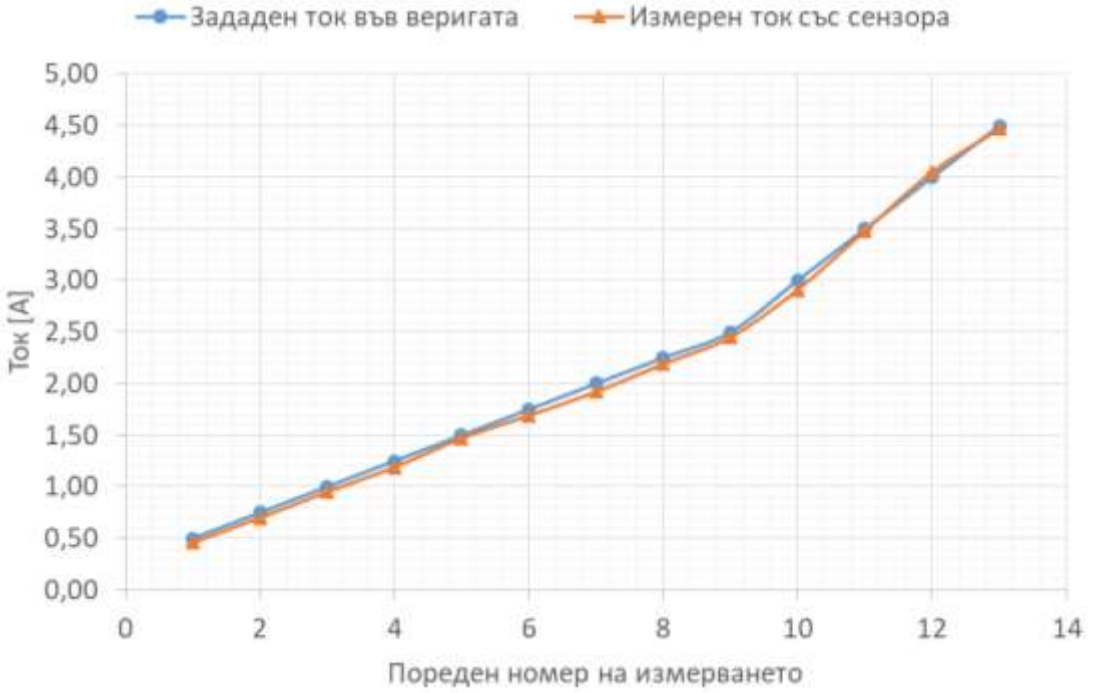
Електрическа схема на опитната постановка е представена на фиг.5. Сензорът е захранен с постоянно напрежение 5V от стабилизиран източник. Товарната верига, в която се измерва токът, е съставена от променливо съпротивление (реостат) за регулиране на тока и лабораторен захранващ блок.



Фиг.5. Електрическа схема на разработената експериментална система.

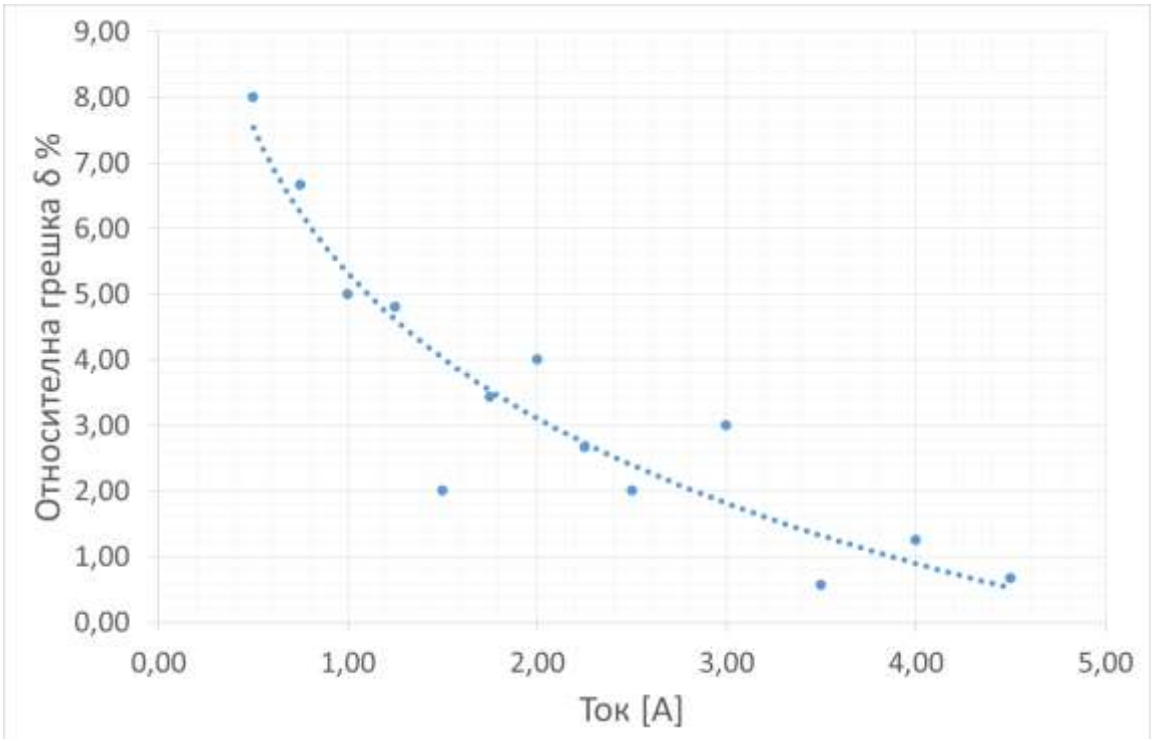
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ПРОВЕДЕНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ

На фиг.6 са представени резултатите от направените измервания с изследваният токов сензор при различни стойности на тока. Тези резултати са сравнени със стойностите на тока отчетени от калибрираните уреди.



Фиг.6. Сравнение на резултатите от измерването със зададените стойности.

На фиг.7 е представена графично относителната грешка в резултатите отчетени от сензора при различни стойности на тока във веригата.



Фиг.7. Относителна грешка.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработеният прототип е базиран на микроконтролерна платформа с отворен код, което е предпоставка за лесното бъдещо развитие и оптимизиране на разработеното устройство.

Представените експериментални резултати са направени чрез токов сензор MLX91209, при различни стойности на тока в дадена товарна верига. Получените резултати показват значително намаляване на точността на измерване, при измерване на токове по-малки от 0.5A, което се дължи на по-слабото магнитно поле около проводника и съответно по-ниското ниво на изходния сигнал получен от сензора.

Развитието и оптимизирането на прототипа и разработеният код изискват добавяне на безжична комуникация (през Wi-Fi и Bluetooth), допълнителен батериен модул, който ще увеличи автономността на системата. Направата на графично приложение, което в реално време да обработва получените от сензора данни, ще даде възможност за автоматизирано графично представяне на резултатите.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Heidari, H., Bonizzoni, E., Gatti, U., Maloberti, F., ***Analysis and Modeling of Four-Folded Vertical Hall Devices in Current Domain***, Department of Electrical Computer and Biomedical Engineering University of Pavia, Italy, ISBN 978-1-4799-4994-6 IEEE-2014 [http://ims.unipv.it/~franco/ConferenceProc/360.pdf] - 10.10.2017

[2] Heidari, H., ***Current-Mode High Sensitivity CMOS Hall Magnetic Sensors***, Ph.D. Thesis, University of Pavia, 2015

[3] Janković, N., Aleksić, S., Pantić, D., ***Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices***, Proceedings of Small Systems Simulation Symposium 2012, Niš, Serbia, 12th-14th February 2012

[4] Heidari, H., Wacker, N., Roy, S., Dahiya, R., ***Towards Bendable CMOS Magnetic Sensors***, [http://eprints.gla.ac.uk/105872/1/105872.pdf] - 10.10.2017

[5] Ramsden, E., ***Hall-Effect Sensors: Theory and Application***, Newnes, 2011, ISBN 9780080523743

[6] Honeywell, ***Hall Effect Sensing and Application***, [http://www.introni.it/pdf/HONEYWELL%20-%20Hall%20Effect%20Sensing%20and%20Application%201998.pdf] - 10.10.2017

[7] Melexis, ***Current sensors reference designs***, Application Note, Rev006, Jul-14

[8] Melexis, ***Non intrusive current sensing with MLX91205***, Application Note, Rev 001, Dec/08

[9] Melexis, ***Shielding for Triaxis Current Sensors***, Rev 004, October 2011

[10] Sriratana, W., ***Study of Devised Hall Effect Sensor System for Industrial Measurement and Non-destructive Inspection***, Graduate school of engineering Fukuoka institute of technology, 2014

[11] Cholakova I., Lozanova S., Takov T., Roumenin Ch., ***Hall Contact Asymmetrical Dependencies of Silicon Sensors. Experimental Evidence for High-Conductive Surface Layer Formation by the Hall Effect***, C.R. Acad. Bulg. Sci., vol. 62, No 11, 2009.

[12] Texas Instruments Incorporated, ***Low-offset Graphene hall sensor***, United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2017/0067970 A1, 03.2017.

Автори: Мехмет Шен, докторант, кат. "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *mehmetsen965@gmail.com*; **Йоско Балабозов**, гл. ас. д-р инж., кат. "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *i.balabozov@tu-sofia.bg*; **Кръстьо Хинов**, доц. д-р инж., кат. "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *k_hinov@tu-sofia.bg*; **Боян Иванов**, инж., студент, кат. "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *boyan.ivanov20@gmail.com*; **Иван Ячев**, проф. дтн инж., кат. "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: yatchev@tu-sofia.bg.

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: проф. дтн Илиана Маринова

РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА СИСТЕМА ЗА АВТОМАТИЗИРАНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТИ

Йоско Балабозов, Кръстьо Хинов, Виктор Стаменов, Иван Ячев

Резюме: *Работа е продължение на предходна публикация на авторите, свързана с автоматизирана система за изследване на динамичните характеристики на електромагнити. В настоящата работа е представена разработената експериментална система и сензорни модули, както и направените с тях измервания. Обекти на изследване са поляризиран електромагнитен механизъм и постояннотоков контактор.*
Ключови думи: *измерване на ускорение, измерване на ток, електромагнити, микроконтролери*

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL SYSTEM FOR AUTOMATED STUDY OF ELECTROMAGNETS

Iosko Balabozov, Krastyo Hinov, Viktor Stamenov, Ivan Yatchev

Abstract: *This work is a continuation of a previous authors' publication connected with automated system for the study of the dynamic characteristics of electromagnets. In the present work, the developed experimental system and sensor modules, as well as the measurements made with them, are presented. The objects of the study are a polarized electromagnetic mechanism and DC contactor.*
Keywords: *acceleration measurement, current measurement, electromagnets, microcontrollers*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременното развитие на електрониката и появата на достъпни микроконтролерни системи дава възможност за автоматизиране на инженерните задачи и повишаване на точността на резултатите от тях. В литературни източници [1-5] са разгледани така наречените „вградени системи“. Тези системи интегрират в едно устройство всички електронни блокове, необходими за тяхното функциониране, като захранване, микропроцесорен блок, входно-изходен блок, различни видове памети и други. Описани са хардуерните и софтуерните принципи, залегнали при тяхното изграждане и използването им в автономни управляващи системи.

Разработената система е съставена от следните основни части:

- Софтуерна част - включваща софтуерни алгоритми и графична среда за управление и визуализиране на резултатите от експеримента;

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

- Хардуерна част - съставена от микроконтролерна система изпълняваща заложените софтуерни алгоритми и микрокомпютър за съхранение и обработка на получените резултати;
- Измервателни и управляващи модули.

Хардуерната реализация на системата и необходимите софтуерни алгоритми, както и разработената графична среда за управление и настройка на параметрите при реализиране на експеримента са представени в предходна публикация на авторския колектив [6].

Основната цел на настоящата работа е да се представят постигнатите резултати от направените експерименти с разработената автоматизирана система. Представени са и разработените сензорни модули, чрез които се измерват различните величини (ток, напрежение, ускорение), или с които се реализира специфично управление на изследвания електромагнит.

При провеждането на експерименталните изследвания с разработените сензорни модули са използвани електромагнитни поляризирани модули, чиито характеристики са изследвани и определени в [7-9]. Направени са и измервания за изменението на тока в намотката на постояннотоков контактор по време на движението на котвата.

2. РАЗРАБОТВАНЕ НА СЕНЗОРНИ ИЗМЕРВАТЕЛНИ МОДУЛИ

2.1. Модул за измерване на ускорение.

При направата на модула за измерване на ускорение е използван триосен акселерометър MMA7341L. Общ изглед на модула, както и някои основни характеристики са дадени на фиг.1.

а) общ изглед

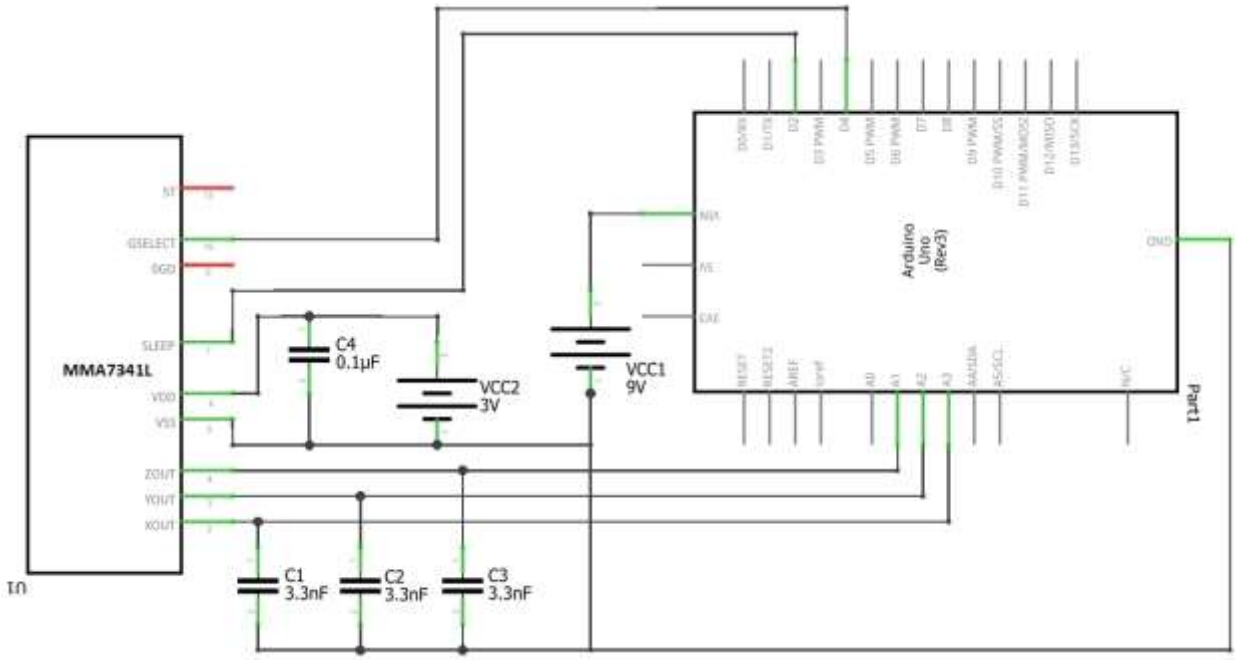
MMA7341L – основни характеристики				
Обхват / чувствителност			Работни параметри	
пин g обхват	ускорение	чувствителност	Захранващо напрежение	Изходящ сигнал в покой
0	±3g	440 mv/g	Umin = 2,2V	*при Uвх=3,3V* 1,65V
1	±11g	117 mv/g	Umax = 3,6V	

б) основни характеристики

Фиг.1. Модул за измерване на ускорение.

На фиг.2 е представена реализираната електрическа схема и свързването на измервателния модул към микроконтролерната система. Чрез подаване на високо ниво (логическа 1) или ниско ниво (логическа 0) на вход „GSELECT“ се осъществява смяна на обхвата на акселерометъра, което допълнително повишава точността на измерванията при по-малки ускорения. Чрез вход „SLEEP“ е възможно модулът да се приведе в чакащ режим, при което консумацията на електроенергия намалява около 130 пъти в сравнение с работното му състояние. Ана-

логовите сигнали по трите оси се получават на изходи „XOUT“, „YOUT“, „ZOUT“, след което постъпват в микроконтролера, обработват се и се визуализират на екрана на компютъра в разработеното графично приложение.

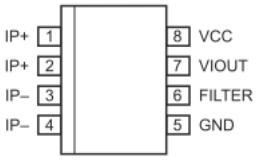


Фиг.2. Електрическа схема на модула за измерване на ускорение.

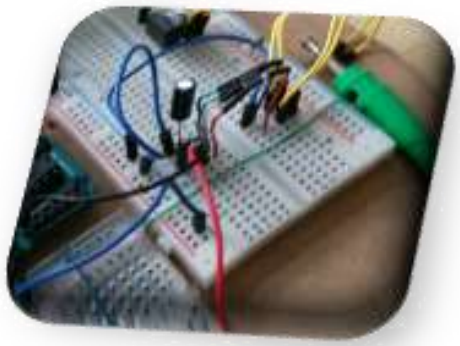
2.2. Модул за измерване на ток.

За измерване на електрическия ток е реализиран модул, базиран на интегрална схема ACS712, която представлява линеен сензор на Хол с аналогов изход. Снимка на модула и основните му характеристики са дадени на фиг. 3.

ACS712 - основни характеристики	
Vcc	5V
Честота	до 80kHz
Чувствителност	100mV/A



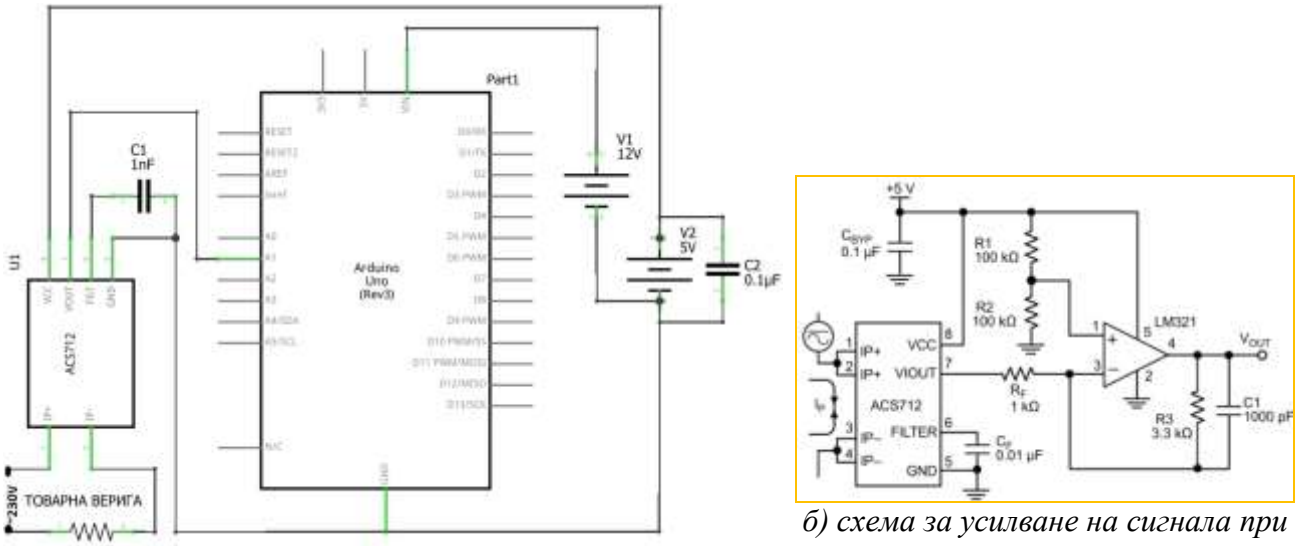
а) основни характеристики



б) снимка на модула

Фиг.3. Модул за измерване на ток.

Електрическата схема на реализираната опитна постановка с използване на разработения модул е дадена на фиг.4.а. При измерване на малки по стойност токове, за повишаване на точността на измерванията е необходимо да се реализира схема за усилване на сигнала като тази от фиг.4.б.



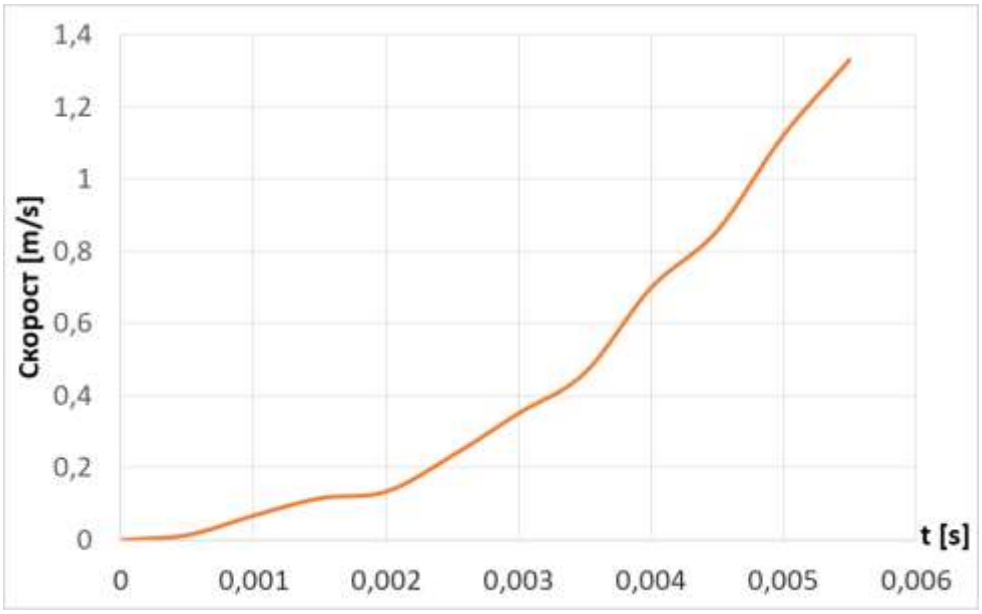
а) основна електрическа схема

б) схема за усилване на сигнала при малки токове

Фиг.4. Електрическа схема с използване на модула за измерване на ток.

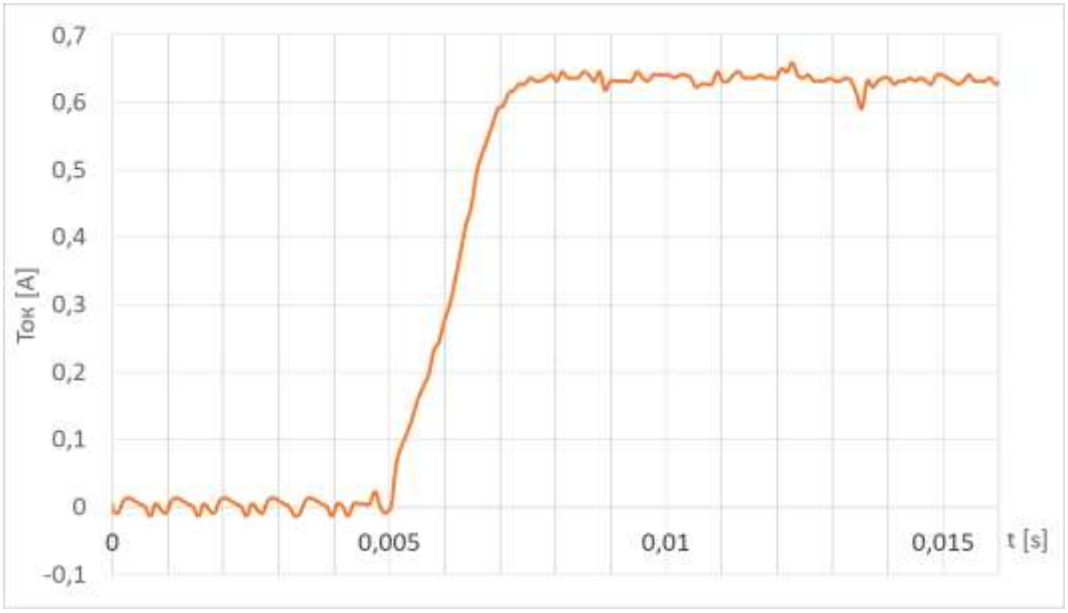
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ НАПРАВЕНИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ

Скоростта на котвата на поляризирания механизъм, получена чрез преобразуване на данните от сензора за ускорение, е дадена на фиг.5. Използваният обхват на сензора е ±11g (*g-земно ускорение*).



Фиг.5. Скорост на движение на котвата на изследвания електромагнит.

На фиг.6 е представено изменението на тока през намотката на изследвания поляризиран електромагнитен механизъм. Времето за превключване на механизма в едно от двете крайни положения е 8 ms. Високата точност на задаване на параметрите на захранващите импулси от системата предоставя възможност да се прекрати захранването към модула в момента на спиране на движението на котвата, което е предпоставка за намаляване на разхода на енергия Това от своя страна води и до по-малки топлинни загуби в намотката, което е предпоставка за увеличаване на максималния брой на превключванията за една минута.

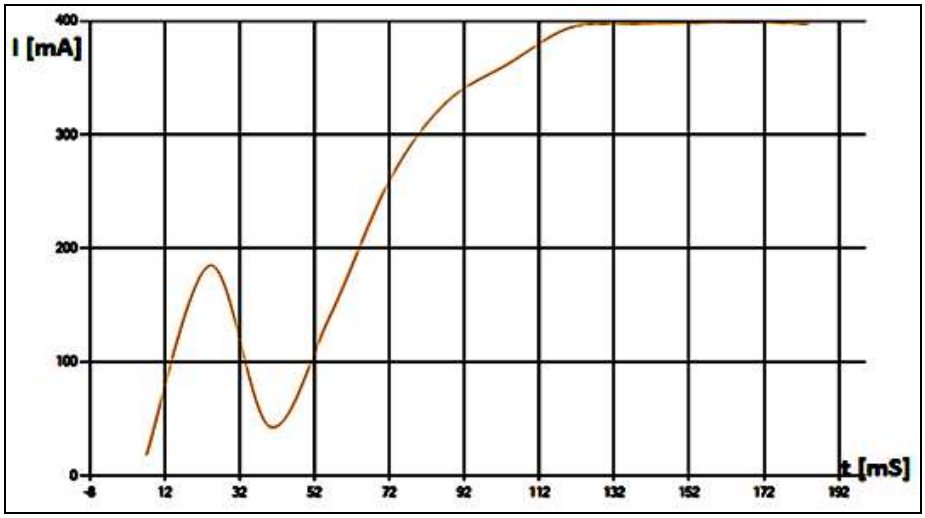


Фиг.6. Ток през намотката на изследвания електромагнитен поляризиран механизъм по време на движение на котвата.

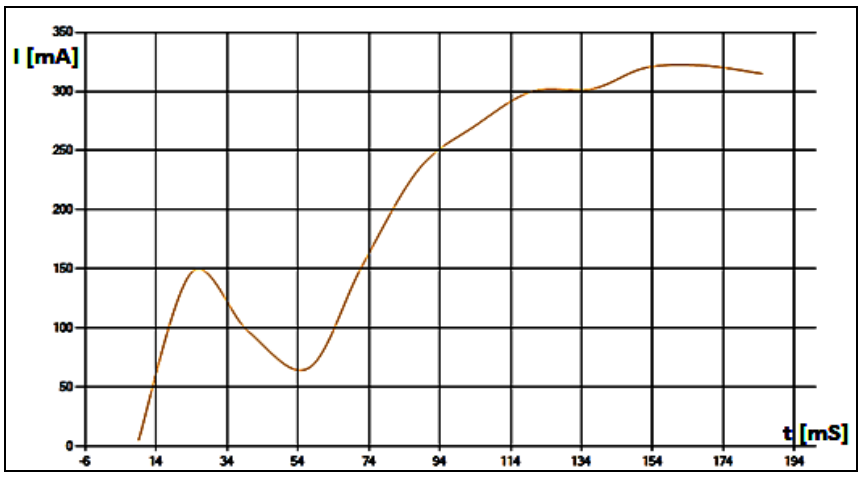
За апробация на работата на разработените модули са направени аналогични изследвания и с двуполюсен постояннотоков контактор за номинален ток 63A и управляващо напрежение 80V DC.

Резултати за изменението на тока през намотката при различни стойности на управляващото напрежение са дадени на фиг.7 и фиг.8.

Забелязва се, че при понижаване на напрежението с около 13%, токът през намотката намалява с 25%, а времето за включване се удължава с 25%.



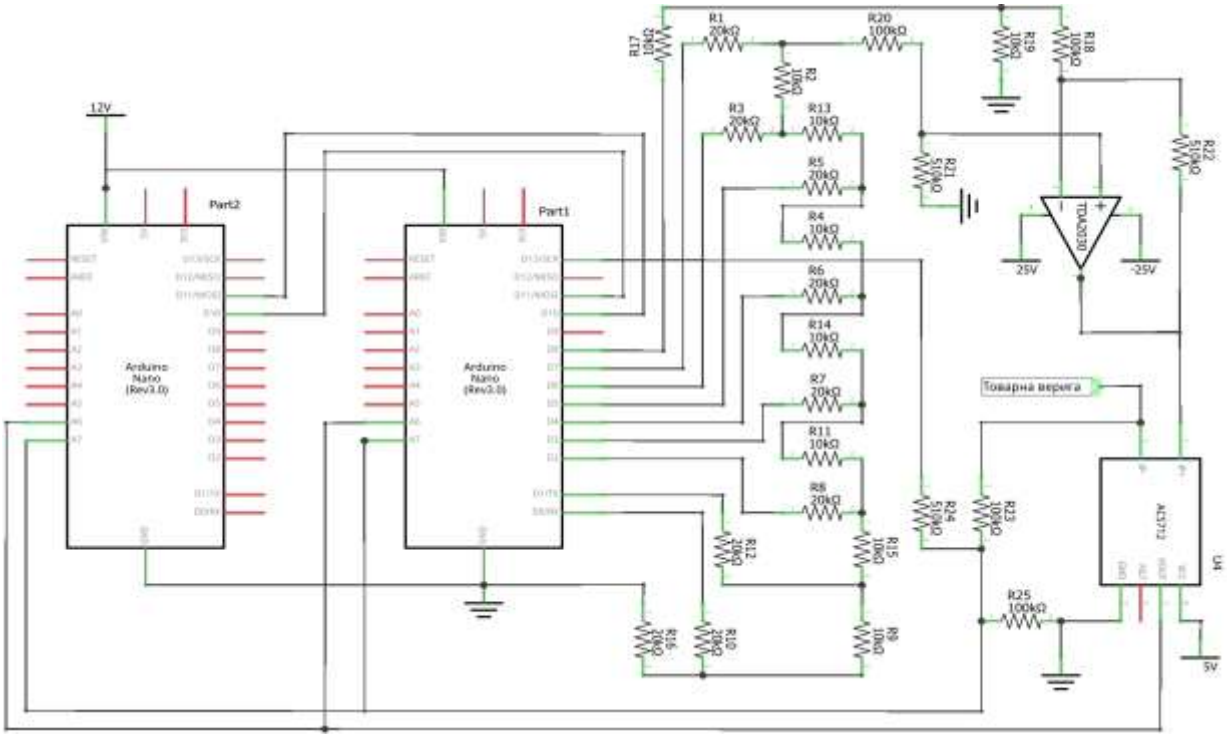
Фиг.7. Ток през намотката на изследвания постояннотоков контактор по време на движение на котвата, при управляващо напрежение 80V.



Фиг.8. Ток през намотката на изследвания постояннотоков контактор по време на движение на котвата, при управляващо напрежение 70V.

4. БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ НА РАЗРАБОТЕНАТА СИСТЕМА

Модулността на системата дава възможност за лесното й разширяване и добавянето на нови възможности към нея. Едно бъдещо подобрение би било внедряването на модул за реализиране на обратна връзка по напрежение и ток, което ще направи възможно автоматичното следене и поддържане на зададените параметри по време на провеждането на даден експеримент. Вариант на такъв модул е показан на фиг.9.



Фиг.9. Реализиране на обратна връзка по ток и напрежение.

В основата на представения модул за обратна връзка са два контролера работещи заедно, като комуникацията между тях се осъществява чрез I2C протокол (пинове 10 и 11). На аналоговите пинове A7 и A6 се подават съответно сигналите от напрежителния и токовият сензор. Аналоговият управляващ сигнал се

формира от дигитални пинове от 0 до 7 и осем битовият цифров-аналогов преобразувател изпълнен по схемата "R2R" с резистори от R1 до R16. По този начин чрез дигиталните пинове се формира аналогов сигнал от 0 до 5V.

Този аналогов сигнал се подава на неинвертиращия вход на мощен операционен усилвател (TDA2030). На инвертиращия се подават 2,5V, получени от делителя на напрежение изпълнен с резистори R17 и R19. Операционният усилвател е свързан като диференциален усилвател. С резисторите R22 = R21 = *Rf* и R20 = R18 = *Ra* се определя коефициентът на усилване.

$$K = Rf / Ra \quad (1)$$

Изходният сигнал от операционния усилвател е съответно:

$$U = (Rf / Ra).(U1 – U2), \quad (2)$$

където:

- *U1* е напрежението от цифрово-аналоговия преобразувател;
- *U2* е напрежението от делителя.

По този начин чрез изменение на напрежението от 0 до 5V, се генерира напрежение от -12,5V до +12,5V. Това генерирано напрежение захранва товара (не е посочен на схемата), като се измерват и следят тока и напрежението, чийто стойности се подават на аналогови входове A7 и A6 и осъществяват обратната връзка, необходима за регулирането на захранващия ток и напрежение, т.е. ако необходимият ток е 300mA, а измереният е 200mA, чрез управление от микроконтролера през цифровия-аналогов преобразувател се повишава стойността на изходното напрежение докато токът не стане 300mA и обратно - ако зададеният ток е 200mA, а измереният е 400mA, чрез цифрово-аналоговия преобразувател се понижава стойността на изходното напрежение докато токът не стане 200mA. Този процес на регулиране се извършва през цялото време на провеждане на експеримента при съответно избрания режим (регулатор на ток, или на напрежение).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модулният дизайн на разработената система предоставя възможност за добавяне на допълнителни измервателни модули и за едновременно измерване на няколко величини. Представените резултати от направените измервания показват изменението на тока през намотката на изследваните устройства (контактор и поляризиран електромагнитен механизъм) по време на движението на котвата им. Проведени са експерименти при различна големина на захранващото напрежение на изследваните модули, при което е определена минималната стойност на напрежението, при което се задейства даденото устройство.

Разработената система дава възможност за провеждането на редица експериментални изследвания и решаването на голям брой инженерни задачи. Едновременно с това необходимостта от човешка намеса е сведена до минимум. Това от своя страна ограничава възможността за допускане на редица грешки при подготовката и провеждането на експеримента и дава възможност за по-

голяма концентрация върху анализа на постигнатите резултати.

Намаленото време за получаване на необходимите резултати е от съществено значение при провеждането на експерименти върху серия от електромагнитни механизми. Важно качество на системи от този тип е и възможността за изпращане и визуализиране на резултатите на отдалечен онлайн сървър, както и дистанционното задаване на нови стойности на входните за системата параметри.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Marwedel P., ***Embedded System Design***, Springer Science+Business Media B.V. 2011, ISBN 978-94-007-0256-1

[2] Li, Yau-Tsun S., Malik, ***Performance Analysis of Real-Time Embedded Software***, Kluwer Academic Publishers 1999, ISBN 978-1-4615-5131-7

[3] Pop P., Eles P., Peng Z., ***Analysis and Synthesis of Distributed Real-Time Embedded Systems***, Kluwer Academic, 2004, ISBN 978-1-4020-2873-1

[4] Каракехайов З., Кристенсен К., Винтер О., ***Проектиране на вградени микрокомпютърни системи с микроконтролери. Хардуер и софтуер***, Pensoft Publishers, 2000, ISBN 9546421014, 9789546421012

[5] Георгиев В., Нишева М., Бончев Б., ***Вградени и автономни системи***, Академично издателство „Св. Климент Охридски“, София, 2014.

[6] Й. Балабозов, К. Хинов, Д. Венков, И. Ячев, ***Автоматизирана система за изследване на динамичните характеристики на електромагнити***, Годишник на Технически Университет - София, т. 67, кн. 1, 2017, сс. 381-387.

[7] Хинов К., Балабозов Й., Ячев И., ***Изследване на електромагнит за Брайлов екран с подобрени характеристики***, Годишник на ТУ - София, том 64, книга 4, 2014, сс. 135-142.

[8] Balabozov I., Yatchev I., Hinov K., ***Computer Modeling and Experimental Verification of Dynamic Characteristics of Permanent Magnet Linear Actuator for Braille Screen***, Proc. Int. Conf. on Applied and Theoretical Electricity ICATE 2014, Craiova, Romania, 2014.

[9] Балабозов Й., Хинов К., Стоименов Й., Гьошев С., Карастоянов Д., ***Изследване на движението на електромагнит за Брайлов екран чрез високоскоростна камера***, Годишник на ТУ - София, т. 66, кн. 1, 2016, сс. 541-547.

Автори: Йоско Балабозов, гл. асистент д-р инж., катедра “Електрически апарати”, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *i.balabozov@tu-sofia.bg*; **Кръстьо Хинов**, доц. д-р инж., катедра “Електрически апарати”, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *k_hinov@tu-sofia.bg*; **Виктор Стаменов**, инж. студент, катедра “Електрически апарати”, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *viktor.g.stamenov@gmail.com*; **Иван Ячев**, проф. дтн инж., катедра “Електрически апарати”, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *yatchev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: проф. дтн Илиана Маринова

ФИЗИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ВЕТРОЕНЕРГИЙНИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛНИ СИСТЕМИ СЪС СИНХРОННИ ГЕНЕРАТОРИ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Захари Зарков, Владимир Лазаров, Людмил Стоянов, Иван Бачев, Борис Демирков

Резюме: *Статията представя стенд за физическо моделиране на съвременни ветроенергийни преобразувателни системи (ВЕПС) в лабораторни условия. В стенда като генератор се използва синхронна машина с постоянни магнити. Дадена е структурата на стенда и са описани накратко основните му елементи – задвижване, генератор, изправител, инвертор, система за настройка и наблюдение. Проведени са експериментални изследвания със стенда и са показани някои основни резултати получени при тях. Стендът позволява да се моделират електрическите и механичните процеси във ВЕПС със синхронен генератор с постоянни магнити, като се използват елементи с малка мощност.*
Ключови думи: *ветроенергийни преобразувателни системи, ВЕПС, синхронни генератори с постоянни магнити, СГПМ, физическо моделиране на ВЕПС.*

PHYSICAL MODELING OF WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATORS

Zahari Zarkov, Vladimir Lazarov, Ludmil Stoyanov, Ivan Bachev, Boris Demirkov

Abstract: *The paper presents a bench for physical modeling of modern wind energy conversion systems (WECS) in laboratory conditions. A synchronous machine with permanent magnets is used as a generator. The structure of the bench is given and its basic elements – motor drive, generator, rectifier, inverter, and monitoring system are briefly described. Experimental studies have been carried out with the developed stand and some basic results are shown. The stand allows to model the electrical and mechanical processes in a WECS with a permanent magnet synchronous generator using low-power elements.*
Keywords: *wind energy conversion systems, WECS, permanent magnet synchronous generators, PMSG, physical modeling of WECS, wind turbines.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните ветроенергийни преобразувателни системи (ВЕПС) съществува тенденция на увеличаване на използването на синхронни генератори с постоянни

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

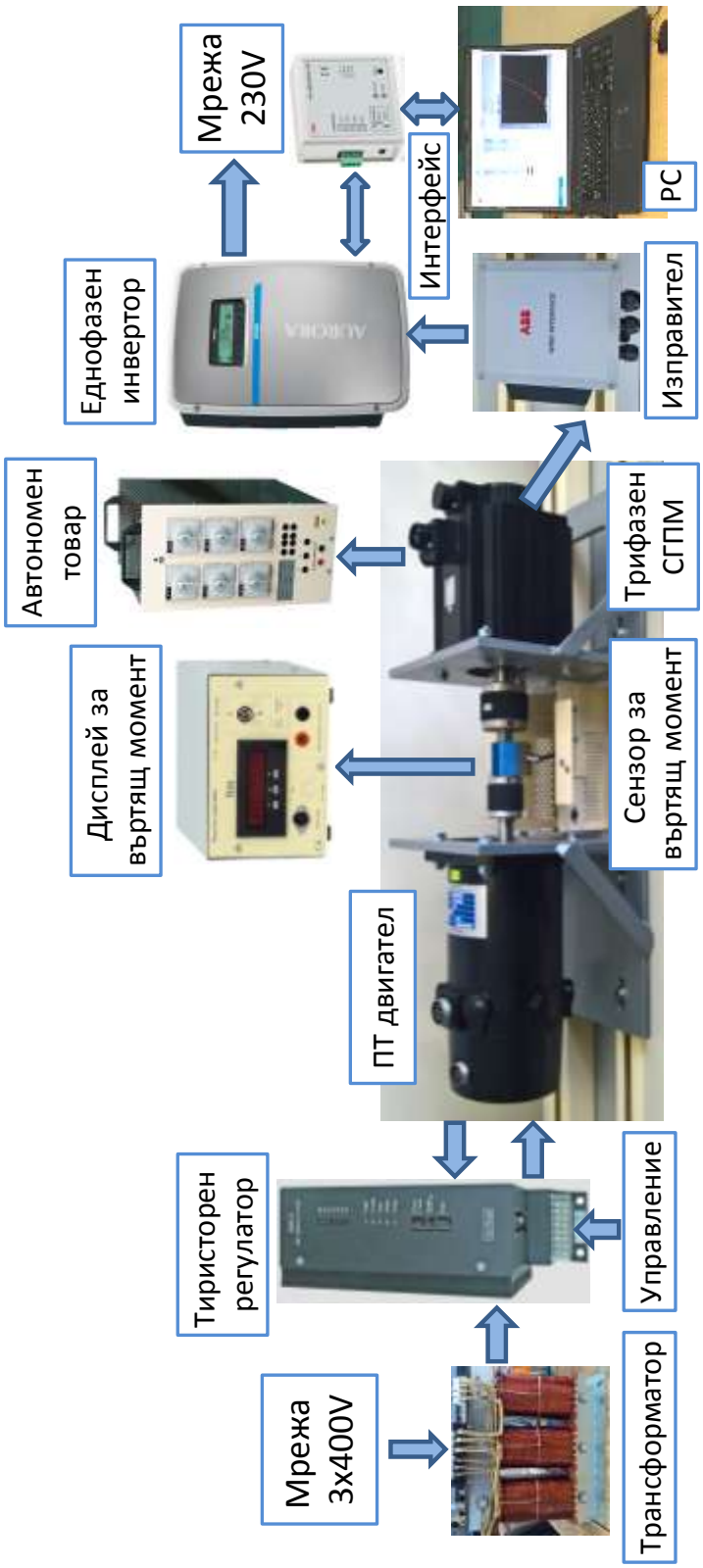
магнити (СГПМ). Тези генератори се използват както в големи (с мощност няколко мегавата) така и в малки ВЕПС (с мощност под 10kW), работещи с променлива скорост на въртене [1], [2]. СГПМ имат следните предимства пред синхронните генератори с електромагнитно възбуждане: липса на възбудителна намотка, по-висок к.п.д. поради премахването на загубите за възбуждане, помалки размери и маса. Все по-намаляващата цена, подобряващите се качества и утвърдената технология на производство на редкоземните магнити прави СГПМ икономически изгодна алтернатива на другите типове генератори, използвани в съвременните ВЕПС [3]. Трябва обаче да се отбележи, че при използване на синхронни генератори във ВЕПС се налага да се свърже електронен преобразувател за пълната мощност на генератора между него и електрическата мрежа [4]. Широкото навлизане на вятърните генератори в практиката, както и продължаващата интензивна работа по тяхното усъвършенстване налага изследването им и в лабораторни условия. Това става възможно чрез създаване на лабораторни стендове, които съответстват по своята структура и елементи на реална ВЕПС [5]. В повечето случаи не е възможно да се използва реална вятърна турбина в лабораториите. Затова се налага тя да бъде заменена с електрически двигател с подходящо управление, който да имитира специфичните механични характеристики на вятърната турбина [6], [7]. Освен това в повечето лаборатории е невъзможно да се монтират мегаватови машини, каквито са мощностите на съвременните големи ВЕПС. Моделирането и изследването на такива мощни вятърни генератори може да стане чрез стендове, които представляват умалени физически модели, съответстващи на големите ВЕПС [5], [8].

2. ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Целта на настоящото изследване е създаване на стенд за физическо моделиране на ветроенергийни преобразователни системи (ВЕПС), които използват синхронни генератори с постоянни магнити. Стендът трябва да дава възможност да се моделират електрическите и механичните процеси в една ветроенергийна преобразувателна система с генератор с постоянни магнити, като се използват елементи с малка мощност и по-точно: работа с постоянна скорост; работа с променлива скорост; преходни режими и процеси; работа в автономен режим; работа в паралел с мрежата; работа в състава на хибридна система и др.

3. ОПИСАНИЕ НА СТЕНДА

Общата структура на стенда е показана на фиг.1. Основните компоненти в него са двигател за постоянен ток с тиристорен преобразувател, синхронен генератор с постоянни магнити и еднофазен мрежов инвертор. В стенда реалната вятърна турбина е заменена с двигател за постоянен ток (ДПТ), който се захранва с тиристорен преобразувател. Тази комбинация дава възможност при използване на подходящо управление двигателят да се държи като вятърна турбина, следвайки нейните механични характеристики при различни скорости на вятъра. При тази постановка мултипликаторът обикновено се избягва, защото двигателят се подбира с подходяща скорост на въртене, която да съответства на скоростта на избрания генератор.



Фиг.1. *Структура на стенда за физическо моделиране на ВЕПС.*

Постояннотоковият двигател е тип 2MX-2T с номинални данни: ток 28A, скорост на въртене 2000 min^{-1} и въртящ момент 16Nm. За захранване на двигателя е използван управляем трифазен реверсивен тиристорен преобразувател (УТП) тип SDC1V-17, който се захранва от мрежата през понижаващ трансформатор (фиг.1).

Тиристорният преобразувател работи с обратна връзка по скорост на въртене, която се осъществява посредством вграден постояннотоков тахогенератор.

Останалите елементи на стенда са такива, каквито се използват във ВЕПС с малка мощност (в случая 2kW) и тяхното поведение е точно такова, както при реалните ВЕПС. Стендът също така дава възможност да се проследят процесите на преобразуване на енергията и начина на работа и на ВЕПС с голяма мощност като се мащабират по подходящ начин електрическите и механичните величини.

За генератор е използвана трифазна синхронна машина с постоянни магнити (СГПМ) тип 180ST–M27010 с номинални параметри: ток 12A, напрежение 220V, въртящ момент 27Nm и скорост на въртене 1000 min^{-1}.

Променливото напрежение от СГПМ трябва да се изправи преди да се подаде на входа на инвертора. Това става посредством т.нар. „вятърен интефейс“ тип 4000-WIND-INTERFACE. Той съдържа трифазен диоден токоизправител, електронна система за измерване на скоростта на въртене на генератора и защита срещу силен вятър и отпадане на мрежата посредством баластен товар.

Инверторът е специално проектиран за свързване с вятърен генератор, еднофазен, тип UNO-2.0-I-OUTD-W с максимална изходна мощност 2kW, входно постоянно напрежение 90-450V и е предназначен за мрежа с напрежение 230V.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

С представения стенд са проведени редица експериментални изпитвания и тестове, които са необходими за доказване на функционалността на отделните елементи, снемане на характеристиките на машините и за настройка на съвместната работа на елементите на стенда.

Определени са загубите (механични и в стоманата) на ДПТ P'_0 и на генератора P'_{0SG}. Получените опитни характеристики са апроксимирани с полиноми от втори ред, както следва.

За двигателя за постоянен ток:

$$P'_0 = 11{,}86k^2 + 34{,}95k\ , \qquad (1)$$

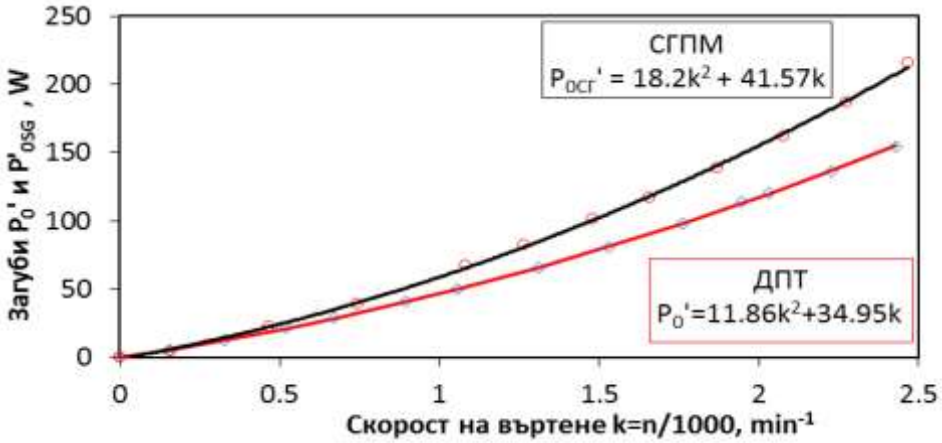
където $k = n/1000$, n е скоростта на въртене в min^{-1}.

За синхронния генератор:

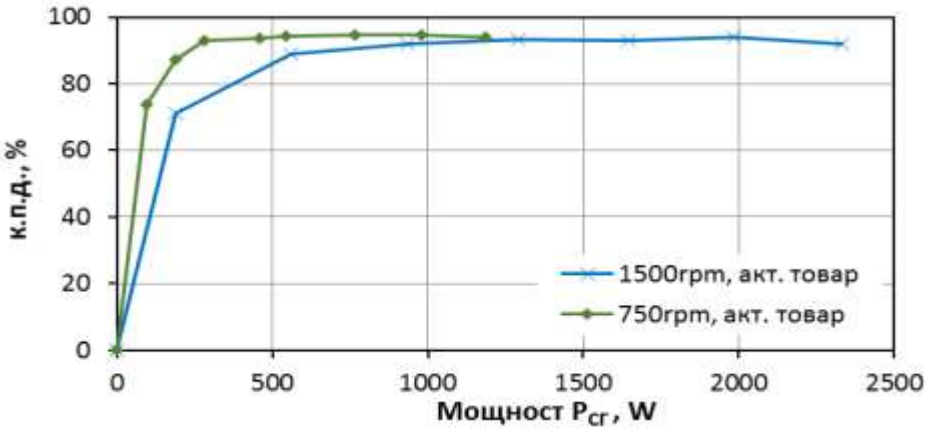
$$P'_{0SG} = 18{,}2k^2 + 41{,}57k\ . \qquad (2)$$

Апроксимиращите функции са необходими са по-лесното изчисляване на загубите в машините при снемането на работните характеристики и определянето на коефициента на полезно действие (к.п.д.). Графиките на загубите са показани на фиг.2.

Снети са и работните характеристики на двете машини при различни скорости на въртене. Интерес представлява (к.п.д.) на СГПМ. На фиг.3 е показано сравнение на измерения к.п.д. на СГПМ при две скорости на въртене (750 и 1500min^{-1}) и работа с активен трифазен товар. Трябва да се отбележи високата стойност на к.п.д. на генератора (като се има предвид малката му номинална мощност), която достига 94,7% при режима на работа с 750 min^{-1}. Високата стойност на к.п.д. се запазва в широк обхват на изменение на мощността: между 250 и 1200W при по-ниската скорост и от 500 до 2300W – при по-високата.



Фиг.2. *Характеристики на загубите в зависимост от скоростта на въртене на двигателя и генератора. С маркерите са експерименталните стойности, а с плътните линии – апроксимиращите функции.*

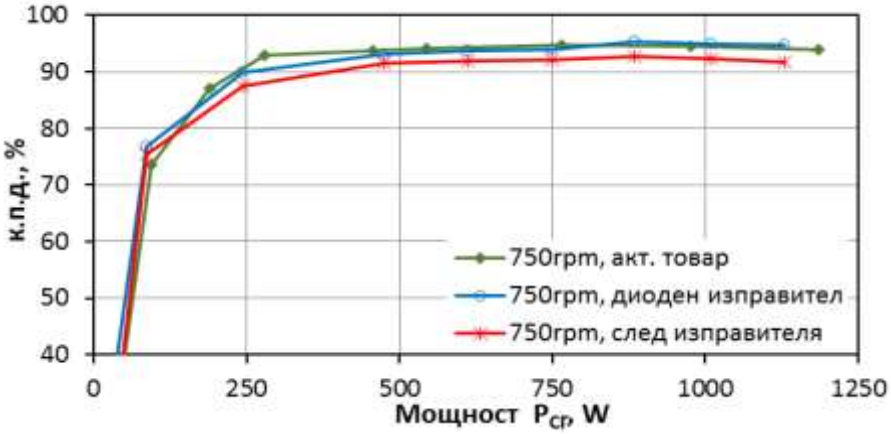


Фиг.3. *Сравнение на к.п.д. на СГПМ при две скорости на въртене и работа с активен товар.*

Тъй като в реалната ВЕПС генераторът работи съвместно с диоден изправите, е проведено и експериментално изследване при такова свързване. На фиг.4 е показано сравнение на к.п.д. на СГПМ, работещ с активен товар, СГПМ, работещ с диоден изправител и к.п.д. на комбинацията от СГПМ и изправител.

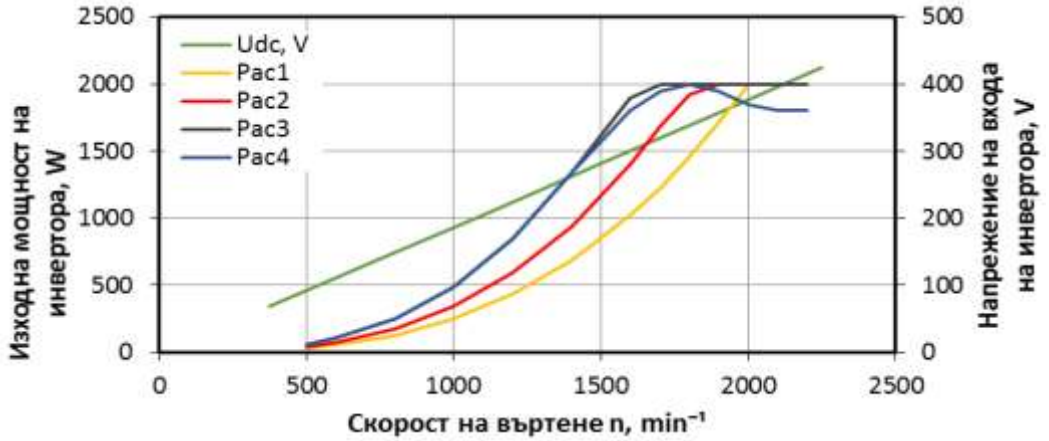
От резултатите може да направи изводът, че влиянието на нелинейния товар, какъвто е диодният изправител, върху к.п.д. на СГПМ е незначително и от опита не може да бъде установено с достатъчна точност. Кривата на к.п.д. на комбинацията СГПМ-изправител е по-ниско от кривата на к.п.д. на генератора с 2 до 3%, което съответства на данните за к.п.д. на изправителя, дадени от производителя.

Кривата на мощността на вятърния генератор представлява изходната електрическа мощност в зависимост от скоростта на вятъра. Когато турбината работи с променлива скорост на въртене, мощността се изменя с третата степен на скоростта на вятъра. За да може турбината да работи в максимума на кривата на мощността, е необходимо електрическата мощност на генератора да се управлява по подходящ начин.



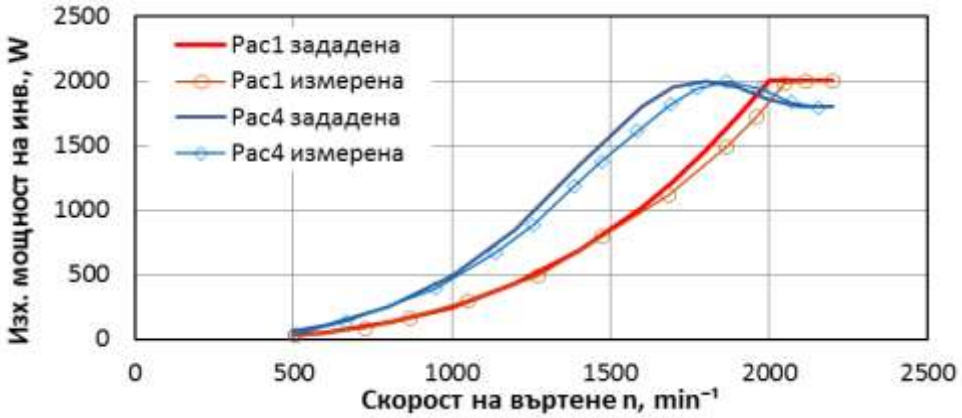
Фиг.4. *Сравнение на к.п.д. на СГПМ при активен товар, с диоден изправител и на подсистемата СГПМ-диоден изправител.*

В разглежданата система единствената възможност за регулиране на мощността е в инвертора. Ето защо на инвертора се задава крива на изходната мощност (тази, която се отдава в мрежата), която да следва максимума на мощността на турбината. За целта е необходимо да се познава кривата на мощността на турбината.
Кривата на мощността на инвертора може да се задава по два начина – в зависимост от входното постоянно напрежение U_{dc} или в зависимост от честотата на напрежението на генератора. При правилно зададена крива инверторът ще управлява изходната мощност така, че турбината да работи с максимална възможна мощност при всяка скорост на вятъра. Разбира се, при достигане на максималната мощност на турбината се влиза в ограничение и изходната мощност остава постоянна, както се вижда от кривите на фиг.5.
Показаните на фиг.5 криви са изчислени за различни типове вятърни турбини на базата на зависимостта на напрежението на входа на инвертора U_{dc} от скоростта на въртене на генератора n.
Кривата на мощността е зададена на инвертора като зависимост на изходната мощност P_{ac} от напрежението на входа U_{dc}, т.е. по първия от описаните по-горе начини. Изчислените криви на мощността са въведени в паметта на инвертора с помощта на фирмения софтуер Aurora Manager LITE.



Фиг.5. *Криви на изходната мощност на инвертора в зависимост от скоростта на въртене на генератора с четири вида различни турбини.*

Проведено е експериментално изследване за проверка на точността на отработване на кривата на мощността, зададена на инвертора. Резултатите са показани на фиг.6, където са дадени резултати при работата на инвертора с криви на мощността № 1 и 4.

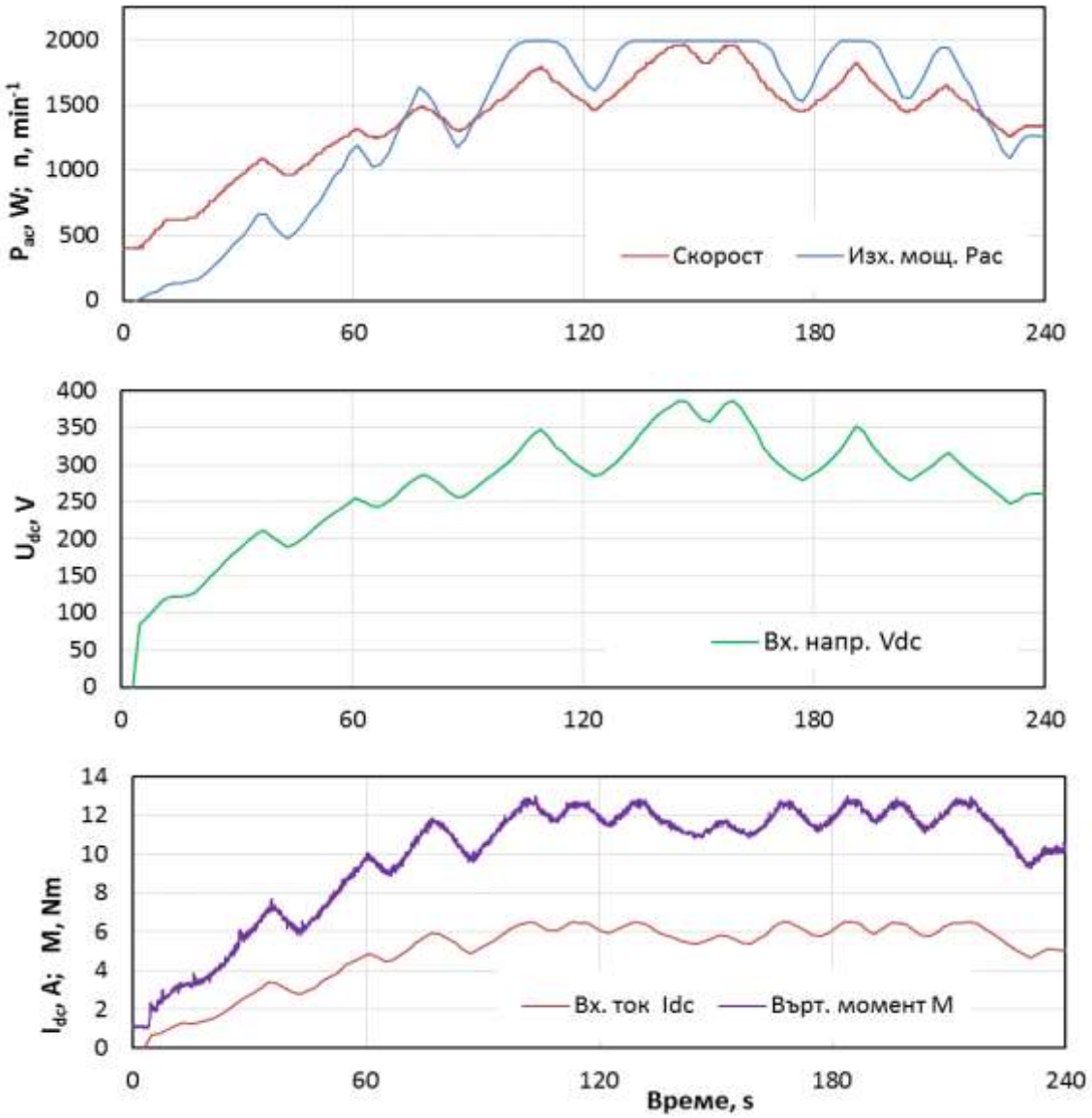


Фиг.6. *Сравнение на зададени и експериментално получени криви на изходната мощност на инвертора в зависимост от скоростта на въртене.*

При анализа на графиките се вижда, че с нарастването на скоростта на въртене разликата между зададената и реалната мощност, която инверторът отдава в мрежата, нараства до достигане на зоната на максималната мощност, където тази разлика отново става почти нула. При това отдадената мощност е винаги по-малка от зададената. Това отклонение може да се обясни с намаляването на напрежението на изхода на изправителя при увеличаване на консумирания ток. Когато напрежението на входа на инвертора е по-ниско, той отдава в мрежата по-малка мощност, съгласно зададената му крива. Проблемът се състои в това, че постоянното напрежение на изхода на изправителя е измерено при ток 1,5А, който е по-малък от тока при натоварване с голяма мощност. При наличието на вече измерените стойности могат да се направят корекции на зададените криви на мощността на инвертора така, че той да следва заданието за мощност по-точно при промяна на скоростта на въртене.

Проведено е и изследване на системата при променлива скорост на въртене с цел да се установи как се държи тя при променлива скорост на вятъра. Резултатите от изследването за период от време 4 min в графичен вид са показани на фиг.7.

Опитът е проведен като се променя скоростта на въртене на постояннотоковия двигател (което съответства на промяна на скоростта на вятъра в реални условия) с помощта на заданието за скорост на тиристорния преобразувател. При промяната на скоростта на въртене се променя напрежението на генератора, а от там и напрежението на изхода на изправителя. Промяната на изходното напрежение на изправителя, което е входно за инвертора, води до промяна на изходната мощност на инвертора съгласно зададената крива на мощността (виж. фиг.5). При това се променя токът на изправителя, а оттам и токът на генератора, което води и до промяна на въртящия момент на вала на генератора.



Фиг.7. *Изменение на величините в системата при работа с променлива скорост на въртене на двигателя и генератора.*

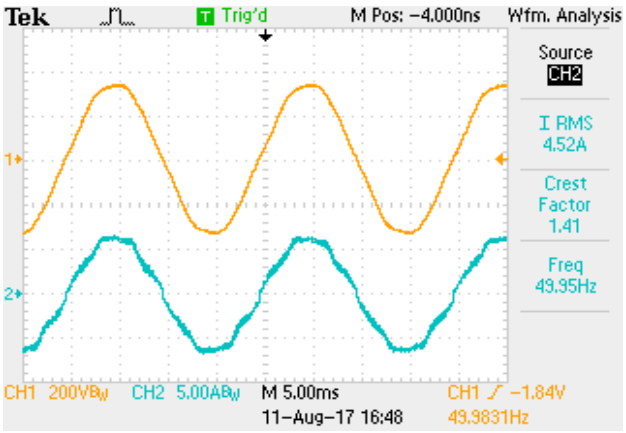
Величините са регистрирани едновременно по два начина:

- чрез системата за събиране на данни в реално време на софтуера Aurora Manager LITE – напрежение U_{dc}, ток на входа на инвертора I_{dc}, изходна мощност на инвертора P_{ac}.
- посредством цифров осцилоскоп – скорост на въртене n от напрежението на тахогенератора, въртящ момент M от аналоговия изход на дисплея за въртящ момент.

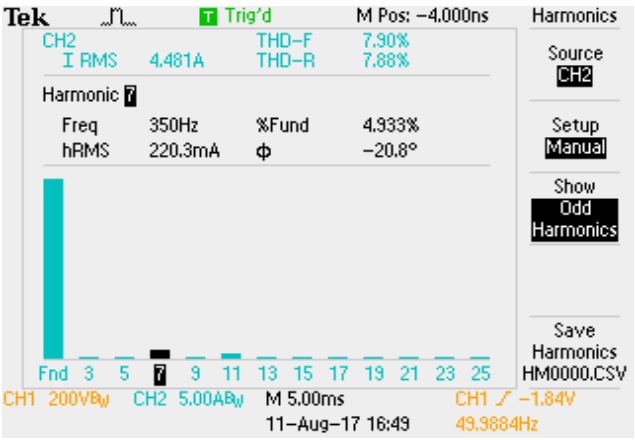
Анализът на регистрираните данни показва, че системата успешно и точно отследява промяната на скоростта на въртене, което се отразява в промяна на всички останали величини. Ясно се вижда и достигането на максималната мощност на инвертора (в случая 2000W), при което по-нататъшното нарастване на скоростта и напрежението не води до увеличаване на мощността на изхода на инвертора.

На фиг.8 са показани осцилограми на тока и напрежението на изхода на инвер-

тора, а на фиг.9 – хармоничният състав на тока на инвертора, който се отдава в електрическата мрежа.



Фиг.8. *Напрежение на мрежата и изходен ток на инвертора при* $n=1315min^{-1}$, $V_{dc}=240V$ *и* $P_{ac} = 1000W$.



Фиг.9. *Хармоничен състав на тока на инвертора при* $n=1315min^{-1}$, $V_{dc}=240V$ *и* $P_{ac} = 1000W$.

Осцилограмите показват, че токът на изхода на инвертора има добър хармоничен състав, който отговаря на изискванията за присъединяване към електрическата мрежа.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Създаденият стенд за физическо моделиране на ВЕПС с генератор с постоянни магнити отговаря на поставените цели. Стендът позволява задаване на различни криви на мощността на инвертора, които да съответстват на максималната мощност на вятърната турбина. Резултатите от експерименталните изследвания показват, че параметрите на трите главни елемента на стенда – двигател, генератор, инвертор, са правилно подбрани и се съгласуват добре при реалната работа на системата. Това дава възможност да се изследва работата на ВЕПС при променлива скорост на вятъра, както при краткотрайни преходни режими, така и за продължителни периоди от време – минути. Бъдеща посока на развитие ще бъде разработването на емулатор на вятърна турбина и добавяне на трифазни електронни преобразуватели в системата.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията в статията са финансирани по проект ДУНК № 01/3 „Университетски научно-изследователски комплекс“.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Cao W., Xie Y., Tan Z. (2012) **Chapter 7 - Wind Turbine Generator Technologies,** Advances in Wind Power, InTech, 2012

[2] Van Hertem D., Gomis-Bellmunt O., Liang J. (2016) **Chapter 5 - Wind Turbine Technologies,** HVDC Grids For Offshore and Supergrid of the Future, Wiley-IEEE Press, 2016

[3] **Kitco Metals Inc**., http://www.kitco.com/strategic-metals/

[4] Du Y., Bhat A. K. S. (2016) **Power Converter Schemes for Small Scale Wind Energy Conversion Systems - Review, a Systematic Classification Based on Isolation Transformer and Generator Side Rectifier,** 2016 Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), Ghaziabad, 2016, pp. 338-344

[5] Lazarov V., Zarkov Z.**,** Pouleva T., Spirov D., Stoyanov L. (2008) **Modeling environment for research of renewable energy sources operation in power limited energy systems**. Advances in Bulgarian Science, 1, 2008, pp. 24-31

[6] Weiwei Li, Dianguo Xu, Wei Zhang, Hongfei Ma (2007) **Research on Wind Turbine Emulation based on DC Motor**, 2nd IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2007, 23-25 May 2007, pp. 2589-2593

[7] Ovando R.I., Aguayo J., Cotorogea M. (2007) **Emulation of a Low Power Wind Turbine with a DC motor in Matlab/Simulink**. Power Electronics Specialists Conference PESC 2007, June 2007, pp. 859-864

[8] Arribas J.R. et al. (2011) **Computer-Based Simulation and Scaled Laboratory Bench System for the Teaching and Training of Engineers on the Control of Doubly Fed Induction Wind Generators**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 3, Aug. 2011, pp. 1534-1543

Автори: Захари Зарков, доц. д-р, кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; **Владимир Лазаров**, проф. д-р кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vl_lazarov@tu-sofia.bg*, **Людмил Стоянов**, доц. д-р кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *ludiss@tu-sofia.bg*, **Иван Бачев**, инж. докторант кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *iv.bachev@tu-sofia.bg*; **Борис Демирков**, инж. докторант, кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *demirkov@tu-sofia.bg*.

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Радослав Спасов

ОЦЕНКА НА ПОЛУЧЕНАТА ЕНЕРГИЯ ОТ ФОТОВОЛТАИЧНА ЦЕНТРАЛА

Людмил Стоянов, Захари Зарков, Владимир Лазаров, Ива Драгановска

Резюме: *В последните години множество проучвания са фокусирани върху изучаването на различни методи за прогнозиране на производителността на фотоволтаичните централи. Изходната мощност на дадена централа зависи от слънчевата радиация, температурата на околната среда, вида технология и географското положение на инсталацията. В повечето случаи данните предоставени от производителя не са достатъчни за точното прогнозиране в реални условия. Целта на настоящето проучване е да изработи подходящ модел, който да изчислява изходната мощност на фотоволтаична централа, изградена от тънкослойни панели (a-SI thin film) при експлоатационни условия, използвайки данни за слънчевата радиация и температурата на панела. Резултатите от прогнозата са сравнени с реално измерени данни с цел оценка на точността на модела.*
Ключови думи: *тънкослойни панели, прогнозиране, слънчева радиация, фотоволтаична централа*

ASSESSMENT OF THE ENERGY YIELD FROM PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

Ludmil Stoyanov, Zahai Zarkov, Vladimir Lazarov, Iva Draganovska

Abstract: *During the last years many researches are focused to find different methods for prediction the solar power plat production. The output power of one PV power plant depends on the solar irradiation, the ambient temperature, and the type of technology and the geographic location of the installation. In common case the information provided by manufactures is not sufficient for accurate prediction of power output in real conditions. The purpose of the present rapport is to design appropriate model which will calculate the output power of photovoltaic power plant of a-SI thin film panels under operational conditions using data for the solar radiation and the panel's temperature. The forecast results are compared with real measured data to estimate the model precision.*
Keywords: *thin film, forecasting, solar irradiation, photovoltaic power plant*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При проектирането и експлоатацията на една фотоволтаична система е важно да се прогнозира нейното годишно, месечно и дневно производство на електрое-

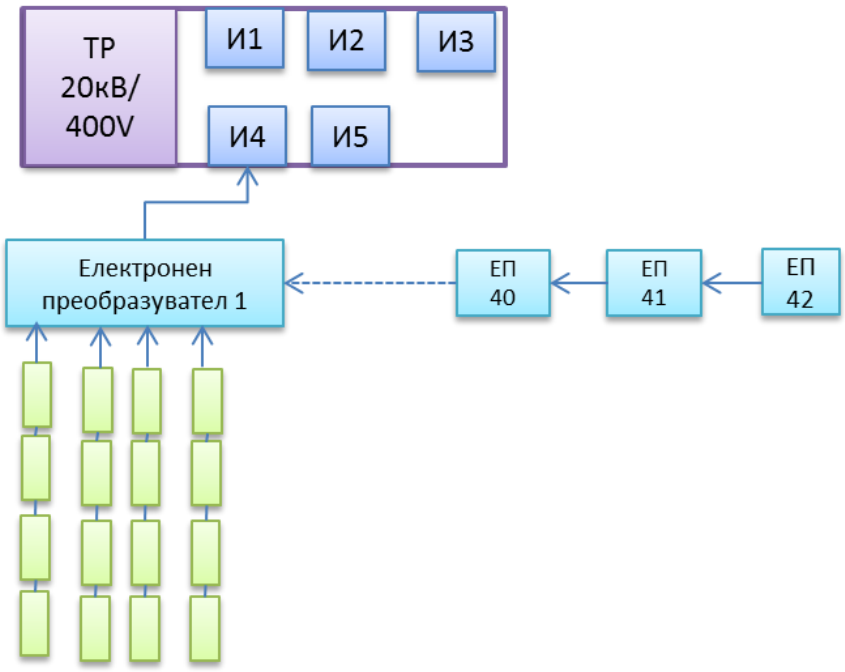
© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

нергия [1]. Операторите на електроразпределителните мрежи изискват от мениджърите на фотоволтаични централи да предоставят почасови прогнози за производство в деня преди доставка (D-1). Изходната мощност на една система е непостоянна, тъй като тя е пряко свързана с локалните атмосферни условия (слънцегреене, температура и други), което прави прогнозирането на изходната мощност сложна задача [2]. Редица проучвания са насочени в търсене на подходящи методи за прогнозиране [3]. Настоящата статия изследва работата на фотоволтаична централа от тънкослойни панели от аморфен силиций (thin-film a-Si) в експлоатационни условия. Използва се модела на Дюриш, който вече е показал добри резултати при прогнозиране на изходната мощност на система от тънкослойни фотоволтаични панели [4], както и модел на инвертор. С изчислената изходяща мощност на централата и според стъпката на изчисленията може да се пресметне произведената енергия.

2. ДАННИ ЗА ФОТОВОЛТАИЧНАТА ЦЕНТРАЛА

Изследва се фотоволтаична централа разположена в землището на Община Любимец, Североизточна България, със следните координати (41º55’55.43’’N, 26º09’6.95’’E). Общата инсталирана мощност е 1,31MWp. За преобразуването на слънчевата радиация в електрическа енергия са използвани тънкослойни фотоволтаични панели с мощност 390W. Панелите са монтирани на метална конструкция под ъгъл 30ºC. Полученото от тях напрежение се повишава чрез постояннотокови електронни преобразуватели (ЕП от 1 до 42), преобразува в променливо от инвертори с мощност 250kW (И от 1 до 5). Инверторите се обединяват в табло ниско напрежение (ТНН), след което напрежението се подава на повишаващ трансформатор 0,4/20kV (ТР). Архитектурата на централата е представена като блок схемата на фиг.1.



Фиг.1. *Блок схема на фотоволтаичната централа с електронни преобразуватели (ЕП), инвертори (И) и трансформатор (ТР)*

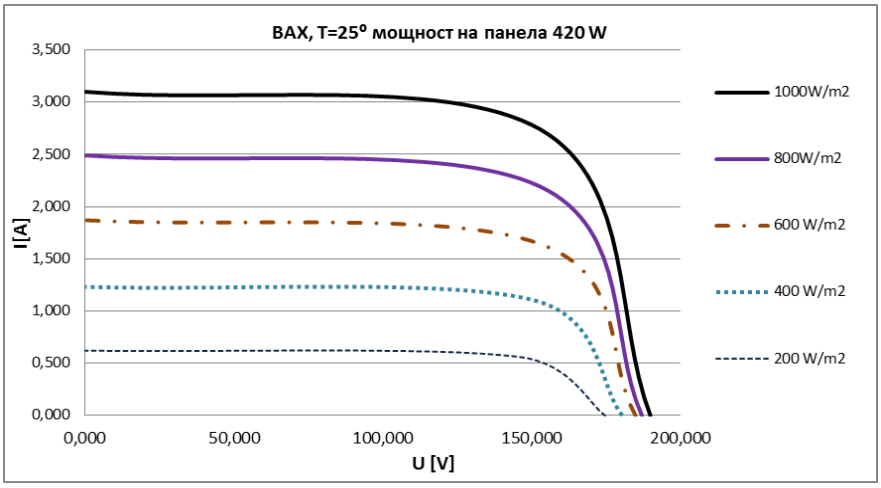
2.1. Постояннотокова страна

Използваните панели са тънкослойни фотоволтаична панели от аморфен силиций със средна мощност 390W и характеристики при стандартни тестови условия (STC), представени в табл.1. Площта на един пален е 5,61m^2 без носещата рамката. Волт-амперната характеристика на панела при тестови условия е представена на фиг.2.

Таблица 1

Характеристики на фотоволтаичния панел при стандартни тестови условия.

Модел на панела	Тънкослоен панел (Thin film a-Si)
Максимална пикова мощност	390 Wp
Voc (Ток при отворена верига)	189V
Isc (Ток на късо съединение)	3,1A
Vmpp (Максимална точка на напрежението)	152,0V
Impp (Максимална стойност на тока)	267A
Площ на панела m^2	5,61m^2



Фиг.2. *Волт-амперни характеристики на фотоволтаичния панел*

Четири последователно свързани панела образуват един стринг, а четири стринка се свързват в паралел към едно разпределително табло с DC/DC електронен преобразувател. Изходната мощност на едни електронен преобразувател е 6,24KWp, а четиринадесет DC/DC електронни преобразувателя свързани в паралел се присъединяват към единия вход на инвертор 20kW. Към всеки инвертор се свързват три групи по 14 електронни преобразувателя. Мощността на всяка група е 87,36 kWp. За преобразуване на DC мощността в AC са монтирани пет броя инвертори в една разпределителна кабина.

2.2. Променливотокова страна

Променливотоковата верига на централата започва от изходните клеми на инверторите. Напрежение от инверторите се отвежда до разпределително табло, които обединява инверторите. От главното табло напрежението се отвежда до трансформатор 0,4/20kV, 1x1600kVA монтиран в отделна килия на разпределителната кабина.

2.3. Система за измерване и управление

Системата SCADA събира данни от устройствата в централата и ги прави удобни за употреба в графичен формат и потребителски интерфейс. Системата събира данни за метеорологичните условия от пиранометъра за слънчевата радиация върху повърхността на панела и от термометри за температура на околната среда и на панела от петте контролни панела, разположени във фотоволтаичното поле към всеки инвертор. Освен това се събира информация и измервания от отделните DC/DC електронни преобразуватели и инверторите.

3. МОДЕЛИРАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНАТА СИСТЕМА

За моделиране на фотоволтаичната система е използван модела на Дюриш [5]. Той използва три независими параметри за изчисляване коефициента на полезно действие в точката на максимална мощност на фотоволтаичния панел в експлоатационни условия: слънчева радиация, температура на околната среда и маса на въздуха. Моделът на Дюриш е представен със следната формула:

$$\eta_{pv} = p\left[q\frac{G_a}{G_{ar}} + \left(\frac{G_a}{G_{ar}}\right)^m\right]\left[1 + r\frac{T_c}{T_{cr}} + s\frac{AM}{AM_o} + \left(\frac{AM}{AM_o}\right)^u\right] \quad (1)$$

където η_{pv} е кпд на фотоволтаичния модул, G_a е измерената слънчева радиация на повърхността на панела, $G_{ar} = 1000\text{W/m2}$ е слънчевата радиация при стандартни тестови условия (STC), T_c е измерената температура на повърхността на фотоволтаичния панел, T_{cr} =25ºC е температурата при стандартни тестови условия, AM е масата на въздуха, AM_o=1,5.

Параметрите p, q, m, r, s, u са емпирични параметри специфични за панела, определени при експлоатационни условия. За конкретния панел тези параметри са предварително изчислени [6] и имат следните стойности представени в табл.2:

Таблица 2

Емпирични параметри използвани в модела на Дюриш, изчислени за ФВ панел от аморфен силиций

	p	Q	m	r	S
Параметри за тънкослоен панел от a-Si	34,311	-0,697	0,624	-0054	-1,077

Предварителни проучвания са показали, че масата на въздуха може да бъде пренебрегната тогава уравнението придобива вида:

$$\eta_{pv} = p\left[q\frac{G_a}{G_{ar}} + \left(\frac{G_a}{G_{ar}}\right)^m\right] \times \left[1 + r\frac{T_c}{T_{cr}}\right] \quad (2)$$

С коефициента на полезно действие в точката на максимална мощност се изчислява изходящата мощност, а според стъпката на изчисление може да бъде пресметната и произведената енергия. За приложението на модела за големи мощности и с отчитане на влиянието на електронните преобразуватели е създадена методология, която изчислява изходната мощност на отделен стринг, постояннотоков електронен преобразувател, инвертор и на цялата централа. За изчисленията са използвани реално измерени стойности за слънчева радиация и темпе-

ратура на панел, а за сравнение – за изходна мощност на фотоволтаично поле, свързано към едни инвертор, както и мощността на фотоволтаичната централа, състояща се от пет инвертора.

Системата SCADA, инсталирана във фотоволтаичната централа, измерва и събира данни на интервал от една минута. В табл.3 е представена справка за средна, минимална и максимална отчетена стойност на слънчева радиация и температура на панела. Измерванията са взети за различни периоди през месеците юли, август и септември. Диапазона на измерените стойности за слънчева радиация е от 0 до 1100W/m^2 , а за температурата на панела – от 0 до 60°C.

Таблица 3

Измерени данни за слънчевата радиация и температура на панела за различните периоди

Дни	Слънчева радиация W/m^2		Температура на панела ^{0}C		
	Средна стойност	Максимална стойност	Минимална стойност	Средна стойност	Максимална стойност
Юли 15.07.2017	264,15	1091,7	14,308	29,513	57,241
Юли 25.07.2017	295,39	1030	16,81	32,69	58,57
Август 03.08.2017	298,76	996,7	17,60	35,472	62,011
Август 29.08.2017	307,43	1024,7	15,21	36,22	57,24
Септември 01.09.2016	314,97	1019,3	14,931	30,627	57,55
Септември 16.09.2016	288,00	981,9	18,642	33,286	59,672

Изходящата мощност P_{maxp} се изчислява по формулата:

$$P_{max,p} = \eta_{pv} G_a A \qquad (3)$$

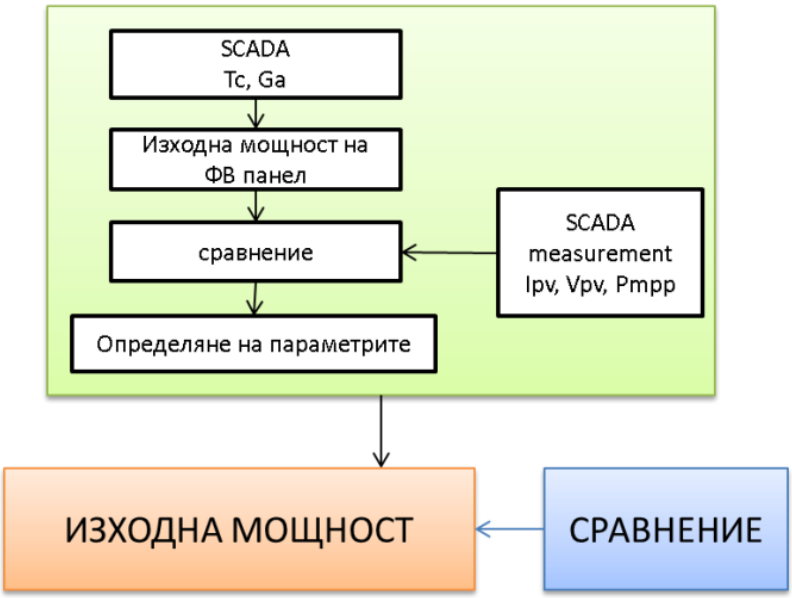
където A=5,61m^2 е площта на панела.

Фотоволтаичната централа се състои от множество панели, стрингове, електронни преобразуватели и пет инвертора свързани в паралел. За по-точна оценка на произведената енергия е необходимо да се вземе предвид коефициента на полезно действие на постояннотоковите електронни преобразуватели (92% по данни на производителя) и к.п.д. на инвертора, който може да бъде изчислен по следната формула:

$$\eta_1 = \frac{P_{AD}}{P_{DC}} = \frac{p_{ac}}{p_{ac}+(k_o+k_1 p_{ac}+k_2 p_{ac}^2)} \qquad (4)$$

където $p_{ac} = P_{AC}/P_1$, P_1 е номиналната мощност на инвертора, P_{AC} е изходната мощност на инвертора, която може да бъде изчислена от P_{DC}. Параметрите k_o, k_1, k_2 могат да бъдат взети от кривата на к.п.д. на инвертора предоставена от производителя или чрез експериментални измервания [7].

За изчисления и анализ на точността на прогнозата се използват моделът на Дюриш, събраните данни от системата SCADA при различни метеорологични условия и данните за получената електроенергия. На фиг.3 е представена блок схема на алгоритъма.



Фиг.3. *Блок схема на алгоритъма*.

Предимството на това проучване е, че широкият набор от информация за централата и измерванията в реални условия позволяват да се минимизира грешката на метода.

4. РЕЗУЛТАТИ

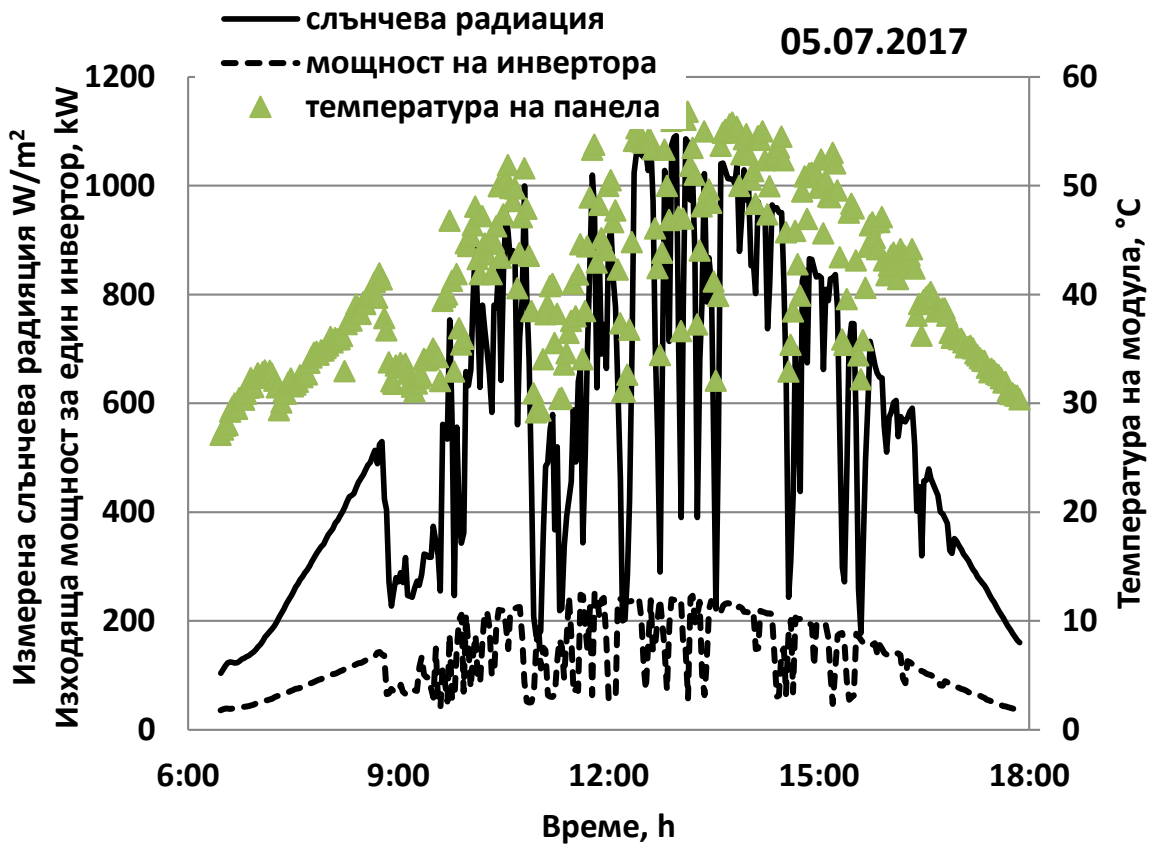
Изследванията са направени през различни периоди от годината. Събрани са данни от дни със слаба и висока радиация, облачни дни – за да се демонстрира ефекта на засенчването. На фиг.4 е представено изменението на изходната мощност на един инвертор, от слънчевата радиация и температурата на панела за два произволно избрани дни през месец август.

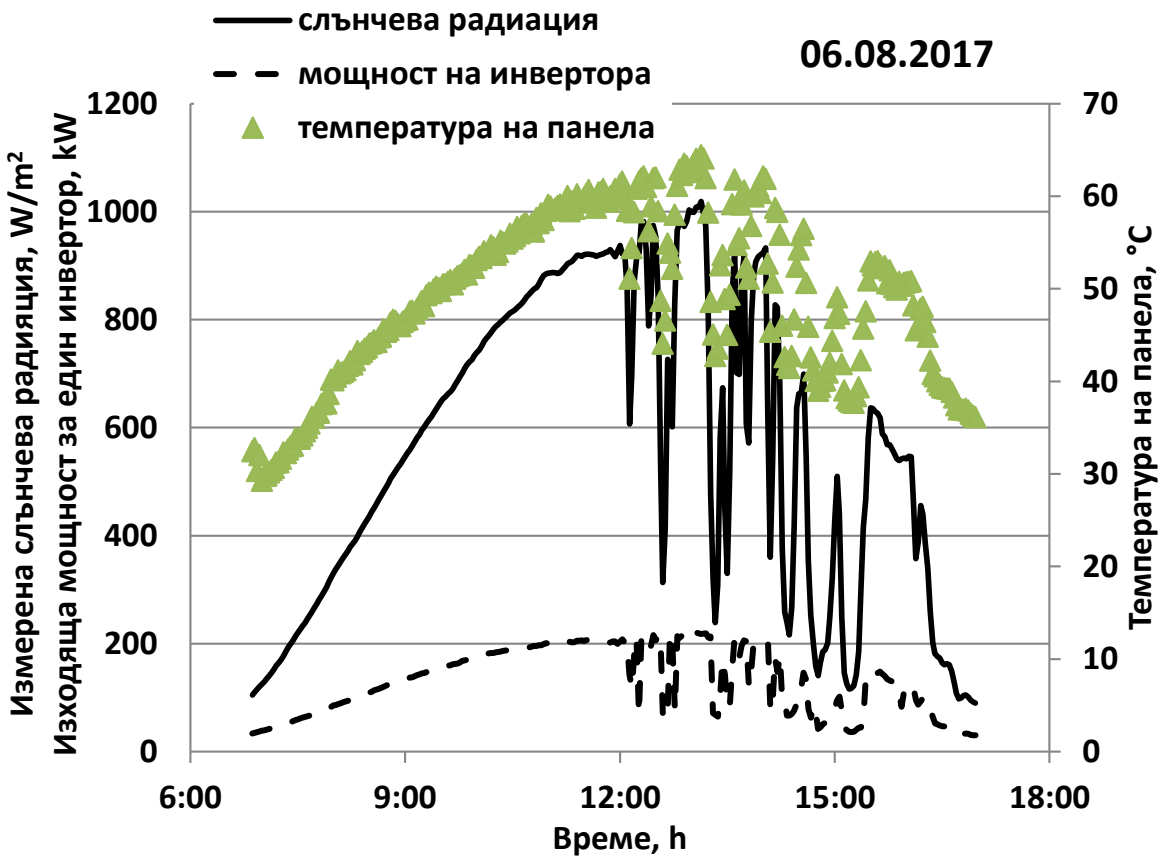
При първоначалното сравнение на изходна мощност фотоволтаичното поле, свързано към един инвертор, се отчита известна неточност и разлика в произведената и прогнозираната мощност. Резултатите са представен на фиг.5. При по-подробен анализ на работата на централата е отчетено, че отделни сегменти от централата са неизправни.

Взети са под внимание загубите на мощността, предизвикани от тези неизправности и прогнозираната мощност е преизчислена отново.

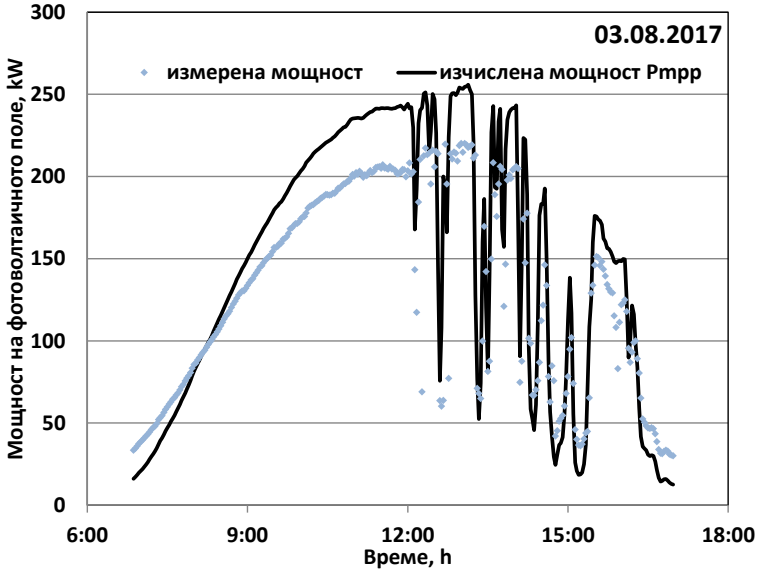
Резултатите са показани на фиг.6. Отляво е показано сравнение между измерената и прогнозираната постояннотокова мощност на фотоволтаичното поле, свързано към един инвертор, а отдясно – сравнение между измерената и изчислената изходна променливотокова мощност на петте инвертора инсталирани в кабината.

При оценката на произведената от фотоволтаичното поле мощност се наблюдава по-съществена разлика сутрин и привечер, докато при прогнозиране на променливотоковата мощност разликата е около обяд.

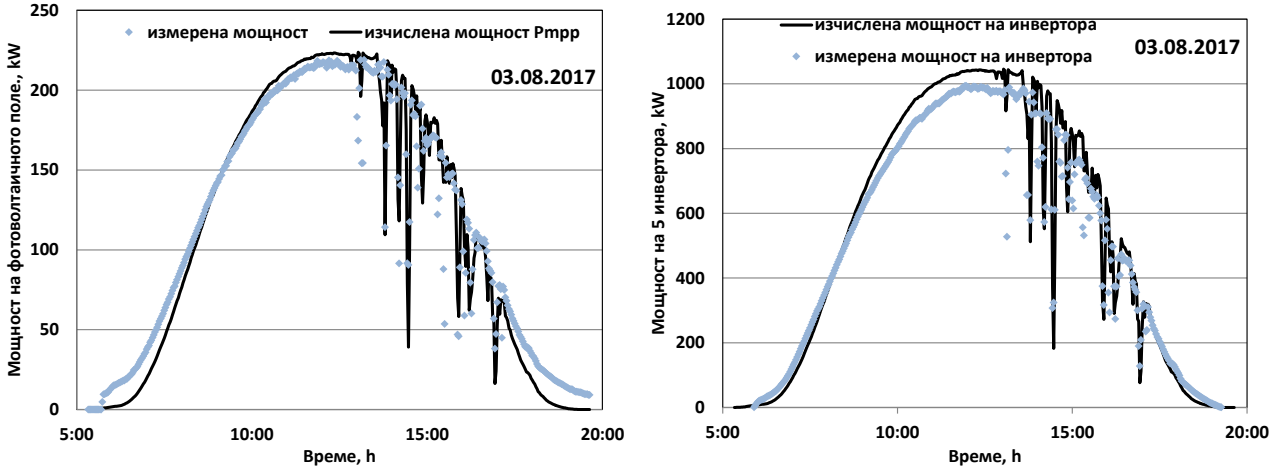




Фиг.4. *Изменение на изходната мощност на един инвертор, слънчевата радиация и температурата на панела*

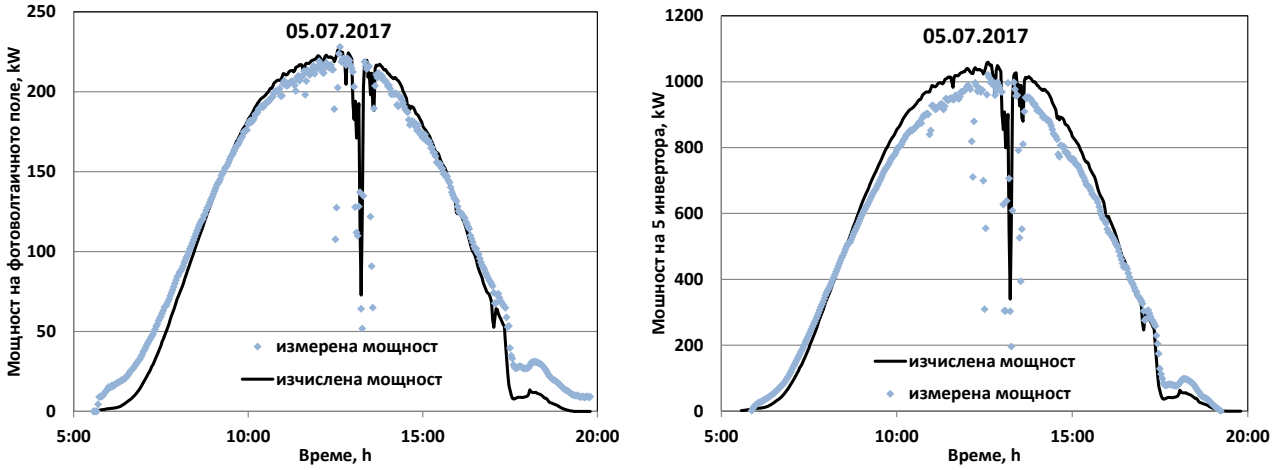


Фиг.5. *Първоначално сравнение на изчислена и измерена изходна мощност*

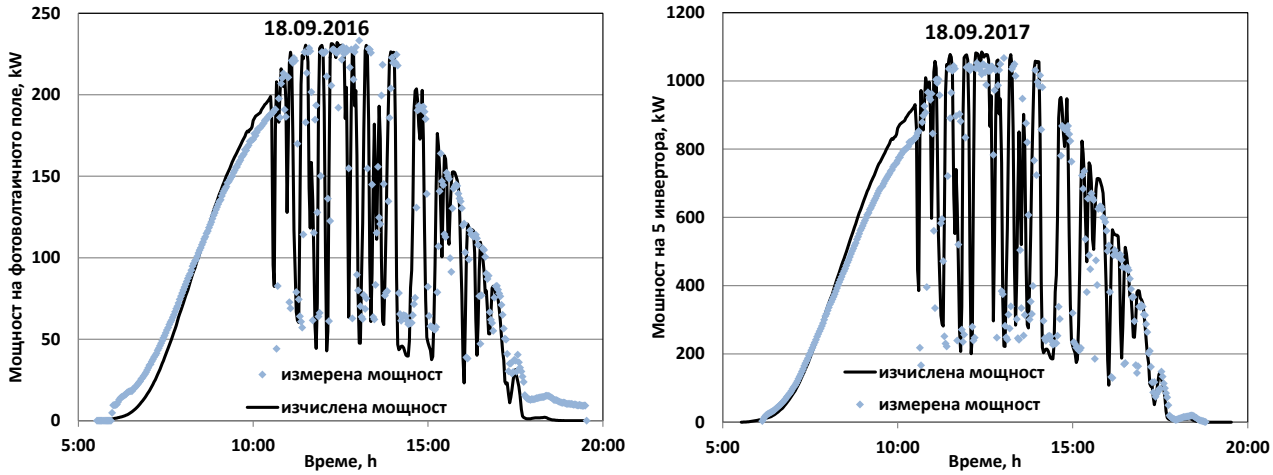


Фиг.6. *Сравнение на измерени и изчислени данни за изходната мощност фотоволтаичното поле на един инвертор (ляво) и изходната мощност на 5 инвертора за 03.08.2017.*

За да се провери верността на методиката за прогнозиране на изходящата мощност на фотоволтаичното поле и на централата, взимайки предвид отчетените неизправности, сигнализирани от SCADA системата, е направено сравнение на изчислените и реалните данни за мощността за различни дни. Резултати са представени на фиг.7 и фиг.8. Отново се наблюдават разлики сутрин и вечер при сравнението за фотоволтаичното поле, свързано към един инвертор, и около обед за променливотоковата мощност. Възможно обяснение на разминаването при постояннотоковата мощност е пренебрегването на влиянието на членовете в модела на Дюриш, свързани с масата на въздуха, чието влияние е най-голямо именно в тези периоди. Неточността при променливотоковата мощност може да се обясни с промяна на коефициента на полезно действие на постояннотоковия електронен преобразувател спрямо приетата стойност или неточност в модела на инвертора. Отчитането на факторите, влияещи върху точността на изчислената мощност, е трудоемка задача и не е необходимо, тъй като средно квадратичната грешка за тестваните дни е в рамките на 6-8%.



Фиг.7. *Сравнение на измерени и изчислени данни за изходната мощност фотоволтаичното поле на един инвертор (ляво) и изходната мощност на 5 инвертора за 05.07.2017.*



Фиг.8. *Сравнение на измерени и изчислени данни за изходната мощност фотоволтаичното поле на един инвертор (ляво) и изходната мощност на 5 инвертора за 18.09.2016.*

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статията представя прогнозирането на изходната мощност, произведена от централа с тънкослойни панели от аморфен силиций. За изчисляване на мощността е използван модела на Дюриш и предварителни изчислени емпирични параметри. Взети са под внимание загубите в постояннотоковите електронни преобразувателите и инверторите в централата. Освен това е осъществен анализ на регистрираните от SCADA системата грешки, чрез който се подобрява точността на модела. С моделите на Дюриш и на инвертора е изчислена изходящата мощност за дни с различни атмосферни условия. Получените резултати са сравнени с реално измерени стойности. Осъществено е сравнение на постояннотоковата мощност на фотоволтаичното поле, свързано към един инвертор, и на променливотоковата мощност на цялата централа. При постояннотоковата мощност се наблюдава разлика сутрин и вечер, докато при променливотоковата – около обяд. Неточността се дължи на някои опростявания, които не намаляват точността на модела и средно квадратичната грешка остава в рамките на 6-8%.

Предимството на използваната методика е, че не е необходимо предварително обучение и точността се запазва при различни атмосферни условия.

Бъдещи проучвания предвиждат тази методология да бъде сравнена с други известни методи за прогнозиране на производителността на фотоволатичната централа.

ЛИТЕРАТУРА

[1] W.Durisch, B. Bitnar, J.C.Mayor, H. Kiess, K.H. Lam, J. Close, ***"Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation" Solar energy Materials and Solar Cells"***, Vol.91,Issue 1, 5 January 2007,pp.79-84

[2] Martin L, Zarzalejo L, Polo J, Navarro A, Marchante R, Cony M. (2010) ***Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: application to solar thermal power plants energy production planning***. Solar Energy 84:1772e81

[3] Muhammad Qamar Raza, Mithulananthan Nadarajah, Chandima Ekanayake (2016) ***On recent advances in PV output power forecast***, Solar Energy 136 125–144.

[4] W.Durisch, O. Struzz,K. Robert, "Efficiency of selected photovoltaic modules under varying climatic conditions" in,: Renewable Energy, first ed., Elsevier, Amsterdam, 2000, pp.779-788

[5] J. Antonanzas N. Osorio, R. Escobar, R. Urraca, F.J. Martinez-de-Pison, F. Antonanzas-Torres (2016) Review of photovoltaic power forecasting. Solar Energy 136 78–111

[6] Z. Zarkov, L. Stoyanov, V. Milenov, H. Voynova, V. Lazarov (2016), ***"Modeling of PV Generators from Different technologies"*** – Case Study", 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC 2016), pp. 412-417

[7] J. Munoz, O. Perpinan (2016), ***A simple model for the prediction of yearly energy yields for gridconnected PV systems starting from monthly meteorological data***, Renewable Energy 97 (2016) 680e688

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите благодарят за финансовата подкрепа на договор ДУНК № 01/3 „Университетски научно-изследователски комплекс".

Автори: Людмил Стоянов, доц. д-р, кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *ludiss@tu-sofia.bg*; **Захари Зарков**, доц. д-р, кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; **Владимир Лазаров**, проф. д-р кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vl_lazarov@tu-sofia.bg*; **Ива Драгановска**, инж. докторант, кат. Електрически машини, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *iva.draganovska@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Пламен Ризов

ИЗПИТВАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ В ЛАБОРАТОРНИ УСЛОВИЯ

Людмил Стоянов, Захари Зарков, Владимир Лазаров, Валентин Миленов

Резюме: *Статията представя проучване на технологиите за изпитване на фотоволтаични панели в лабораторни условия – видовете слънчеви симулатори и анализатори за снемане на волт-амперни характеристики. Въз основа на проучването е реализиран нискобюджетен лабораторен стенд в Лаборатория Екология и възобновяеми източници на енергия (електрически аспекти) на катедра Електрически машини, Електротехнически факултет на ТУ-София. Със закупеното оборудване са осъществени изпитвания на соларни панели от пет различни технологии при различни стойности на слънчевата радиация и температура на панела. Резултатите показват предимствата и недостатъците на оборудването.*
Ключови думи: *изследване на фотоволтаични панели в лабораторни условия, слънчев симулатор, анализатор за снемане на волт-амперни характеристики.*

STUDY OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN LABORATORY CONDITIONS

Ludmil Stoyanov, Zahari Zarkov, Vladimir Lazarov, Valentin Milenov

Abstract: *The article presents a review of the technologies for testing of photovoltaic panels in laboratory conditions – the types of solar simulators and analysers for obtaining of volt-ampere characteristics. On the base of this study is realized a low cost experimental bench at the Laboratory Ecology and renewable energy sources (electrical aspects) of the Department of Electrical Machines, Faculty of Electrical Engineering at Technical University of Sofia. With the purchased equipment were carried out tests on PV panels of five different technologies with different values of the solar radiation and panel temperature. The results show the advantages and the disadvantages of the equipment.*
Keywords: *testing of photovoltaic panels in laboratory conditions, solar simulator, analyser for obtaining of volt-ampere characteristics.*

1. УВОД

Точното прогнозиране на произведената енергия от фотоволтаичните инсталации може да увеличи навлизането им в електрическите мрежи [1]. За целта са възможни различни подходи. Един от тях е моделирането на коефициента на полезно действие на фотоволтаичните панели. Повечето модели съдържат коефициенти, които зависят от технологията на панела [2], [3]. Определянето им

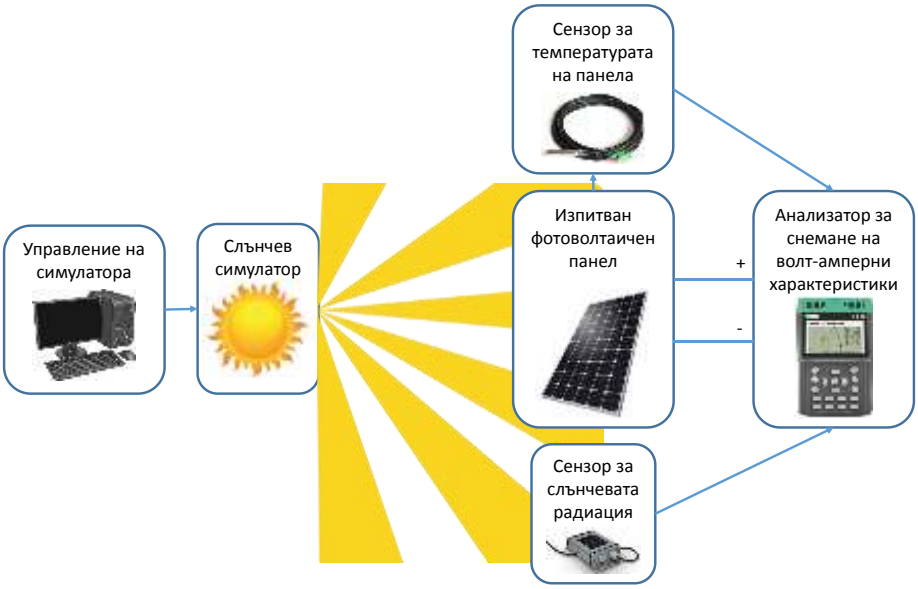
© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

изисква широк набор от данни при различни стойности на слънчевата радиация и температура на панела. Тези данни успешно могат да се събират в лабораторни условия чрез използване на изкуствен източник на светлина. Настоящата статия представя проучване на възможните технологии и създаване на нискобюджетен лабораторен стенд за изпитване на фотоволтаични панели в лабораторни условия.

2. НЕОБХОДИМО ОБОРУДВАНЕ ЗА ИЗПИТВАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ

Изпитването на фотоволтаични панели в лабораторни условия изисква наличието на определено оборудване. То трябва да отговаря на съответните стандарти и изисквания [4]. На фиг.1 е представена блокова схема на минималното лабораторно оборудване, необходимо за създаване на опитна постановка за изпитване на фотоволтаични панели. Най-важният елемент е симулаторът на слънце, който осветява изпитвания панел, към чиито изводи е включен анализатор за снемане на волт-амперни характеристики. От своя страна анализаторът се нуждае от сензори за слънчевата радиация и температурата на панела. Симулаторът и анализаторът са разгледани в повече детайли по-долу.



Фиг.1. *Блокова схема на стенд за изпитване на фотоволтаични панели в лабораторни условия.*

2.1. Слънчев симулатор

Както подсказва името му, слънчевият симулатор има за цел да пресъздаде слънчевото лъчение в лабораторни условия. Според приложението си симулаторите могат да се използват за изпитване на фотоволтаични панели или за изпитване на устойчивост на материалите на слънчево лъчение. Предвид насочеността на статията обект на интерес е първото приложение на слънчевия симулатор.

За симулиране на слънчевото греене се използват различни осветителни тела, чието захранване се управлява ръчно или автоматизирано, така че да се получи

желаната стойност на слънчевата радиация. Основно изискване към тези осветителни тела е да излъчват светлина с дължина на вълната, отговаряща на спектъра на слънчевата светлина [4]. Най-често използваните технологии са [5]:

- ксенонови лампи;
- метал-халогенни лампи;
- халогенни лампи;
- светодиодни (LED) лампи.

Първият тип осветителни тела се използва в различните симулатори, тъй като дава възможност за постигане на големи стойности на слънчевата радиация и има много близък спектър на светлината до този на Слънцето. Основен техен недостатък е наличието на множество остри пикове в спектъра, проявяващи се главно при дължина на вълната от 800 до 1000nm. Метал-халогенните лампи се използват по-рядко, но те имат добро съвпадение на спектъра на светлината с този на слънчевата светлина. Подобно е положението и с халогенните лампи, които обаче се характеризират с по-ниска цветна температура, което допълнително намалява тяхното приложение. Светодиодната технология все още не е получила масово използване. Като нейно основно предимство се изтъква ниската енергийна консумация на този тип осветителни тела.

Освен по използваните осветителни тела е възможно симулаторите да се разделят според начина на огряване на изследвания обект. По този критерий симулаторите за изследване на фотоволтаични панели биват [4]:

- с продължително огряване;
- с импулсно огряване;
- с поредица от импулсни огрявания.

Първият тип симулатори е класическо решение, заимствано от осветлението, използвано в човешкия живот. Този подход се използва при осветяване с интензитет до няколко хиляди W/m^2, като е възможна комбинацията на различни осветителни тела с цел получаване на по-реалистичен спектър на излъчваната светлина. Като предимства могат да се изтъкнат лесното техническо осъществяване и липсата на преходен процес на светлината непосредствено преди изпитването. Симулаторите с продължително огряване имат и някои недостатъци, сред които са консумацията на много енергия и значително загряване на изследвания обект.

Импулсно огряване се използва при необходимост от огряване с по-голям интензитет отколкото при първия тип. Други предимства са ниската енергийна консумация и липсата на загряване на изпитвания панел. Като недостатъци могат да се изтъкнат по-сложната техническа реализация поради опасността от повреда на осветителните тела при чести изпитания и наличието на преходен процес по време на краткия импулс, което поставя допълнителни изисквания към измервателната апаратура.

Третият тип симулатори представлява комбинация от първите два. Източникът на светлина свети постоянно, но пред него има устройство, което позволява огряването само в определени кратки интервали от време. При този подход се избягва преходният процес на светлината и свързаните с това сложни технически

решения, както и загряването на изпитвания обект. За сметка на това енергийната консумация е сходна с тази на първия тип симулатори.

Снемането на волт-амперната характеристика на изпитвания панел е различно според вида на слънчевия симулатор. При първите два типа симулатори цялата характеристика се снема наведнъж, докато при симулаторите с поредица от импулсни огрявания при всяко огряване се снема точка от кривата и крайната волт-амперна характеристика се получава след поредицата от импулсни огрявания.

2.2. Анализатор за снемане на волт-амперни характеристики

Анализаторът за снемане на волт-амперни характеристики променя тока на панела от нула (празен ход) до максимално възможната му стойност (късо съединение). За целта се използват различни техники. Основните от тях са [6]:

- с променливо активно съпротивление;
- с кондензаторна батерия;
- с електронен товар;
- с биполярен усилвател;
- с четири-квадрантно захранване;
- с постояннотоков преобразувател.

Тези техники са разгледани подробно в [6], а тук са представени само основни техни характеристики.

Първият подход е изключително прост, но е приложим при панели с по-малка мощност поради високата цена на резисторите с голяма мощност. Освен това автоматизирането му е по-трудно. По-качествени характеристики могат да се получат при използване на кондензаторна батерия. Това се постига с усложняване на схемата и необходимостта от автоматично управления на ключовете в нея. Третата техника е приложима за панели с до средна мощност, тъй като разсейването на големи мощности от електронния товар е затруднено. Подобно ограничение съществува и при използването на биполярен усилвател. Петият подход е сравнително скъп, което ограничава приложението му, но с него може да се получи волт-амперна характеристика в три квадранта, което позволява подобрата диагностика на изпитвания панел. С използването на постояннотоков преобразувател може значително да се увеличи обхвата на мощностите на изпитваните панели и/или системи. В практиката най-широко разпространение са получили използването на кондензаторна батерия и на постояннотоков преобразувател.

Промяната на тока на панела от празен ход до късо съединение не е достатъчна за изследването на панелите. От съществено значение са и условията, при които е снета волт-амперната характеристика. Ето защо, независимо от използваната техника за промяна на тока, анализаторите за снемане на волт-амперни характеристики разполагат със сензори за отчитане на слънчевата радиация и температурата на панела. Тези сензори могат да бъдат реализирани по различни начини и няма да бъдат подробно разглеждани тук.

3. ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД ЗА ИЗПИТВАНЕ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ В КАТЕДРА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ КЪМ ТУ-СОФИЯ

В Лабораторията по Екология и възобновяеми източници на енергия (електрически аспекти) на катедра Електрически машини към ТУ-София е оборудван стенд за изпитване на фотоволтаични панели в лабораторни условия, състоящ се от слънчев симулатор и анализатор на фотоволтаични инсталации. Подбраните елементи са нискобюджетни, като е търсен компромис между задоволително качество и ниска цена.

Слънчевият симулатор е доставен от френска фирма след адаптация и реализация по задание на изследователския екип, работещ по проект ДУНК 01/3. Симулаторът е с продължително огряване, осъществено от 32 халогенни лампи. Управлението на силата на слънчевата радиация е ръчно и се осъществява чрез потенциометър и тиристорен регулатор. Един от недостатъците на технологията с продължително огряване, а именно нежеланото загряване на изпитвания обект, е смекчен с наличието на два вентилатора в долния край на равнината на изпитвания панел. По този начин фотоволтаичните модули могат да бъдат изследвани при различни температури. Фиг.2 представя 3D модел и снимка на реализирания симулатор на слънце.

Фиг.2. *3D модел и снимка на реализирания симулатор на слънце.*

Анализаторът, избран за оборудване на стенда за изпитване на фотоволтаични панели в лабораторни условия, е фабричен и позволява снемането на волт-амперни характеристики на инсталации с мощност до 12kW. Неговите основни характеристики са обобщени в табл.1. Анализаторът с прилежащите му сонди и сензори е показан на фиг.3. Както се вижда от фигурата, уредът разполага с дисплей за визуализиране на получените резултати. Той илюстрира кривите на волт-амперната характеристика и характеристиката на мощността, както и основни параметри на изпитваната фотоволтаична инсталация – напрежение на празен ход (V_{oc}), ток на късо съединение (I_{sc}), ток и напрежение при максимална мощност, слънчева радиация, температура на панела и др.

Таблица 1.

Характеристики на анализатора на фотоволтаични инсталации VA1011.

Параметър	Обхват	Резолюция	Точност
Постоянно напрежение	1~1000V	0.01V/0.1V/1V	±1%±(1% от V_{oc}±0.1V)
Постоянен ток	0.1~12A	1mA/10mA	±1%±(1% от I_{sc}±9mA)
Слънчева радиация	0~2000W/m^2	1W/m^2	±3%±20dgts
Температура	-20~85ºC	0.1ºC	±1%±1ºC

Фиг.3. *Анализатор за снемане на волт-амперни характеристики VA1011.*

С реализирания стенд са изпитвани фотоволтаични модули от пет различни технологии – монокристален (mSi), поликристален (pSi) и аморфен (aSi) силиций, медно-индиев диселенид (CIS) и кадмиев телурид (CdTe).

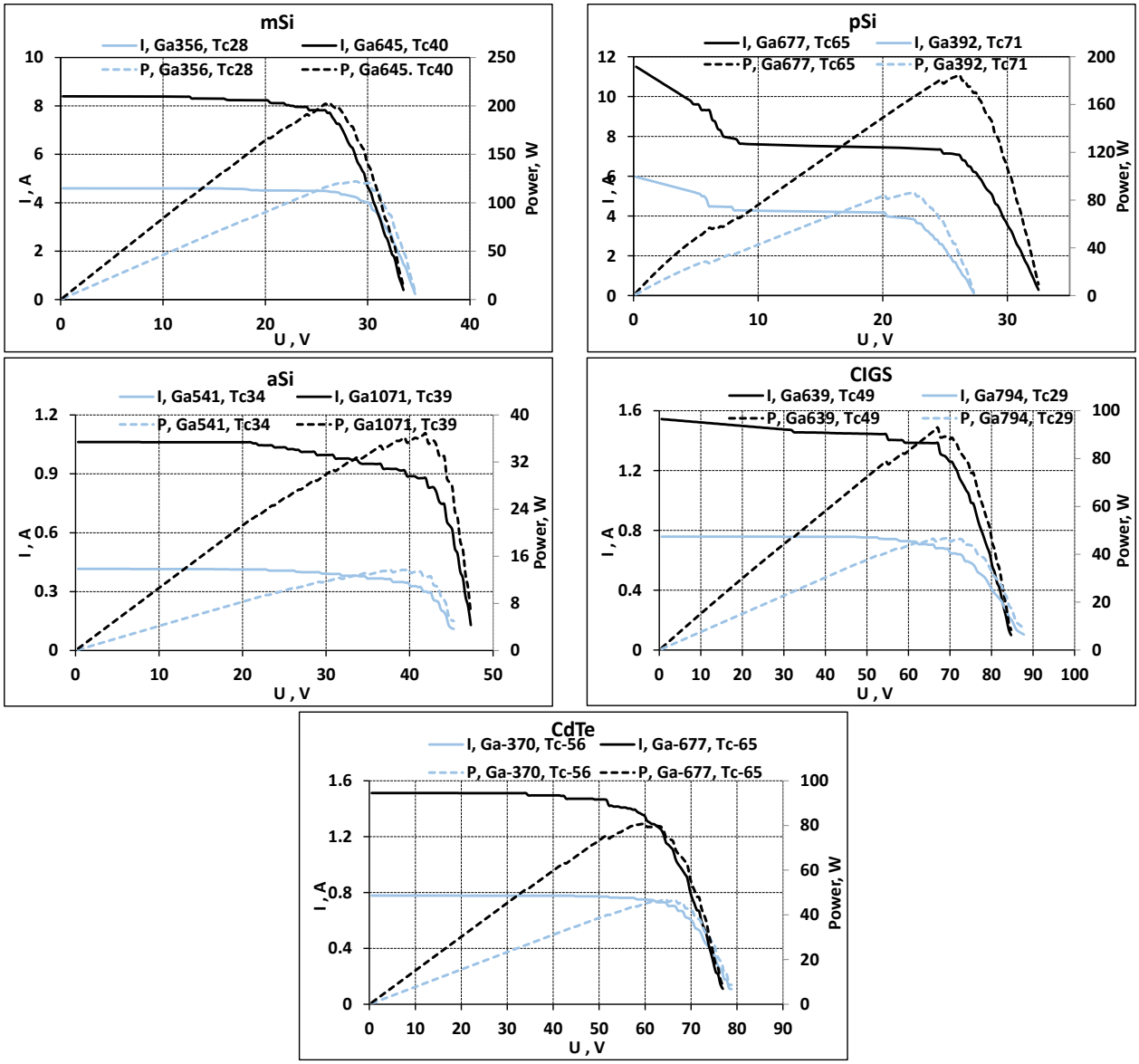
На фиг.4 са показани резултати, получени при различни стойности на слънчевата радиация G_a и температура на панелите T_c.

При тънкослойните технологии (aSi, CIS и CdTe) и монокристалния силиций получените характеристики са с леки назъбвания, но следват качествено и количествено теоретичната форма.

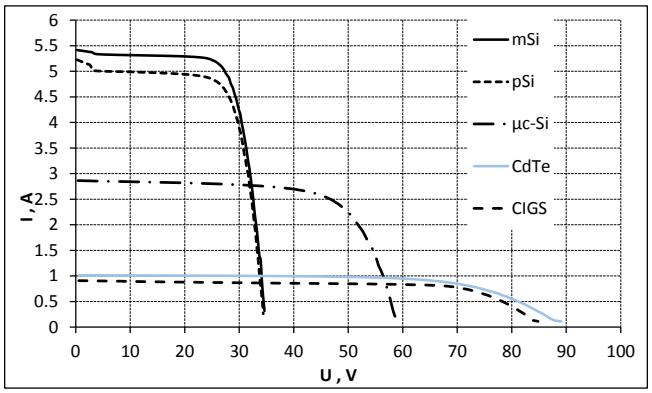
В характеристиките снети при поликристален силиций се наблюдава рязка промяна на тока при ниски напрежения. Получените графики в лабораторни условия показват несъвършенство в реализирания стенд. С цел идентификация на проблема петте панела са изследвани с анализатора за снемане на волт-амперни характеристики при реални условия. Част от получените характеристики за различните технологии са представени на фиг.5.

Тези резултати показват, че неравномерните характеристики при лабораторни условия се дължат на слънчевия симулатор, чиято светлина явно е нехомогенна и предизвиква ефекти, сходни на тези, които се наблюдават при засенчване на панелите.

Идентифицираният проблем може да бъде отстранен чрез поставяне на подходящ дифузор на светлина между халогенните лампи и изследвания панел. По този начин светлината, попадаща върху модула, ще е по-хомогенна и вероятно няма да се наблюдават смущения в получените волт-ампрени характеристики.



Фиг.4. *Волт-амперни характеристики на петте изследвани технологии при различни радиации в лабораторни условия (G_a в W/m^2 и T_c в ^oC).*



Фиг.5. *Волт-амперни характеристики на петте технологии при реални условия.*

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статията представя преглед на реализацията на нискобюджетен стенд за изпитване на фотоволтаични панели в лабораторни устройства. За целта са разгле-

дани различните технологии на пазара. За слънчев симулатор е избран продукт с халогенни осветителни тела и продължително огряване. От различните анализатори за снемане на волт-амперни характеристики е избрана технология с кондензаторна батерия. Със закупената апаратура е реализиран лабораторен стенд в катедра Електрически машини на Технически университет-София. Със стенда са изпитани фотоволтаични панели от пет различни технологии в лабораторни условия. Снети са характеристики при различни стойности на слънчевата радиация и температура на панелите. Получените резултати качествено и количествено съвпадат с теоретичните характеристики, но се наблюдава стъпаловидно изменение в кривите наподобяващо наличието на засенчване. С цел идентификация на причината за неравностите панелите са изпитани при реални условия, като отново е използван анализаторът за снемане на волт-амперни характеристики. Получените криви са гладки, което води до заключението, че проблемът вероятно се дължи на неравномерност в осветяването. Този недостатък предстои да бъде отстранен.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Dolara A., S. Leva, G. Manzolini (2015), ***Comparison of different physical models for PV power output prediction***, Solar Energy vol. 119, pp. 83-99.

[2] Dobos A.P. (2012), ***An improved coefficient calculator for the California Energy Commission 6 parameter photovoltaic module model***, Journal of Solar Energy Engineering vol. 134, pp. 021011-1 - 021011-6.

[3] Celik A.N., N. Acikgoz (2007), ***Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models***, Applied Energy vol. 84, pp. 1–15

[4] International Electrotechnical Commission (2007), ***Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements***, International standard IEC 60904-9

[5] Mohan M.V.A, J. Pavithran, K.L. Osten, Jinumon A, C. P. Mrinalini (2014), ***LED based solar simulator***, available on:
https://www.ieee.org/education_careers/education/standards/
led_based_solar_simulatormohan_final_paper.pdf [accessed 23.07.17].

[6] Durán E., M. Piliougine, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galán, J.M. Andújar (2008), ***Different methods to obtain the i-v curve of pv modules: a review***, Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите благодарят за финансовата подкрепа на договор ДУНК № 01/3 „Университетски научно-изследователски комплекс“.

Автори: Людмил Стоянов, доц. д-р, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *ludiss@tu-sofia.bg*; **Захари Зарков**, доц. д-р, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; **Владимир Лазаров**, проф. д-р, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *vl_lazarov@tu-sofia.bg*; **Валентин Миленов**, инж Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *valmil@tu-sofia.bg*.

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Радослав Спасов

ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТ НА ФОТОВОЛТАИЧНИ СИСТЕМИ

Ива Драгановска

Резюме: *Този доклад разглежда познатите методи за прогнозиране на изходната мощност на фотоволтаични системи. Точната прогноза на изходната мощност е от съществено значение за независимите производители на електроенергия, за мениджърите на фотоволтаични централи и операторите на разпределителните мрежи. Постигането ѝ е сложна задача поради влиянието на множество фактори върху произведената енергия. Статията прави обзор на методите, фокусирайки се върху предимствата и недостатъците им и времевия интервал на приложение.*
Ключови думи: *прогнозиране на изходната мощност та фотоволтаични системи, прогнозиране, изходна мощност, слънчева енергия*

PRODUCTION OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

Iva Draganovska

Abstract: *The present review investigates different methods for photovoltaic power prediction. The precisely forecast of photovoltaic power output is essential for independent power producer, photovoltaic power plant managers and distribution system operators. It's achieving is a complex task because of the influence of many factors on the produced energy. The article reviews the methods, focusing on their advantages and disadvantages and the time interval of application.*
Keywords*: PV power prediction, forecast, power output, solar energy*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Делът на инсталираните фотоволтаични мощности бързо нараства като в края на 2015 в световен мащаб достига 229,3G W [1]. Цените на фотоволтаичнте технологии намаляват драстично, което допълнително подпомага тяхното бързо развитие и непрекъснато нарастване на инсталираните мощности. Това поставя различни проблеми при внедряването на новите инсталирани мощности в електроразпределителни мрежи, което от своя страна изисква по-точно прогнозиране на наличния потенциал и произведена електроенергия [2].

Факторите, влияещи на производителността на една фотоволтаична система са: слънчевата радиация, температурата на околната среда, скорост на вятъра, облачност, влажност и други атмосферни условия. Те зависят от географското положение на инсталацията, наклон и азимут на монтаж на фотоволтаичните модули [3].

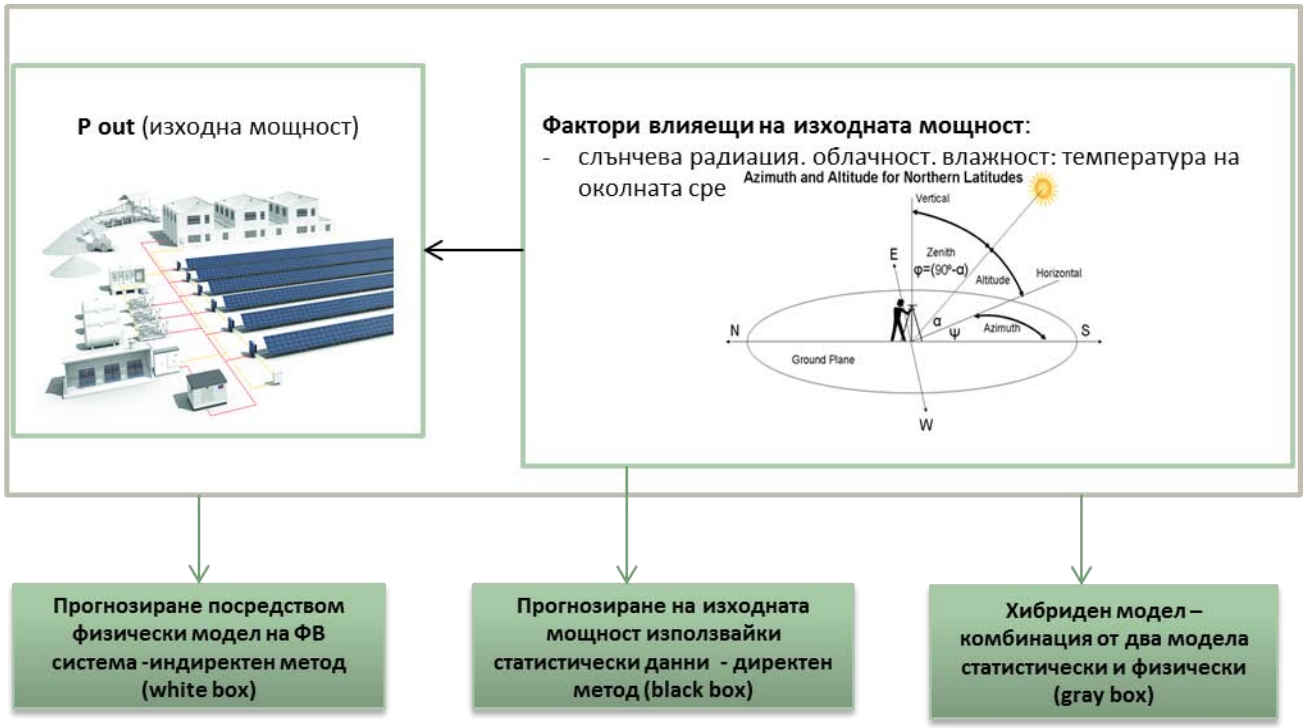
© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Множество проучвания са насочени към развитието на различни методи за прогнозиране. Два основни метода са се наложили през последните години: индиректен и директен. Индиректния метод изисква прогноза за слънчевата радиация, след което използвайки математически модели и производителността на дадена фотоволтаична система прогнозира изходната мощност. Втория метод е директен той изчислява изходната мощност на централата използвайки съществуващи данни . И двата метода използват подобни техники [4,5].

2. МЕТОДИ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ

Необходимостта от по-точно прогнозиране на изходната мощност е довела до разработването на различни методи за прогнозиране през годините. В литературата най-често методите за прогнозиране могат да бъдат разделени и се класифицират на: физически (може да бъде намерен в литературата като метода "white box'' – бяла кутия), статистически и хибриден (може да бъде намерен в литературата като "grey box'' – сива кутия) [6,7]. На фиг.1 са представени основните зависимости при прогнозирането и съответните методологии.



Фиг.1. *Схема на моделите за прогнозиране*

2.1. Физически модел

Физическите модели могат да бъдат много прости, базирайки само на прогноза на слънчевата радиация и влиянието ѝ върху фотоволтаичната клетка или по-сложни, които включват допълнителни параметри. Преобразователният процес зависи от слънчевата радиация, засенчването, стареенето на фотоволтаичната клетка, температурата на клетката, ъгъла на слънчевата радиация [8]. Най-често информацията предоставена от производителните на фотоволтаични клетки не е достатъчна за точно прогнозиране. Данните предоставени от производителите на фотоволтаични панели обикновено съдържат основна информация, като ВАХ

при стандартни тестови условия – слънчева радиация 1000 W/m^2 и температура на модула 25^0 C.

Както вече беше посочено, един от най-важните фактори, влияещи на изходната мощност е слънчевата радиация. Тя обаче зависи от присъствието на облаци, което затруднява прогнозирането. При отсъствие на облаци, прогнозирането на слънчева радиация може да бъде много точно и позволява да се оцени изходната мощност при постоянни условия.

Съществуват няколко основни начина за прогнозиране на слънчевата радиация, но в този отчет те няма да се разглеждат подробно. Най широко разпространени методи за прогнозиране са:

- Сателитни изображения;
- Статистически данни;
- Цифрови прогнози на времето (Numerical Weather Predictions NWP).

Данните за прогнозирането на температурата на околната среда и скоростта на вятъра най-често идват от цифровите прогнози за време. Редица автори разглеждат методите за прогнозиране на слънчевата радиация [9,10,11].

На база прогнозата за слънчевата радиация, производителността на една фотоволтаична система може да бъде изчислена посредством подходяща еквивалентна схема. Моделът на една фотоволтаична клетка може да бъде използван за представянето на един модул, стринг от множество модули, фотоволтаичен масив, съставен от множество стрингове свързани в паралел или на цяла централа.

В литературата се разглеждат множество математически модели за описание на фотоволтаичната клетка: модели с три, четири, пет и шест параметъра, които могат да бъдат класифицирани въз основа на броя на използваните параметри. Съществуват модели с четири параметъра, описани от Люк и Хегедус и Нелсон) [12], пет параметъра на Селик, 2011, Де Сотто 2006 [13,14], шест параметрични модела представени Добос 2011 [15].

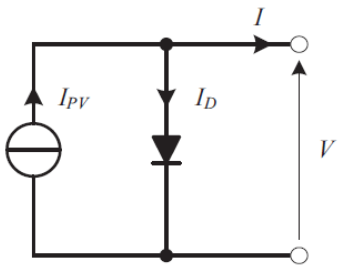
2.1.1. Еквивалентна схема на ФВ модел

Най-простият модел на еквивалентна схема на клетка се характеризира с три параметъра (фиг.2).

Волт-амперната характеристика за тази фотоволтаична клетка е представена със следното уравнение:

$$I = I_{pv} - I_D = I_{pv} - I_o.(e^{\frac{V}{n.V_t}} - 1) \quad (1)$$

Където I_{pv} кога генериран под въздействието на слънчевата светлина, I_D токът през pn прехода, I_0 – обратния ток на насищане, n- идеалния диодния фактор, V е напрежението, V_t термично напрежение.

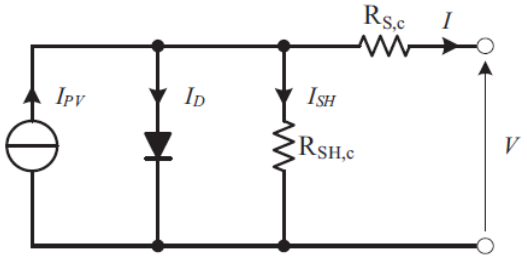


Фиг.2. *Еквивалентна схема на фотоволтаична клетка с три параметъра*

Друг доста по сложен модел е моделът с пет параметъра (фиг.3) [16]. Еквивалентната схема е представена, чрез следните пет параметъра: две съпротивления $R_{s,c}$ и $R_{SH,c}$ и други три параметри I_{pv}, I_0 и n, представени със следното уравнение:

$$I = I_l - I_o\left(e^{\frac{V + R_{s,c}.1}{n.V_t}} - 1\right) - \frac{V + IR_s.I}{R_{sh}} \tag{2}$$

Където $R_{s,c}$ серийното съпротивление на клетката, $R_{SH,c}$ е паралелното съпротивление на клетката.



Фиг.3. *Еквивалентна схема на фотоволтаична клетка с пет параметъра*

Моделът с шест параметъра включва източник на ток, който представлява тока, генериран от фотоволтаичния ефект, диод, който моделира p-n връзката както и съпротивления свързани в паралел и последователно. Уравнението, които описва еквивалентната схема е:

$$I = I_l - I_o\left(e^{\left[\frac{V+IR_{s,m}}{n.N_s.V_t}\right]} - 1\right) - \frac{V + IR_{s,m}.I}{R_{sh,m}} \tag{3}$$

където Ns е броят на фотоволтаичните клетки, свързани в серия, $R_{s,m}$ и $R_{sh,m}$ са шунтовото и модулно съпротивление на клетка.

Това уравнение може да бъде използвано за изчисляване на трите характеризиращи точки на ВАХ (волт-амперната характеристика) V_{oc}, I_{sc}, I_{MPP} и V_{MPP}.

Изходната мощност на модела ще бъде представена чрез уравнението:

$$P_p = P_{model}.(1 - decay_{year}.years) \tag{4}$$

където P_p е прогнозираната мощност, P_{model} е мощността получена от модела за прогнозиране, $declay_{year}$ е информацията за деградацията на панела предоставено от производителя [17].

2.1.2. Емпирични модели на фотоволтаичен генератор

Съществуват модели, който изчисляват мощността на фотоволтаичния панел при експлоатационни условия. Един от тези модели е този на Дюриш [18]. Това е полу-емпиричен модел, който изчислява ефективността на фотоволтаичния модул при различни климатични условия.

Получената мощност и к.п.д. са свързани чрез уравнението:

$$P_{max,p} = \eta_{pv} G_a A \tag{5}$$

където η_{pv} к.п.д. на модула, G_a – измерената слънчева радиация на повърхността на панела, а A площта на панела.

Моделът на Дюриш е представен чрез следната формула:

$$\eta_{pv} = p\left[q\frac{G_a}{G_{ar}} + \left(\frac{G_a}{G_{ar}}\right)^m\right]\left[1 + r\frac{T_c}{T_{cr}} + s\frac{AM}{AM_o} + \left(\frac{AM}{AM_o}\right)^u\right] \tag{6}$$

където, G_{ar} е глобалната слънчева радиация при стандартни тестови условия STC (G_{ar}=1000W/m^2); T_c – измерената температура, T_{cr} =25^{0}C температурата при STC и AM – масата на въздуха, AM_o=1,5. Параметрите p, q, m, r, са характерни за различните модели панели.

Друг модел е този на Моруз и Перпинян [19]. Максималната мощност на фотоволтаичния панел си изчислява по формулата:

$$P_{DC} = P^* \frac{G}{G^*}\left[a + b\frac{G}{G^*} + xln\frac{G}{G^*}\right] \tag{7}$$

ъдето P* е максималната мощност на фотоволтаичния панел при стандартни тестови условия, P* може да бъде определен или при тестови условия дадени от производителя или при експериментални измервания [20]. Коефицентите a и b са емпирични параметри, подходящи за съответната технология на производство на фотоволтаичния модул [21].

Този модел също може да изчислява изходната мощност на отделни панели, стрингове, масиви или цяла централа.

Ефективността на едни инвертор може да бъде изчислена с помощта на следната формула:

$$\eta_1 = \frac{P_{AD}}{P_{DC}} = \frac{p_{ac}}{p_{ac} + (k_o + k_1 p_{ac} + k_2 p_{ac}^2} \tag{8}$$

където $p_{ac} = P_{AC}/P_1$, P_1 е номиналната мощност на инвертора P_{AC} е изходната мощност на инвертора, която може да бъде изчислена от P_{DC} и параметрите k_o, k_1, k_2 могат да бъдат взети от кривата на к.п.д. на инвертора предоставени от производителя или чрез експериментални измервания.

Като обобщение може да се потвърди, че физическите модели предоставят ефективен начин за изчисляване на изходната мощност на фотоволтаични модули, стрингове или цели централи. Те са подходящи за изработване на прогнози, при които не е необходимо централата да е работила известно време, но изискват допълнителна информация за централата. Важно е да се знае моделът на панела, съответната технология на производство, както и да има достатъчно данни от производителя на съответните технология.

2.2. Статистически модели

Статистическите модели не изискват никаква информация за системата. Това е подход, основан на база данни за производителността на фотоволтаичната система от предишен период, с чиято помощ да се прогнозира бъдещото поведение на централата. Поради тази причина е необходимо да има достатъчно добра база данни за слънчева радиация и изходна мощност. Предимството на този метод е, че може да се коригира систематична грешка, измервайки изходната мощност. Статистическите модели имат доказана по-голяма ефективност при моделиране на фотоволтаичните системи [22].

2.2.1. Регресивни модели

Регресивните модели са набор от техники, които приблизително изчисляват изходна мощност на централата, която пряко зависи от слънчевата светлина.

В зависимост от начина, по който се обработват зависимите променливи, регресивните модели могат да бъдат класифицирани като линейни, нелинейни, подвижни и неподвижни.

Стационарните модели се колебаят около дадена средна стойност, докато нестационарните нямат такава средна стойност.

2.2.1.1.Линейни статични модели (стационарни модели)

Този тип модели се делят на:

Авторегресивните модели (Auto–Regressive AR) – те моделират като комбинация от закъснели стойности;

Авторегресивни модели с плъзгащи се средни стойности (Auto_regressive Moving Average- ARMA) [23], които взимат под внимание изостаналите минали стойности и грешки;

Авторегресивни модели с плъзгащи се средни стойности и екзогенни променливи–Auto-Regressive Moving Averages whit eXogenous variables (ARMAX) [24], които въвеждат външни променливи във времевия анализ.

2.2.1.2. Линейни нестатични модели

Към този тип модели спада Авторегресивен модел с интегрирани средни стойности – Auto-regressive Integrated Moving Averages (ARIMA) [25,26] който обе-

динява два метода Авторегресивен и този с променливи средни стойности.

2.2.2. Методи с изкуствен интелект

Методите с изкуствен интелект могат са се класифицират по следния начин:

- Изкуствени невронни мрежи (ANN's) това е едни от най-използваните методи при прогнозиране производителността на ФВ системи.
- k-най близките съседи (k-Nearest Neighbors k-NN) – това е най-простата методология за машинно обучение, базирана на метода на разпознаване на шаблон, който сравнява настоящия статус с обучени проби. [25]
- Метод на опорните вектори Support Vector machines SVM – този метод първо е бил въведен от Варнир и Лернър през 1963 [27]
- Метод на случайни "гори" – Random Forest RF – първоначално е бил разработен от Брейман през 2001 [28]

2.3. Хибридни модели

Тези модели обикновено използват комбинация от две, три или повече методологии. Могат да бъдат комбинация от физически и статистически модел, или комбинация от няколко статистически. Много автори разработват модели, комбинация от няколко метода като Баузердум през 2013, Ремзами и Орее през 2016 или Хосяйн през 2013 [29,30,31].

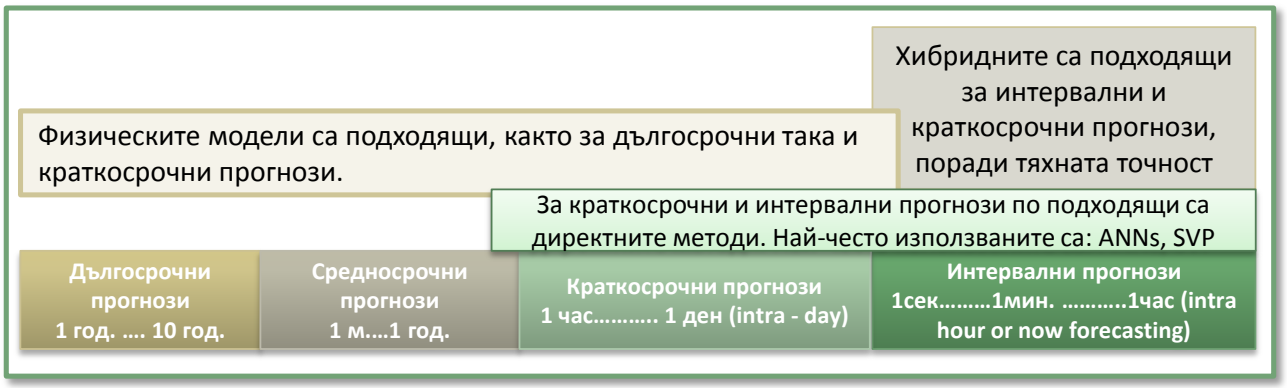
3. ИНТЕРВАЛИ НА ПРОГНОЗИРАНЕ

Точната прогноза на изходната мощност ще помогне на независимите производители на електроенергия за по-добро планиране на произведената електроенергията, както и за интелигентното внедряване на новите фотоволтаични системи в съществуващите мрежи [32,33]. На базата на времевия интервал, прогнозите могат да бъдат краткосрочни, средносрочни и дългосрочни и интервални.

- Дългосрочни прогнози – от една до 10 години
- Средносрочни прогнози от един месец до 1 година;
- Краткосрочни прогнози от един или няколко часа до 1 ден напред;
- Интервални прогнози – обикновено са от една секунда до няколко минути или час.

От съществено значене за мрежовите оператори са краткосрочните прогнози, най-често в интервал от 15 минути до 60 минути. Краткосрочната прогноза може да бъде полезна за автоматичното регулиране на фотоволтаичните системи, по-доброто диспечиране, баланс на товара и оперативното управление на централите и инсталираните мощности присъединени към електроразпределителната мрежа. Електроразпределителните предприятия са по-заинтересовани от по-дългосрочни прогнози заради балансирането на товара. Ефективното управление и балансиране на товара на електроразпределителните и преносните мрежи изисква спектър от прогнози на очакваното производство на енергията произведена от фотоволтаичните централи. Това води до намаляване на допъл-

нителните разходи, свързани със загуби от небаланс [34]. Приложението на различните типове модели според времевия интервал е обобщено на фиг.4.



Фиг.4. *Приложение на моделите според времевия интервал*

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирането на изходната мощност на инсталациите за производство на електроенергия от слънце в последните години е от все по-голяма важност за операторите на електроразпределителните предприятия и мрежи. Трудността за прогнозиране на тези системи произлиза от променливите условия на първичния източник. Пазарите на електроенергия изискват все по-точни прогнози и на все по-кратък интервал от време, което допълнително затруднява задачата.

Настоящето изследване представя обзор на съществуващите и най-често използвани методи за прогнозиране. Разгледани са физическите, статистическите и хибридните методи за прогнозиране.

Като обобщение може да се каже, че физическите методи не изискват данни за работата на централата за дълъг период от време и могат да бъдат използвани за по-дългосрочни прогнози. Тяхното предимство е, че евентуална грешка при изчислението може да бъде коригирана, измервайки изходната мощност на централата. Статистическите методи обаче изискват предишни данни за работата на централата. Те показват много по-голяма точност при краткосрочни прогнози.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Schmela M., G. Masson, N.N. Thi Mai (2016) ***Global market outlook for solar power 2016-2020***. SolarPower Europe Report

[2] Martin L, Zarzalejo L, Polo J, Navarro A, Marchante R, Cony M. (2010) ***Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: application to solar thermal power plants energy production planning***. Solar Energy 84:1772e81.

[3] Alfares, H.K., Nazeeruddin, M., (2002***). Electric load forecasting: literature survey and classification of methods***. Int. J. Syst. Sci. 33, 23–34.

[4] Muhammad Qamar Raza, Mithulananthan Nadarajah, Chandima Ekanayake (2016), ***On recent advances in PV output power forecast***, Solar Energy 136 125–144

[5] J. Antonanzas N. Osorio, R. Escobar, R. Urraca, F.J. Martinez-de-Pison, F. Antonanzas-Torres (2016) ***Review of photovoltaic power forecasting***. Solar Energy 136 78–111

[6] Soman, S.S., Zareipour, H., Malik, O., Mandal, P., (2010), ***A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons***. In: North American Power Symposium (NAPS), 2010, 26–28 Sept. 2010, pp. 1–8
[7] Rezk, H., Tyukhov, I., Raupov, A., (2015), ***Experimental implementation of meteorological data and photovoltaic solar radiation monitoring system***, Int.Trans. Electr. Energy Syst. 25, 3573–3585
[8] De Soto W, Klein SA, Beckman WA, ***Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance.*** Solar Energ 2006; 80:78–88
[9] Diagne, M., David, M., Lauret, P., Boland, J., Schmutz, N.,(2013). ***Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. Renew***. Sustain. Energy Rev. 27, 65–76
[10] Gueymard, C.A., Ruiz-Arias, J.A.,(2015), ***Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance***, Sol. Energy *http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.010.*
[11] Urraca, R., Antonanzas, J., Alia-Martínez, M., Martínez-de-Pisón, F.J., An-tonanzas-Torres, F., (2016). ***Smart baseline models for solar irradiation forecasting***, Energy Convers. Manage. 108, 539–548.
[12] Luque, A., Hegedus, S., (2013), Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, (Wiley, Ed.)
[13] Celik, A.N., (2011), ***Artificial neural network modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules***, Sol. Energy 85 (10), 2507–2517. http://dx.doi.org/10.1016/ j.solener.2011.07.009
[14] De Soto, W., Klein, S.A., Beckman, W.A., (2006), ***Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance.*** Sol. Energy 80 (1), 78–88
[15] Dobos, A.P.,(2012), ***An improved coefficient calculator for the California energy commission 6 parameter photovoltaic module model***, J. Sol. Energy Eng. 134 (2), 021011.
[16] Alberto Dolara, Sonia Leva, Giampaolo Manzolini (2015), ***Comparison of different physical models for PV power output prediction***, Solar Energy 119 (2015) 83–99
[17] Villalva, M., Gazoli, J., Filho, E., (2009), ***Comprehensive approach tomodeling and simulation of photovoltaic arrays***. IEEE Trans. PowerElectron. 24, 5
[18] W.Durisch, B. Bitnar, J.C.Mayor, H. Kiess, K.H. Lam, J. Close, (2007) ***Efficenecy model for 9hotovoltaic modules and demonstration of its applicaton to energy yaild estimation Solar energy Materials and Solar Cells***", Vol.91,2007,pp.79-84
[19] J. Munoz, O. Perpinan (2016), ***A simple model for the prediction of yearly energy yields for gridconnected PV systems starting from monthly meteorological data***, Renewable Energy 97 (2016) 680e688
[20] F. Martínez-Moreno, E. Lorenzo, J. Munoz, R. Moreton (2012), ***On the testing of large PV arrays***, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 20, issue 1, pp. 100-105
[21] S.R. Williams, T.R. Betts, T. Helf, R. Gottschalg, H.G. Beyer, D.G. Infield,(2003) ***Modelling long-term module performance based on realistic reporting conditions with consideration to spectral effects***, in: Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2, 2003, pp. 1908e1911. Vol. 2, 2003
[22] Graditi, G., Ferlito, S., Adinolfi, G., (2016), ***Comparison of photovoltaic plant power production prediction methods using a large measured dataset,*** Renew. Energy 90, 513–519
[23] Chu, Y., Urguhart, B., Gohari, S., Pedro, H., Kleissl, J., Coimbra, C., (2015). ***Short-term reforecasting of power output from a 48MWe solar PV plant***. Sol. Energy 112, 68-77

[24] Li, Y., Su, Y., Shu, L., (2014). ***An ARMAX model for forecasting the power output of a grid connected photovoltaic system***. Renew. Energy 66, 78–89
[25] Pedro, H.T.C., Coimbra, C.F.M., (2012), ***Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs***. Sol. Energy 86, 2017–2028
[26] Coimbra, C., Pedro, H., (2013). ***Stochastic-learning methods, In: Kleissl, J. (Ed.), Solar Energy Forecasting and Resource Assessment***, first ed. Academic Press, Waltham, pp. 383–406
[27] Pedro, H.T.C., Coimbra, C.F.M., (2012). ***Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs***, Sol. Energy 86, 2017–2028
[28] Vapnik, V., Lerner, A., (1963). ***Pattern recognition using generalized portrait method***. Autom. Remote Control 24, 774–780
[29] Breiman, L., (2001). ***Random forests.*** Machine Learn. 45 (1), 5–32
[30] Bouzerdoum, M., Mellit, A., Massi Pavan, A., (2013). ***A hybrid model (SARIMA-SVM) for short-term power forecasting of a small-scale grid-connected photovoltaic plant***. Sol. Energy 98, 226–235
[31] Ramsami, P., Oree, V., (2015). ***A hybrid method for forecasting the energy output of photovoltaic systems,*** Energy Convers. Manage. 95, 406–413
[32] Hossain, M.R., Oo, A.M.T., Ali, A.B., (2013), ***Hybrid prediction method for solar power using dfferent computational intelligence algorithms***. Smart Grid Renew. Energy 4, 76–87
[33] Dixon, R.K., McGowan, E., Onysko, G., Scheer, R.M., (2010). ***US energy conservation and efficiency policies: challenges and opportunities,*** Energy Policy 38, 6398–6408.
[34] Rodrigyuez, G.D., (2010), ***A utility perspective of the role of energy storage in the smart grid.*** In: Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, 25–29July 2010, pp. 1–2.
[35] Muhammad Qamar Raza, Abbas Khosravi, Renewable and Sustainable Energy Reviews 50 (2015), ***A review on artificial intelligence based load demand forecasting techniques for smart grid and buildings,*** 1352–1372

Автор: Ива Драгановска, инж. маг. докторант, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *iva.draganovska@gmail.com*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Пламен Ризов

ПРОЕКТИРАНЕ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО ЧРЕЗ ВЪВЕЖДАНЕ НА ЕСТЕСТВЕНА СВЕТЛИНА В СГРАДИ С КУХИ ТРЪБНИ СВЕТЛОВОДИ

Захари Иванов, Васил Станков

Резюме: *Предложена е методика за проектиране на осветлението в сгради, посредством въвеждане на естествената светлина в помещенията със система с кухи тръбни светловоди. С тази система се използва естествената светлина средно 40% от светлата част на денонощието за цялата година с изключение на месеците ноември, декември и януари. За този период се предвижда хибридна система (естествено и изкуствено осветление), като изкуственото осветление се димира и само допълва естественото до необходимото ниво. Изследванията показват, че по този начин биха могли да се реализират икономии от електрическа енергия за осветление между 60% и 80%, в зависимост от географското местоположение на обекта.*
Ключови думи: *естествена светлина, осветителна система, светловод.*

LIGHTING DESIGN BY INTRODUCING NATURAL LIGHT IN THE BUILDING WITH HOLLOW TUBULAR LIGHT GUIDE

Zahari Ivanov, Vasil Stankov

Abstract: *It is proposed a methodology for designing lighting in buildings by introducing the natural light into the rooms with hollow tube lightning system. With this system, natural light is used on average 40% of the daylight for the whole year except for November, December and January. For this period, a hybrid system (natural and artificial lighting) is envisaged, with artificial lighting diminishing and only complementing the natural to the required level. Research shows that this could save electricity from 60% to 80%, depending on the geographic location of the site.*
Keywords: *natural light, lighting system, light pipe*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Светловодните системи за естествено осветление са възобновяеми източници на енергия. В страните от Европейския съюз активно се разработват програми на правителствата в подкрепа на прилагането на светловодите. Например, във Франция, се разглежда въпросът за включване на светловодите в списък на продукти, използващи възобновяеми източници на енергия, както и подкрепяне закупуването и монтажа на светловодите от страна на ЕС.

Кухите тръбни светловоди насочват естествената светлина във вътрешността на сградата. Те се състоят от светло насочващи устройства, от външния край на

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

който е оптична система за "събиране" на естествена светлина, като на вътрешния край се поставят разсейватели за разпределение на светлина във вътрешната част на помещението. Оптичната система може да бъде поставена на нивото на покрива на сградата, което й дава възможност да събира светлина от цялата полусфера на небосвода.

Слънчевото излъчване, което попада на земната повърхност, се променя в зависимост от геометричното разположение на Земята в космическото пространство и най-вече спрямо слънцето. Влияние оказва атмосферното разсейване от молекулите на въздуха, водните пари и праха, атмосферното поглъщане от кислорода, азота, водата и въглеродните оксиди и отражението.

Ъгълът на падане на слънчевата светлина на Земята варира през годината в зависимост от сезоните и географското положение.

Поради факта, че географската ширина за територията на България варира в много малки граници (41°- 43°), можем да определим един среден ъгъл, който да е актуален за цялата страна. В табл.1. са показани средните ъгли на падане на слънчевата светлина за територията на България по месеци на хоризонтално разположена повърхност [4]. Средният ъгъл на падане на слънчевата светлина за територията на България през годината е 47°.

Таблица 1.

Януари	Февруари	Март	Април	Май	Юни
31°	39°	47°	55°	63°	70°
Юли	Август	Септември	Октомври	Ноември	Декември
63°	55°	47°	39°	31°	24°

Устройството на светловод за въвеждане на естествено осветление е показано на фиг.1. Тази система за естествено осветление се състои от прозрачен купол, система за оптично насочване на светлина, тръба за предаване на светлината с високи отразяващи свойства и дифузор. Подобна система е способна да “улавя” голямо количество естествена светлина и да я предава в най-тъмните участъци на помещенията.

Един от основните елементи в системата, гарантиращ ефективната й работа, е устройство за оптично поглъщане на светлината на базата на призматичната леща (фиг.1). Светловодната тръба, провеждаща светлината, притежава високи отражателни свойства и може да провежда светлина на голямо разстояние. Това е своеобразен отражателен тръбопровод или “оптичен тунел”: всички светлинни лъчи, преминаващи през прозрачния купол, се отразяват по продължение на цялата му дължина, като дневната светлина се доставя до помещението почти без загуби. Основен елемент тук е огледалната лента, разположена от вътрешната страна на тръбата. Лентата притежава няколко много важни характеристики: абсолютно гладка повърхност, отражателна способност във видимия диапазон (400-700 nm), без намаляване на светлинния поток. Освен това тръбопроводът не отразява инфрачервеното излъчване и по този начин не акумулира и не пре-

дава слънчевата топлина. Практически цялата слънчева светлинна енергия достига до дифузора (разсейвателя) с изключение на 7-8%, които се поглъщат от прозрачния купол и 0,5%, които се губят при прехода на светлината през всяка извивка на тръбата.

1- прозрачен купол; **2**– рефлектор; **3**– уплътнение; **4**- предпазител **5**– тръба; **6**– фланец; **7**– разсейвател.

Фиг.1. *Съставни елементи на светловод за естествено осветление*

Разработени са отразяващи материали с огледален коефициент на отражение около 99%. С тези материали значително се увеличава разстоянието, на което пренасянето на светлина става икономически изгодно. Разработени са гъвкави елементи за предаване на светлината. Те са изработени от метализирано полиетиленово фолио, покрито с алуминиев слой.

Приложението на светловоди във вътрешните осветителните уредби (ВОУ) е целесъобразно в много области в съвременното осветление и затова в последните години се наблюдава значителен прогрес в развитието им, и увеличаване на интереса към тях [2, 3, 5].

Предимства на светловодната системата:1) Екологично чиста технология, не изискваща утилизация; 2) Светлопредаване 99.7%; 3) Обезпечение на естествено осветление от разсъмване до залез; 4) Енергоспестяващи свойства (минимална топлопроводност) ; 5) Гаранция 10 години и неограничен срок на експлоатация; 6) Не изисква постоянно обслужване; 7) Не пропуска влага и замърсяване, което препятства образуването на течове и конденз.

Фиг.2. *Светловоди за осветление на къща*

В табл.2 са посочени общи препоръки за осветление на помещения със светловодна система [3].

Таблица 2.

Светловод	A 250	A 350	A 550	A 850
A Plus	9 m^2	16 m^2	25 m^2	40 m^2
A Flexi	4 m^2	9 m^2	16 m^2	

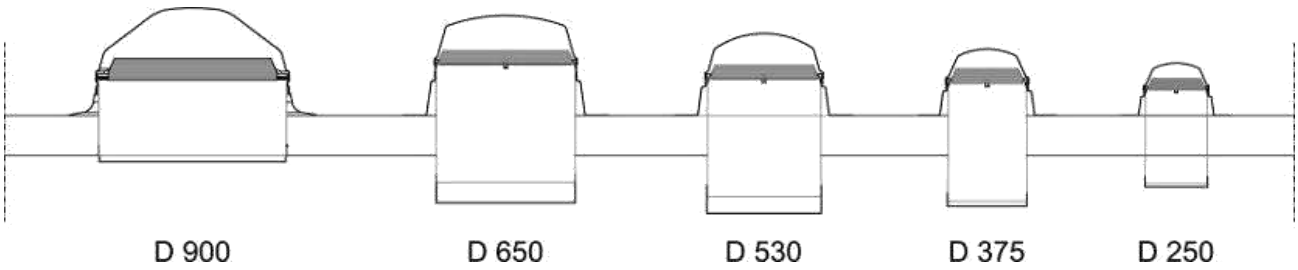
Допустимата площ за осветление може значително да е по-голяма от препоръчаните стойности и трябва допълнително да се изчисли. Например, общата площ за осветление със светловоди A 550 може да достигне 40 m^2, а с A850 съответно 65 m^2.

Не се препоръчва напълно да се заменя със светловоди за естествено осветление електрическото осветление в помещения, където трябва постоянен източник на светлина. Слънчевата светлина е прекалено зависима от метеорологичните условия, годишните времена и др. Идеалният вариант е, комбинацията от електрическо и естествено осветление със светловоди.

2. ИЗЧИСЛЕНИЯ НА ЕСТЕСТВЕНО ОСВЕТЛЕНИЕ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕ НА СВЕТЛОВОДОВИ

При проектирането на светловодни системи за естествена светлина са необходими следните данни:

- Данни за наличните размери на светловодите (фиг.3)
- Данни за наличната външна хоризонтална осветеност по часове в зависимост от географското разположение на обекта (табл. 3) [2];
- Данни за общата ефективност на системата, изследвана и предоставена от производителя [2]; (табл.4);
- Данни за коефициента на използване на светлинния поток (табл.5.)



Фиг.3.

Таблица 3.

$E_{h,i}$ (Klx) СЕЛЕКТИРАНЕ НА ОСРЕДНЕНИ МЕСЕЧНИ СТОЙНОСТИ НА ВЪНШНАТА ОСВЕТЕНОСТ ПО ЧАСОВЕ > 0,5 Klx

БУРГАС f 42° 30' N	МЕСЕЦИ											
	януари	февруари	март	април	май	юни	юли	август	септември	октомври	ноември	декември
0-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,5	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5-6	0,0	0,0	0,0	2,0	7,5	11,9	10,3	4,4	0,5	0,0	0,0	0,0
6-7	0,0	0,6	3,9	12,0	22,3	28,9	27,6	19,2	8,1	1,5	0,1	0,0
7-8	1,8	6,6	15,2	26,3	39,6	47,6	47,3	38,4	23,9	10,4	2,9	1,0
8-9	9,7	18,6	28,3	43,7	58,0	67,6	67,2	57,6	41,0	24,4	11,7	7,6
9-10	18,4	30,4	39,5	58,0	74,4	83,8	83,5	74,9	56,1	37,1	21,7	16,5
10-11	24,5	39,5	48,9	69,0	85,4	94,2	93,6	86,6	66,4	46,4	29,8	23,3
11-12	27,8	42,3	53,3	73,7	90,9	99,8	96,7	90,8	71,2	50,3	33,2	25,3
12-13	28,2	42,4	51,7	68,0	90,0	96,1	95,0	89,3	69,7	51,7	34,2	25,5
13-14	26,0	37,1	46,7	60,6	82,0	89,0	87,7	82,7	62,2	45,8	30,3	22,7
14-15	19,1	30,1	38,3	51,9	72,6	76,4	77,3	69,5	52,8	36,6	23,9	16,3
15-16	10,5	19,5	28,8	40,7	58,2	62,1	62,0	54,4	38,6	25,0	14,0	7,9
16-17	1,8	7,2	16,7	27,9	40,8	45,9	44,5	37,0	23,1	11,5	3,2	0,9
17-18	0,0	0,6	4,6	13,8	23,2	27,8	26,3	19,5	8,3	1,6	0,0	0,0
18-19	0,0	0,0	0,1	2,3	7,8	11,9	10,2	4,6	0,4	0,0	0,0	0,0
19-20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,3	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
20-21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21-22	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22-23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23-24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Дни на месец	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Часове на ден	10	12	12	14	16	16	16	14	13	12	10	10
Часове за месец	310	336	372	420	496	480	496	434	390	372	300	310

$Td_{(0,5)}$ = годишно часове с $E_{h,i}$ повече от 0,5 Klx (ч/г)	4716	$T_{80\%}$ = 80% of $Td_{(0,5)}$ (ч/г)	3773
$E_{(0,5)}$ = годишна осветеност с $E_{h,i}$ повече от 0,5 Klx (Klx)	37,1	$E_{80\%}$ = годишен минимум от $E_{h,i}$ за 80% от $Td_{(0,5)}$ (Klx)	10,2
$T_{60\%}$ = 60% of $Td_{(0,5)}$ (ч/г)	2830	$T_{40\%}$ = 40% of $Td_{(0,5)}$ (ч/г)	1886
$E_{60\%}$ = годишен минимум от $E_{h,i}$ за 60% от $Td_{(0,5)}$ (Klx)	25,0	$E_{40\%}$ = годишен минимум от $E_{h,i}$ за 40% от $Td_{(0,5)}$ (Klx)	40,8

Таблица 4.

EFFICIENCY CALCULATION TABLE						
COMPONENTS DESCRIPTION		EFFICIENCY VALUES				
		Ø 250	Ø 375	Ø 530	Ø 650	Ø 900
Captor (dome + RIR®)		0,86	0,86	0,86	0,85	0,88
Collector (Dome + RIR® + Top tube)	(L = 30 cm)	0,85	0,85			
	(L = 60 cm)			0,84	0,83	0,88
Anti-condensation tray (CONVAS®)		0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Vegalux™ tube	(L = 10 cm)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	(L = 20 cm)	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00
	(L = 30 cm)	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00
	(L = 40 cm)	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00
	(L = 60 cm)	0,97	0,98	0,98	0,98	1,00
	(L = 80 cm)	0,96	0,97	0,98	0,98	1,00
	(L = 90 cm)	0,95	0,97	0,97	0,98	1,00
	(L = 120 cm)	0,93	0,96	0,97	0,98	1,00
	(L = 240 cm)	0,88	0,93	0,95	0,94	0,99
	(L = 360 cm)	0,83	0,90	0,92	0,91	0,99
	(L = 450 cm)	0,77	0,80	0,91	0,90	0,98
Emitter (Bottom tube)	round (L = 30cm)	0,90	0,91			
	round (L = 60cm)			0,92	0,92	
Emitter (Bottom tube + transition box)	square (L = 40 cm)	0,90	0,91	0,93	0,91	
Angle adapter	(0°-30°)	0,93	0,96	0,94	0,98	
	(0°-60°)	0,87	0,93	0,90	0,96	
	(0°-90°)	0,84	0,90	0,87	0,94	0,90
2 Angle adapters	(0°-30°)	0,88	0,93	0,88	0,94	
	(0°-90°)	0,84	0,90	0,76	0,94	
Anti-intrusion system				0,87	0,87	0,87
Metal transition box			0,79	0,74		
Round diffuser	Transparent		0,90			
	Prismatic	0,82	0,81	0,86	0,88	0,88
	Vision	0,82	0,83	0,72	0,78	
	Radial lens					0,80
Square diffuser	Transparent	0,85	0,90	0,87	0,86	
	Prismatic	0,76	0,80	0,81	0,86	
	Radial lens	0,76	0,80	0,79	0,78	

Таблица 5.

Коефициенти на използване на светлинния поток [2];

UF: UTILIZATION FACTORS (CIE Technical Report 173:2006)

Индекс на помещението	ТАВАН Отражателна способност (%)	Отражателна способност за под / работна повърхност 10%				Отражателна способност за под / работна повърхност 30%			
		Отражателна способност за стени				Отражателна способност за стени			
		50%	30%	10%	0%	50%	30%	10%	0%
0,8	70	0,51	0,43	0,37	0,34	0,54	0,44	0,37	0,35
	50	0,49	0,42	0,36	0,34	0,52	0,43	0,37	0,35
	30	0,48	0,41	0,36	0,34	0,50	0,42	0,37	0,34
1,0	70	0,57	0,49	0,43	0,40	0,61	0,51	0,44	0,41
	50	0,55	0,48	0,42	0,40	0,58	0,50	0,43	0,41
	30	0,54	0,47	0,42	0,40	0,56	0,49	0,43	0,40
1,25	70	0,63	0,55	0,49	0,46	0,68	0,59	0,51	0,48
	50	0,61	0,54	0,49	0,46	0,65	0,57	0,50	0,47
	30	0,59	0,53	0,48	0,46	0,62	0,55	0,49	0,47
1,5	70	0,68	0,60	0,54	0,52	0,74	0,64	0,57	0,54
	50	0,66	0,59	0,54	0,51	0,70	0,62	0,56	0,53
	30	0,64	0,58	0,53	0,51	0,67	0,60	0,54	0,52
2,0	70	0,75	0,68	0,62	0,59	0,83	0,74	0,66	0,63
	50	0,72	0,66	0,61	0,59	0,78	0,70	0,64	0,61
	30	0,70	0,65	0,60	0,58	0,74	0,68	0,62	0,60
2,5	70	0,80	0,73	0,68	0,65	0,89	0,80	0,73	0,70
	50	0,77	0,71	0,67	0,65	0,83	0,76	0,70	0,68
	30	0,75	0,70	0,66	0,64	0,79	0,73	0,68	0,66
3,0	70	0,83	0,77	0,72	0,70	0,93	0,85	0,79	0,76
	50	0,80	0,75	0,71	0,69	0,87	0,81	0,75	0,73
	30	0,78	0,74	0,70	0,68	0,82	0,77	0,73	0,70
4,0	70	0,88	0,83	0,78	0,76	0,99	0,92	0,86	0,84
	50	0,85	0,81	0,77	0,75	0,93	0,87	0,83	0,80
	30	0,83	0,79	0,76	0,74	0,87	0,83	0,79	0,77
5,0	70	0,91	0,86	0,82	0,80	1,00	0,97	0,92	0,90
	50	0,88	0,84	0,81	0,79	0,97	0,92	0,87	0,85
	30	0,86	0,83	0,80	0,78	0,91	0,87	0,83	0,82

Определяне броя на необходимите светловодни системи в зависимост от желаната експлоатационна осветеност или от КЕО.

$$N=\frac{S*E_m}{E_0*A*G_e*UF*MF} \qquad N=\frac{S*КЕО\%}{A*G_e*UF*MF*100} \tag{1}$$

където **N** е необходим брой осветители;

S – площ на осветяваната зона;

E_m – експлоатационна осветеност;

E_0 – външна осветеност ;

A – площ на тръбата на светловода (табл. 6.) ;

Ge – ефективност на системата;

UF – коефициент на използване на светлинния поток за работна повърхност, във функция от индекса на помещението и коефициентите на отражение на повърхностите в помещението;

MF – експлоатационен коефициент;

КЕО – коефициент на естествена осветеност.

Таблица 6

Диаметър	Ефективна площ на тръбата А
D250	0,05 m^2
D375	0,11 m^2
D530	0,24 m^2
D650	0,36 m^2
D900	0,64 m^2

3. ИЗМЕРВАНЕ ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА ЕСТЕСТВЕНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ ВЪВ ВЪТРЕШНА ОСВЕТИТЕЛНА УРЕДБА, ИЗГРАДЕНА СЪС СВЕТЛОВОДИ

Направени са измервания на осветлението със светловоди в склад на фирма “OBO Bettermann” в София. Сградата е с размери 60x30x5,5m и в нея са монтирани 60 светловода на фирмата “Solatube” [5] с диаметър на тръбата 530mm. Ефективната повърхност на прихващане на дневната светлина на всеки светловод е 4837cm². В сградата няма прозорци и единствените източници на естествена светлина се явяват монтираните на тавана светловоди. По време на измерванията изкуственото осветление е изключено.

Поради непостоянството на естественото осветление във времето, то се характеризира в помещенията с коефициент на естествено осветление (КЕО). Той показва колко пъти осветеността в помещението е по-малка от външната осветеност на сградата в даден момент.

$$КЕО = \frac{Eв}{Eн}100,\% \tag{2}$$

където ***Ев*** – естествената осветеност в помещението, а ***Ен*** – хоризонталната осветеност вън от сградата, lx.

С помощта на два луксметъра са измерени едновременно осветеностите вътре в помещението и тази отвън под открито небе.

Средната стойност на коефициента на естествено осветление е $КЕО_{ср.}$=0,775 %

Качествена характеристика на естественото осветление са равномерностите на хоризонталната осветеност в помещението (g_1 и g_2):

$$g_1 = \frac{KEO_{min}}{KEO_{max}} = \frac{0,683}{0,879} = 0,777 \ , \quad (3)$$

$$g_2 = \frac{KEO_{min}}{KEO_{cp}} = \frac{\mathbf{0,683}}{\mathbf{0,775}} = \mathbf{0,881}, \quad (4)$$

където KEO_{max}, KEO_{min} и KEO_{cp} са съответно максималната, минималната и средната стойности на *КЕО* върху работната повърхност.
За помещения от I и II категория на зрителна работа, осветявани с горно естествено осветление се изисква $g_1 \geq 0,5$ и $g_2 \geq 0,65$. В помещения с висока и средна точност на зрителната работа се препоръчва $g_1 \geq 0,35$. Колкото по-високи са стойностите на коефициентите на равномерност на осветлението, толкова по-високо е качеството на естественото осветление.

Фиг.4. Светловоди за въвеждане на естествена светлина в сградата на завод „Бер-Хелла Термоконтрол" ЕООД, София, район Божурище

Измерени са осветеностите от светловодите за естествено осветление в сградата на завода „Бер-Хелла Термоконтрол" ЕООД (фиг.4). Завода се намира в индустриалната зона на град София, район Божурище. Дейността на завода е производство на електроника за панели на автомобилни климатици.
Средната стойност на коеф. на естествено осветление е $КЕО_{ср.} = 0,6508$ %.
Равномерностите на хоризонталната осветеност в помещението (g_1 и g_2):

$$g_1 = \frac{KEO_{min}}{KEO_{max}} = \frac{0,55}{1,28} = 0,44\% \ , \quad (5)$$

$$g_2 = \frac{KEO_{min}}{KEO_{cp}} = \frac{0,55}{0,6508} = 0,845\%, \quad (6)$$

Според направените измервания и изчисления, осветеността осигурена чрез светловоди в помещение архив е 202lx и отговаря на нормените изисквания (архив - 200lx).
Помещението в което са направени измерванията е архив с размери 950 x 1000 cm и височина 275 cm и в него са монтирани 6 светловода на фирмата "Solatube" [2]; , всеки с диаметър на тръбата 530 mm. Ефективна повърхност на

прихващане на дневната светлина на всеки светловод е 4837см².
Измерванията са извършени на 22 януари 2016г. от 14:00 до 14:30 часа. Времето е облачно. В помещението няма прозорци и единствените източници на естествена светлина се явяват монтираните на тавана светловоди. По време на измерванията изкуственото осветление е изключено.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Страната ни има достатъчно потенциал за използване на слънчева енергия, като в това отношение е сред слънчевите страни по света: средногодишното слънцегреене над Сандански е 2600 часа, над Пловдив 2250 часа, а над София – 2050 часа. Средният брой слънчеви дни в годината е 200. Тъй като в България годишното слънцегреене значително надвишава средноевропейските показатели, то инвестициите за светловодни системи за естествено осветление са много изгодно капиталовложение. Слънчевото греене като ресурс е практически неограничен и напълно безплатен.
Естествената дневна светлина си променя яркостта и цветната температура. Денонощният цикъл светло – тъмно оказва влияние върху биологичния часовник, чрез който се регулират някои основни хормони, а именно кортизолът (хормон на стреса) и мелатонинът (хормон на съня) [1]. Съвременните схващания за здравословен начин на живот се базират именно на схващането този ритъм да не бъде нарушаван.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Иванов З. А., ***Применение биодинамических систем освещения в осветительных установках,*** Сборник научних трудов X международной конференции, Саранск, 13-14 декабря 2012 г., Саранск 2012, стр 115-119, ISBN 978-5-901661-26-0
[2] Бракале Дж., ***Естественное освещение помещение помещений с помощью новой пассивной системы «SOLARSPOT***», Светотехника 2005, 5.
[3] *http://www.svetlovod.cz*
[4] *http://solarelectricityhandbook.com/solar-angle-calculator.html*
[5] *http://www.solatube.com/*

Автори: Захари Иванов, проф. д-р, катедра "ЕСЕОЕТ", Електротехнически Факултет, Тенически Университет-София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*, **Васил Станков**, маг. инж., фирма „Advance energy and engineering, Sofia, Bulgaria", E-mail address: *v.stankov@aee.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Ива Петринска

АПРОКСИМАЦИЯ НА КРИВАТА НА ОТНОСИТЕЛНАТА СПЕКТРАЛНА ЧУВСТВИТЕЛНОСТ НА ЧОВЕШКОТО ОКО

Йордан Шопов, Симона Петракиева

Резюме: *В работата са разгледани математически зависимости между някои основни физически величини, които се използват в дисциплината „Осветителна техника”. Анализирани са количествено връзки между тях.*
Ключови думи: *лъчист поток, светлинен поток*

APPROXIMATION THE CURVE OF THE RELATIVE SPECTRAL SENSITIVITY OF HUMAN EYE

Yordan Shopov, Simona Petrakieva

Abstract: *In the paper mathematical relations between some basic physical quantities used in discipline “Lighting devices”, are considered. A quantitative analysis of correlation between them, is made.*
Key words: *luminous flow, lighting flow*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При изследване на различни физически процеси, за измерване на една и съща величина, при необходимост се въвеждат подходящи за конкретните случаи измервателни единици. В зависимост от дименсионалните зависимости могат да се използват и корекционни коефициенти. В много случаи могат да се посочат няколко измервателни единици за една и съща величина, например за „налягане” – Pa, bar, Torr, atm, mm воден стълб.

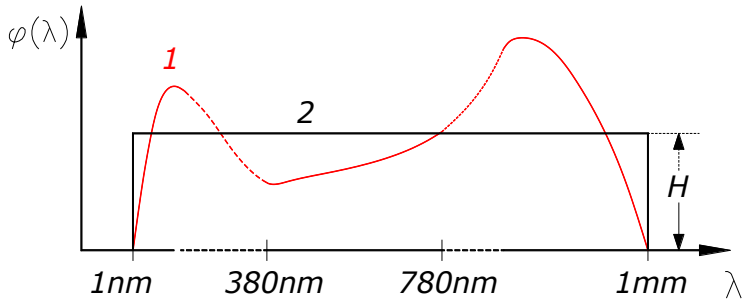
В осветителната техника като основни величини за мощност на излъчването са приети понятията „лъчист” и „светлинен” поток. За двата вида поток се използват различни измервателни единици, като понятието светлинен поток се дефинира само в границите на спектрална чувствителност на човешкото око.

2. КОГА ЛЪЧИСТИЯТ ПОТОК СЕ “ПРЕОБРАЗУВА” В СВЕТЛИНЕН?

Нека се разгледа източник на лъчение, захранен от електрическа енергия с определена мощност, която може да се измери. Приема се, че неговият спектър на излъчване е известен и е в граници на дължини λ на електромагнитната вълна от ***1 mm*** до ***1 nm*** (фиг.1).

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829



Фиг.1. Спектър на излъчване на даден източник на лъчение.

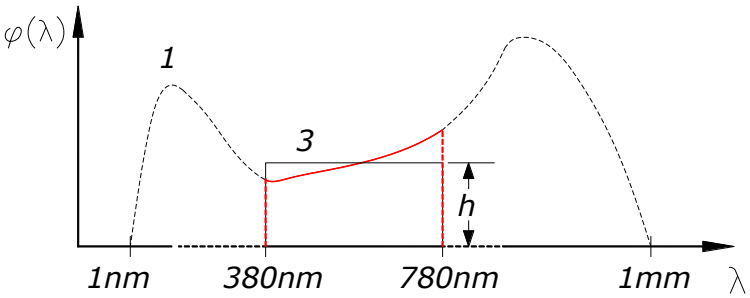
Според общоприетите понятия, това е ***лъчист поток***. В най-общ вид, изразено математически, стойността му може да се пресметне като се реши интеграла от формула (1) [1].

$$\Phi_e = \int_{\lambda=1\ nm}^{\lambda=1\ mm} \varphi(\lambda).d\lambda, \quad W, \tag{1}$$

където $\varphi(\lambda)$ е спектралната плътност на потока в отделните части на разглежданията диапазон.

По дефиниция това е **площта, заключена между крива 1 и абсцисната ос**. Решението на интеграла, като **средна стойност** е представена като правоъгълник 2, и е с със същата площ. Широчина му е равна на отсечката между двете граници, а височината му е ***H***.

Стойността на $\boldsymbol{\Phi_e}$ може да се пресметне само за интервала, заключен между дължини на ***380*** и ***780 nm***. Това е площта, заключена между част от крива 1, двете отсечки, издигнати при границите на интеграла и абсцисната ос. Големината ú, представена като правоъгълник 3, е с широчина, равна на отсечката между двете граници ***380*** и ***780 nm*** и височина ***h*** – фиг.2.



Фиг.2. Спектър на излъчване на даден източник на лъчение в диапазон 380 – 780 *nm*.

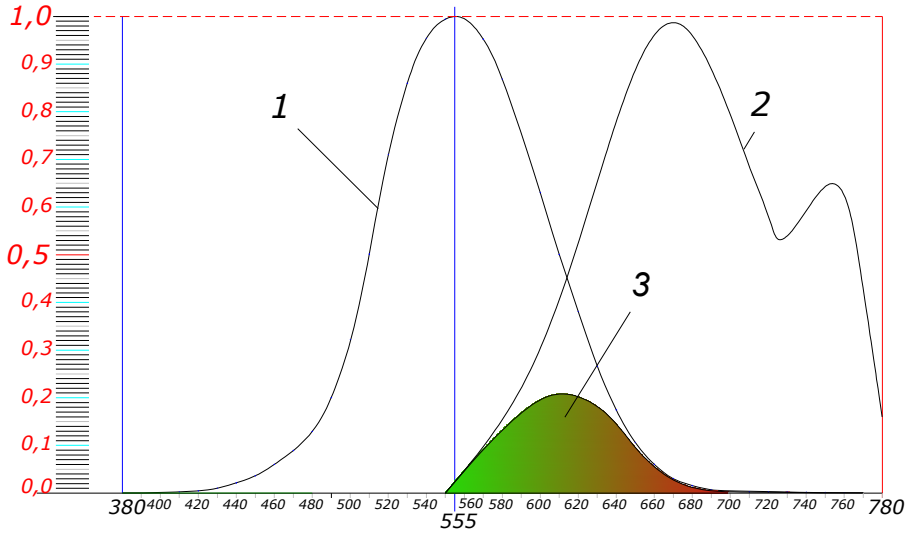
Независимо, че интегрирането е в зоната на спектралната чувствителност на човешкото око, тази стойност е лъчист, а не светлинен поток. За да се дефинира светлинен поток се въвежда ***бездименсионна крива в относителни единици***. Както е известно, тя представлява ***относителната спектралната чувствителност*** (***ОСЧ***) на човешкото око и ограничава част от зоната между дължини на вълната ***380*** и ***780 nm.*** *Наличието на тази крива не променя физическата същност на лъчистия поток, попаднал в тази зона, а показва каква част от него се регистрира от определен сензор или рецептор.* По-просто казано, необ-

ходимо е тази крива да се редуцира в дадения интервал в зависимост от чувствителността на рецептора и стойността ѝ да бъде пресметната за всяка точка от диапазона. *Формално изразено, светлинният поток представлява интеграла от произведението на взаимно припокриващите се части на физическата величина лъчист поток и бездименсионалната крива на ОСЧ*. Това е показано на фиг.3, където с цифри са означени:

1- крива на относителна спектрална чувствителност на човешкото око;

2- крива на спектъра на излъчване на източник на лъчист поток;

3- площ, равна на произведението от взаимното припокриване на двете криви.



Фиг.3. Криви на ОСЧ на човешкото око, лъчист поток и светлинен поток.

Именно площта, означена с (3) се дефинира като "светлинен" поток който окото възприема и в случая това е реалния спектър като зона на възприемане на съответните честоти и интензитет. Както е известно, стойността ѝ може да се пресметне като се реши определения интеграл (2) в означените граници:

$$\boldsymbol{\Phi} = \int_{\lambda=380\ nm}^{\lambda=780\ nm} \varphi(\lambda).V(\lambda).d\lambda,\ W \qquad (2)$$

където: $\varphi(\lambda)$ **-** спектралната плътност на потока,

$V(\lambda)$ – относителна спектрална чувствителност на човешкото око.

Формално погледнато, след като се реши интеграла, дименсията на $\boldsymbol{\Phi}$ е ват (W), тъй като кривата на ОСЧ е бездименсионна.

За количествено и дименсионално изравняване на пропорционалната връзка се въвежда коефициент $S_{св(max)}$:

$$\boldsymbol{\Phi}^* = S_{св(max)} \int_{\lambda=380\ nm}^{\lambda=780\ nm} \varphi(\lambda).V(\lambda).d\lambda,\ \ lm \text{ - светлинен поток,} \qquad (3)$$

където: $S_{св(max)} = 683,\ \ lm/W$.

Какво представлява и как е определена стойността $\boldsymbol{S_{св(max)} = 683}$ и как се форму-

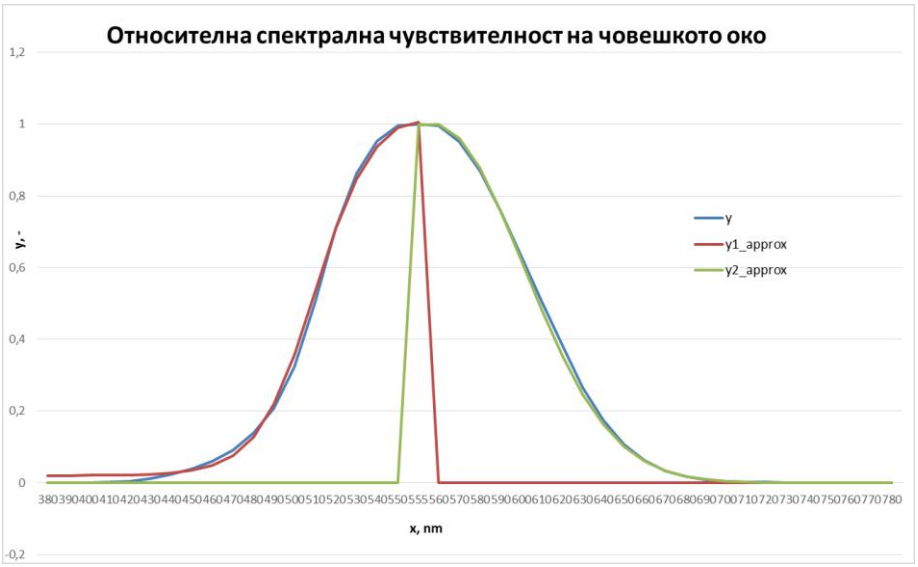
лира единицата “лумен”?
Ако се абстрахираме от физиката на процеса, математическото решение на интеграла представлява площта, представена като произведение на спектралната чувствителност на човешкото око (бездименсионна крива) и кривата на спектъра на излъчване на съответния източник (фиг.3 – графика 3).
Очевидно е, че максималната стойност на произведението не може да бъде по-голяма от площта на кривата на ОСЧ. Тъй като тя е експериментално получена, за да може да се прилага в аналитични изчисления, е необходимо да бъде представена с подходящи математически изрази. Преобразуването може да се получи чрез апроксимация. В дадения случай апроксимацията е извършена чрез програмния продукт **Sigma plot**. С негова помощ могат да се определят както характера на съответните аналитични зависимости, така и техните количествени параметри.
Без да се описва последователността на математическите операции, като краен резултат в дадения случай се получава, че експериментално снетата крива на ОСЧ на човешкото око y се апроксимира с две аналитични функции в съответните граници, както следва:

$$y_1(x) = 0,02 + \frac{1,025}{\left(1 + e^{-\frac{(x-510)}{14}}\right)}, \quad 380\ nm \le x \le 555\ nm \tag{4а}$$

$$y_2(x) = -0,0002 + 1,025.e^{-0,5.\left(\frac{x-558}{43}\right)^2}, \quad 555\ nm \le x \le 780\ nm \tag{4б}$$

$$y(x) = y_1(x) + y_2(x)$$

За да се извърши визуално сравнение между двете криви (апроксимираща и експериментална) на фиг.4 са представени графичните им изображения, получени с програмния продукт MS Excel. От графиките се вижда, че съществува почти пълна идентичност между двете криви.



Фиг.4. Апроксимираща и експериментално снета криви на ОСЧ на човешкото око.

Получените математически изрази позволяват чрез интегриране да се определи площта на фигурата. Пресмятането е направено с програмния продукт Matlab, а полученият резултат е:

$$S = \int_{380}^{780} y(x).dx = \int_{380}^{555} \left(0,02 + \frac{1,025}{\left(1 + e^{-\frac{(x-510)}{14}}\right)} \right).dx + \int_{555}^{780} \left(-0,0002 + 1,025.e^{-0,5\left(\frac{x-558}{43}\right)^2} \right).dx$$

$$\boldsymbol{S = 0,6826 \approx 0,683}$$

Получената стойност представлява максималната площ на апроксимираната функция **в относителни единици**.

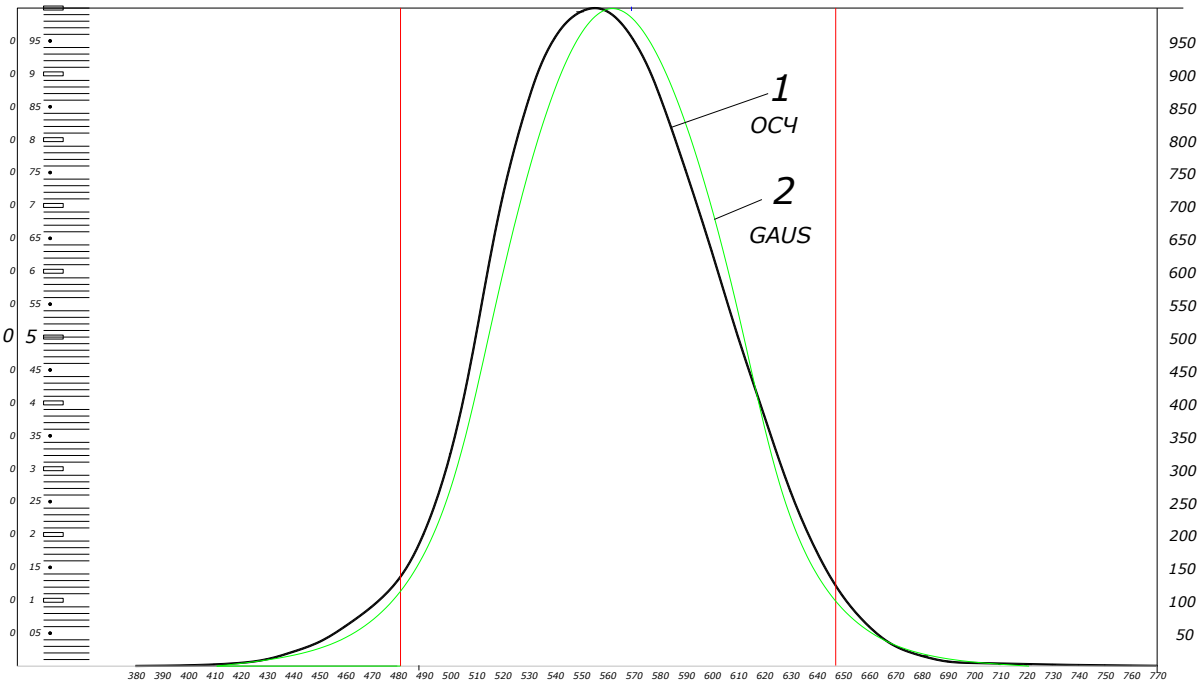
За да се провери до каква степен апроксимацията е вярна, може да се направи сравнение с функция с подобна геометрична форма, за която съществува точна математическа формула. Предположението е, че при интегриране се очаква да се получи стойност в относителни единици много близка до ***S = 0,683***.

Подобна функция е закона на Гаус за нормалното разпределение:

$$y(x) = \frac{1}{b.\sqrt{2\pi}}.e^{-\frac{(x-a)^2}{2b^2}} \qquad (5)$$

След интегриране, полученото решение в относителни единици е: ***G = 0,666.***

При сравнението на тази стойност с получената при интегриране на кривата на ОСЧ се установява, че освен геометрическо подобие разликите са достатъчно малки. Това е показано на фиг.5, където двете стойности са съпоставени в еднакъв мащаб.



Фиг.5. Криви на ОСЧ и закон на Гаус (закон за нормално разпределение).

3. ВРЪЗКАТА МЕЖДУ ЛЪЧИСТ И СВЕТЛИНЕН ПОТОК

Както е известно, при трансформация на лъчист поток, измерван във ватове ***(W)***, към светлинен, измерван в лумени ***(Lm)***, се въвежда корекционен коефициент за изравняване на дименсиите със стойност ***683 Lm/W*** (3).

Като число, това всъщност е средна стойност на бездименсионната апроксимираща функция, получена след интегриране и умножена с 10 ^{3}.

Действителната стойност на светлинния поток, получена от даден светлинен източник, е резултата от интегрирането на произведението на двете подинтегрални функции. Като площ този резултат, показан графически на фиг.3 – графика 3, е винаги по-малък от площта на спектъра на излъчване на източника фиг.3 – графика 2. Съотношението на двете стойности показва каква част от реалната мощност на източника се „трансформира" в светлинен поток. В зависимост от това каква част от спектъра на даден светлинен източник е в зоната на кривата на спектралната чувствителност се определя неговата ефективност.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията са получени математически зависимости, които биха могли да се приложат при анализ на процеси, свързани с кривата на ОСЧ. Получените формули са с достатъчна за практиката точност и биха могли да се използват при определяне на някои параметри на светлинни източници.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Пачаманов, А., Електроснабдяване и осветителна техника (част I - Основи на осветителната техника), София 2011, изд. на ТУ-София, стр. 10-11.

[2] Иванов, З., Светлинни източници, София 2008, Авангард Прима, стр. 92-101.

[3] Пачаманов, А., Н.Рац, Ръководство за лабораторни упражнения по осветителна и инсталационна техника, София (2005), изд. на ТУ-София, стр. 4-5.

[4] Динев, П., Електротехнология, София (2000), изд. на ТУ-София, 218 стр.

Автори: Йордан Шопов, доц. д-р, катедра „Електрически апарати", Електротехнически факултет, ТУ-София, E-mail address: *shopov@tu-sofia.bg*; **Симона Петракиева**, доц. д-р, катедра „Теоретична електротехника", Факултет „Автоматика", ТУ - София, E-mail address: *petrakievas-te@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: проф. д-р Захари Иванов

ИЗПЪЛНЕНИЕ НА СВЕТЛОВОДНИ СИСТЕМИ НА РАЗЛИЧНИ ВИДОВЕ ПОКРИВИ

Васил Станков

Резюме: *Настоящия доклад представлява кратка информация за стъпките, които трябва да се следват при монтаж на кухи тръбни светловоди за естествена светлина, върху различни видове покриви, както и възможните начини на изпълнение. Те могат да бъдат монтирани на всякакъв вид покрив, посредством различни видове детайли, съобразени с конкретния случай. Също така, тръбата бива с различни диаметри, в зависимост от нуждите и височината на помещението, като тя може да се удължава и прави завои на 360 градуса, посредством ъглови адаптери. Формата на дифузера може да бъде, както кръгла, така и квадратна, посредством преходна кутия.*
Ключови думи: *естествена светлина, кухи тръбни светловоди, покрив, монтаж.*

IMPLEMENTATION OF TUBULAR DAYLIGHTING SYSTEMS OF DIFFERENT TYPES OF ROOF

Vasil Stankov

Abstract: *This report provides brief information on the steps to be taken when installing tubular daylighting systems for natural light on different types of roofs. They can be mounted on any type of roof, with different types of details tailored to the specific case. Also, the pipe can be with different diameters, depending on the needs and height of the room and it can be extended and rotated to 360 degrees by means of angle adapters. The shape of the diffuser can be both round and square by a transition box.*
Key words: *natural light, tubular daylighting system, roof, installation.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

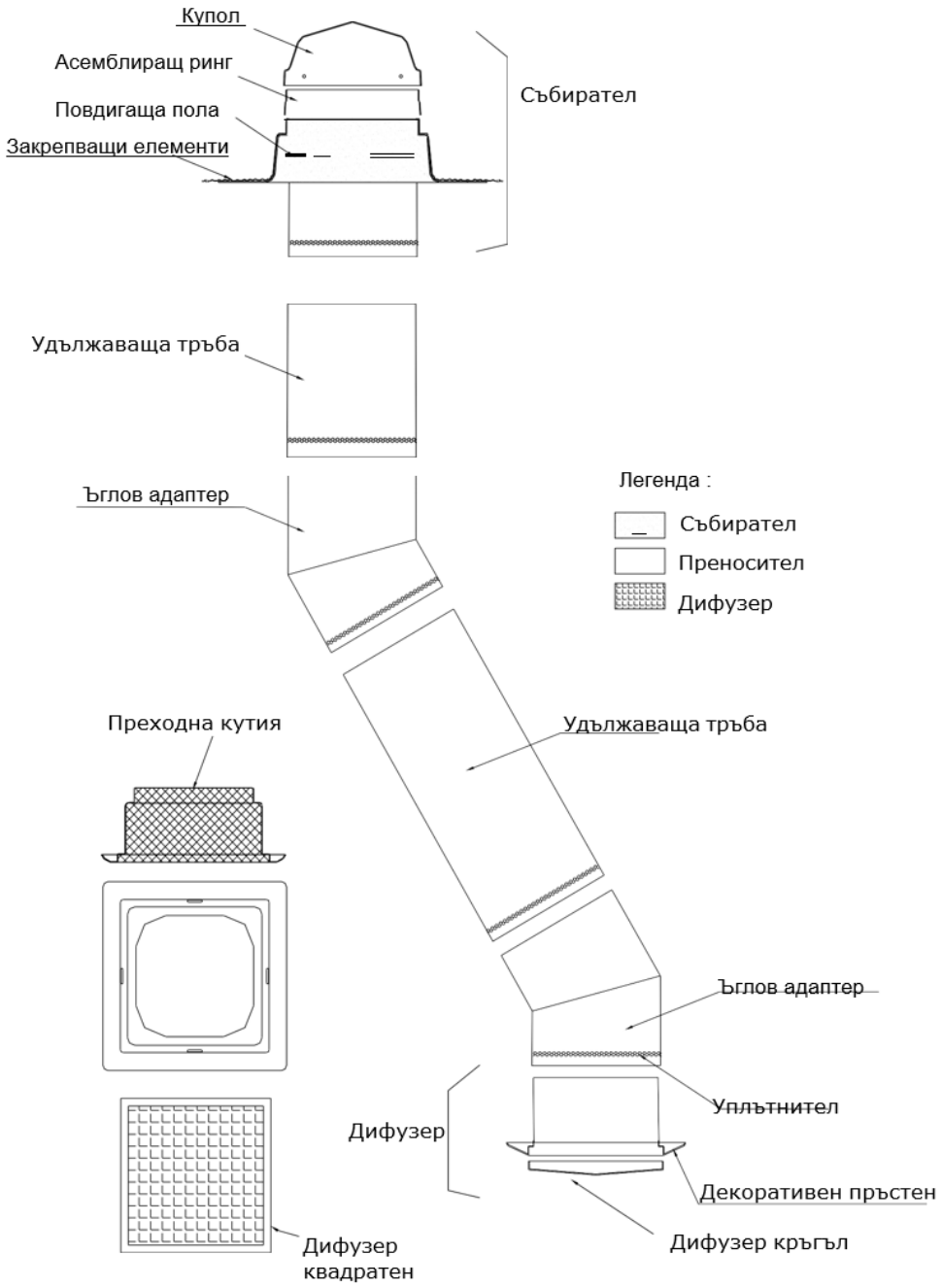
Кухите тръбни светловодни системи за естествена светлина са класифицирани, като възобновяеми източници на енергия. В страните от Европейския съюз активно се разработват програми на правителствата в подкрепа на прилагането на светловодите. Например, във Франция, се разглежда въпросът за включване на светловодите в списък на продукти, използващи възобновяеми източници на енергия, както и подкрепяне закупуването и монтажа на светловодите от страна на ЕС. В САЩ се изплаща 30% федерална такса от стойността на продукта и инсталацията. [1]

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Светловодите улавят дневната светлина от небосвода и я доставят във вътрешността на сградата. Те пренасят светлинния поток с коефициент на полезно действие над 70% [2], като същевременно филтрират нежеланите ултравиолетови и инфрачервени лъчи и благодарение на това помещенията не се прегряват, както при куполите и прозорците. Освен това индекса на цветопредаване се запазва със стойност 100, което създава изключителен комфорт в помещенията оборудвани със светловодни системи [3]. Оптичната им система, служеща за улавяне и насочване на дневната светлина може да бъде поставена както на покрива на сградата, което й дава възможност да събира светлина от цялата полусфера на небосвода, така и на стена на сградата.

Устройството на светловод за въвеждане на естествено осветление е показано на фиг.1.



Фиг.1. Схема на система „SOLARSPOT“.

Светловодната система се състои от компоненти, които могат да се групира в три основни групи.

- Събирател на дневна светлина, който се състои от
  - Купол с висок коефициент на светлопропускливост 83% [3]
  - Отражателна лента с френелови лещи, осигуряваща повече светлина при изгрев, залез и в облачно време
  - Основа за лентата имаща няколко функции:
    - Термална бариера
    - Антикондензна бариера
    - Филтър на ултравиолетови лъчи
- Преносител на светлинния поток – фолио от вътрешната страна на тръбата с високоотражателна способност (до 99,7%) [3]
- Дифузер – служи за равномерното разпределение на светлината в помещението [3]

Приложението на светловоди във вътрешните осветителните уредби (ВОУ) е целесъобразно в много области в съвременното осветление и затова в последните години се наблюдава значителен прогрес в развитието им, и увеличаване на интереса към тях [4].

Предимства на светловодната системата:

1) Екологично чиста технология, не изискваща поддръжка;

2) Светлопредаване 99.7%;

3) Обезпечение на естествено осветление през работния ден от 8 до 17 часа;

4) Енергоспестяващи свойства (минимална топлопроводност) ;

5) Гаранция 10 години и неограничен срок на експлоатация;

6) Не изисква обслужване;

7) Не пропуска влага и замърсяване, което препятства образуването на течове и конденз.

2. МОНТАЖ ВЪРХУ БЕТОНЕН ПОКРИВ, ИЗОЛИРАН С БИТУМНА ХИДРОИЗОЛАЦИЯ

Етапите на изпълнение са следните:

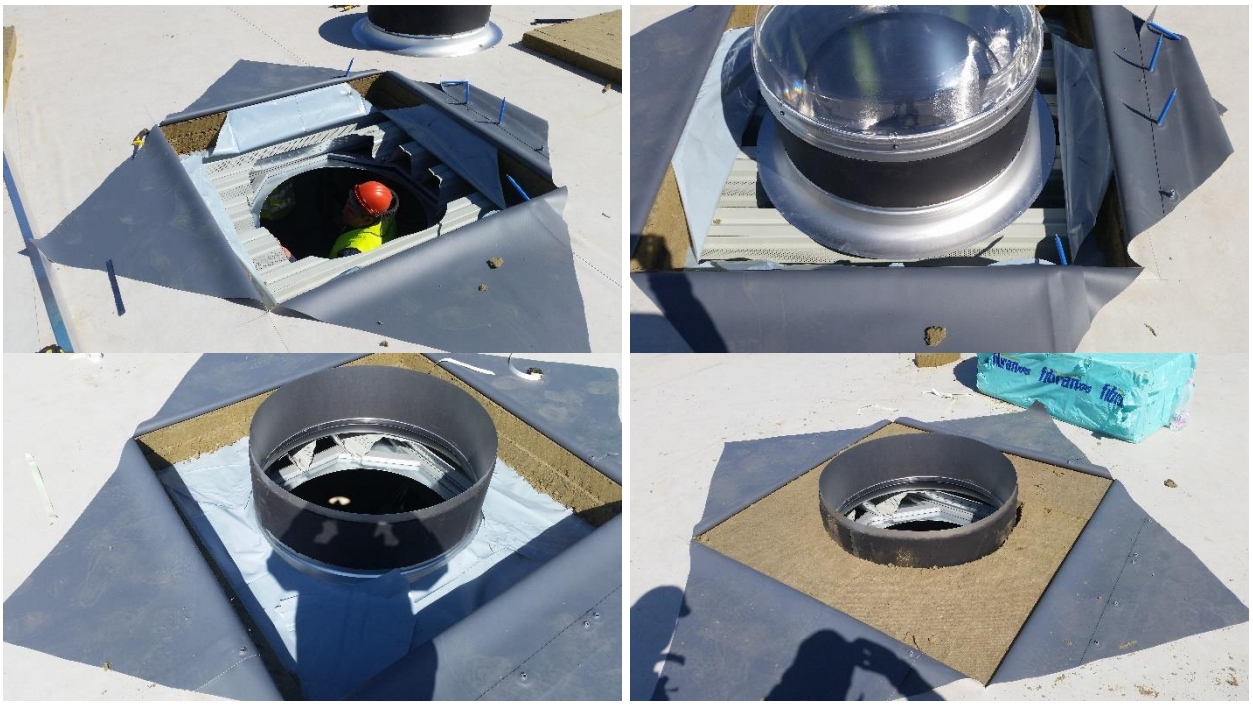
a. Разгръщане на хидроизолацията
b. Направа на необходимия отвор в бетона
c. Монтаж на повдигащата пола
d. Направа на замазка за задаване на наклон
e. Хидроизолиране с течна битумно-каучукова боя
f. Връщане на битумната хидроизолация
g. Полагане на течна битумно-каучокова изолация и поставяне на воал на всяка снадка

h. Монтаж на купола
i. Монтаж на удължаващите тръби
j. Монтаж на дифузера
k. Шпакловане и боядисване

3. МОНТАЖ ВЪРХУ СКАТЕН КЕРЕМИДЕН ПОКРИВ

l. Разкриване на керемидите в зоната на монтаж
m. Направа на необходимия отвор за преминаване на тръбата
n. Монтаж на наклонена повдигаща пола
o. Монтаж на хидроизолационен воал
p. Монтаж на купола
q. Монтаж на керемидите около купола
r. Направа на отвори в етажните плочи
s. Монтаж на удължаващи тръби
t. Монтаж на дифузер
u. Шпакловане и боядисване

4. МОНТИРАНЕ ВЪРХУ ПОСЛОЕН МОНТАЖ (LT ЛАМАРИНА, ВАТА, МЕМБРАНА)



При монтиране върху послоен монтаж се следват следните стъпки:

v. Направа на укрепване на отвора
w. Монтаж на укрепването от долната страна на ламарината
x. Разгръщане на мембраната
y. Отстраняване на ватата и пароизолацията
z. Направа на отвора
aa. Монтаж на повдигаща пола
bb. Възстановяване на пароизолацията
cc. Монтаж на повдигащ ринг
dd. Връщане на ватата
ee. Хидроизолиране с мембрана
ff. Монтаж на светловода
gg. Монтаж на декоративен елемент от долната страна

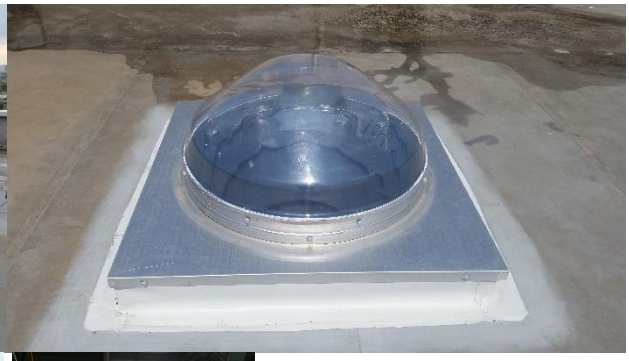
5. МОНТИРАНЕ ВЪРХУ LT ЛАМАРИНА

hh. Направа на укрепване на отвора
ii. Монтаж на укрепването от долната страна
jj. Направа на отвора
kk. Монтаж на повдигаща пола
ll. Монтаж на повдигащ ринг
mm. Монтаж на ламарина от билото до светловода
nn. Хидроизолиране на всички снадки
oo. Монтаж на купола

6. МОНТИРАНЕ ВЪРХУ ПОСЛОЕН МОНТАЖ С КВАДРАТНА ПОЛА

pp. Направа на укрепване на отвора
qq. Монтаж на укрепването от долната страна
rr. Разгръщане на мембраната

ss. Отстраняване на ватата и пароизолацията
tt. Направа на отвора
uu. Монтаж на повдигащ квадратен елемент, топлоизолиран с каменна вата
vv. Възстановяване на пароизолацията
ww. Връщане на ватата
xx. Хидроизолиране с мембрана
yy. Монтаж на светловода
zz. Монтаж на декоративен елемент от долната страна



7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Производителите на светловодни системи предлагат многобройни детайли за монтаж на всякакви видове покриви. При правилен монтаж не се очакват никакви проблеми с течове и на теория живота на такава система е около 30 години [5]. Светловодите са изключително леки, което допълнително улеснява монтажа и същевременно не утежнява покрива [3]. Тъй като имат в пъти по-голям коефициент на полезно действие в сравнение с традиционните покривни куполи, при тях са необходими отвори с до 4 пъти по-малка площ за един и същ светлинен поток. Също така наличието на дифузер спомага за равномерното разпределение на светлината в цялото помещение, което допринася за по-голям комфорт. Монтажът на светловоди се извършва бързо и лесно и по някога дори не се налага спиране на производството.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *http://www.solatube.com/support/federal-tax-credit*
[2] Performance and Daylighting Applications of the Tubular Skylight Proceedings – Lux Europa – Speech at 9th European Lighting Conference Reykjavik 18 – 20 June, pp. 360 – 384, 2001
[3] Avis Technique 6/14-2204
[4] Бракале Дж., Естественное освещение помещение помещений с помощью новой пассивной системы «SOLARSPOT», Светотехника 2005, 5.
[5] Tubular Daylight Guidance System - Technical Report - CIE 173:2006

Автор: Васил Станков, маг. инж., фирма „Advance International EOOD, Sofia, Bulgaria", E-mail address: *v.stankov@aee.bg; v.stankov@outlook.com*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Ива Петринска

РАЗРАБОТВАНЕ НА SCADA СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ НА ЕНЕРГИЙНИЯ ПРОЦЕС В БИЗНЕС СГРАДА – ИЗБОР НА ЕЛЕМЕНТИ И УСТРОЙСТВА

Васил Димитров, Емилия Димитрова

Резюме: *В доклада се разглеждат принципите на проектиране и изграждане на SCADA система за мониторинг на енергийните процеси и контрол на обектите и електрическите съоръжения в модерен бизнес център. Такива системи осигуряват подходящ микроклимат в сградата, стабилно захранване и повишават енергийната ефективност. Дефинирани са функциите и са избрани всички необходими измервателни и контролни устройства. Използвани са съвременни компоненти, разработени от Сименс. Показани са някои възможности за управление на съоръженията в сградата от диспечера. Разработената методология може да бъде приложена при разработване на подобни системи в различни области на индустрията и автоматизацията на сградите.*
Ключови думи: *SCADA системи, интелигентни измервателни устройства, PLC, мрежови анализатори*

DEVELOPMENT OF SCADA SYSTEM FOR ENERGY PROCESS MONITORING AND CONTROL IN BUSINESS CENTER – SELECTION OF ELEMENTS AND DEVICES

Vasil Dimitrov, Emiliya Dimitrova

Abstract: *In this paper, the principles of design and construction of a SCADA system for monitoring of the energy processes and control of objects and electrical devices in a modern business center are examined. Such systems provide the appropriate microclimate in the building, stable power supply and increase energy efficiency. Functions are defined and all necessary measurement and control devices are specified. Contemporary components developed by Siemens are involved. Some possibilities of control on devices in the building by the dispatcher are shown. The described methodology can be applied at design and setup of such a system in different fields of industry and building automation.*
Keywords: *SCADA systems, intelligent measurement devices, PLC, network analyzers*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на технологиите и на измервателната, комуникационната и изчислителната техника създава все по-големи възможности за разработване и внедряване на интегрирани системи за диспечерско управление и мониторинг на конт-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ролираните съоръжения – SCADA системи (Supervisory Control and Data Acquisition Systems). Те изпълняват функции по събиране и обработка на данни от всякакви датчици, разположени в контролираните обекти и съоръжения, изпращане на информацията към контролния център на SCADA системата, представяне на данните в удобна за възприемане от човека форма и регистрирането им на един или няколко носителя с цел документиране и архивиране, подпомагане на операторите при вземането на решения и избор на управляващи въздействия или автоматично изработване на такива, предаване на командите до блоковете, работещи с управляващите устройства, проследяване на изпълнението на управляващите въздействия, задействане на аларми и защити при възникване на критични ситуации и др. [1-4]. От друга страна, създаването на възможност за мониторинг на енергийния процес в съвременна бизнес сграда е от стратегическите елементи на глобалния метод за повишаване на енергийната ефективност, включително задоволяване на изискванията за непрекъснатост на електроснабдяването, оптимално изразходване на електрическа енергия, полесно техническо обслужване [5]. В тази връзка, в доклада се разглежда проектиране и изграждане на SCADA система за мониторинг на енергийните процеси и контрол на обектите и електрическите съоръжения в модерен бизнес център.

Разработваната SCADA система изпълнява следните **основни функции**:

- Автоматизиране на процеса на работа на електросъоръженията в бизнес сградата и осигуряване на подходящ микроклимат;
- Получаване на информация за състоянието на контролираните обекти и нейната обработка с цел представяне в удобна за възприемане форма;
- Наблюдение на енергийния процес;
- Дистанционно управление на съоръженията от диспечерски пункт;
- Гарантиране на електрозахранването на сградата;
- Архивиране на обработените данни.

Системата ще предоставя **възможност за**:

- Предотвратяване на определени нежелани събития чрез анализ и обработка на данните;
- Гарантиране на оптимизирана експлоатация на ел. мрежа в сградата;
- Повишаване на енергийната ефективност, намаляване на разходите.

2. ТЕХНИЧЕСКИ ИЗИСКВАНИЯ

SCADA системата обслужва бизнес сграда на три етажа, в която е предвидено специално помещение за разполагане на контролния център. Предварително е известно разположението на електросъоръженията – климатични и вентилационни системи, осветителни уредби, отоплителни съоръжения, резервни захранвания и др. Една от най-големите ползи от внедряването на SCADA система е създаването на възможност за своевременна детекция и предотвратяване на повреди в инсталацията или неправилна работа на контролирано съоръжение. Освен това, чрез мониторинг на енергийните процеси може да се анализира потреблението на електрическа енергия и да се постигне:

- оптимално управление на осветление, вентилатори, помпи, климатични системи, резервни ел.захранвания и др.,

- корекция на фактора на мощността,

- намаляване на потреблението по време на пиковата тарифа на отчитане,

- статистически анализ на използваното оборудване,

- подобряване ефективността на персонала, отговарящ за експлоатацията на ел. уредба,

- запис на събития и архивиране.

Непрекъснатият мониторинг подпомага операторите да намерят решение при възникнали проблеми и да поддържат в норма контролираните параметри.

3. ИЗБОР НА ИЗМЕРВАТЕЛНИ УСТРОЙСТВА

Постигането на енергийна ефективност изисква измервания на напрежение, ток, фактор на мощността, хармоници и т.н., като резултатите от измерванията да се преобразуват в цифров вид, а от там – в информация. Анализът на получената информация трябва да се използва при вземането на енергоспестяващи мерки. Нивото на обработка на данните влияе на информацията, която може да бъде разбрана от потребителя: способността да се интерпретират данните от потребителя е важно условие при вземане на правилно решение. След това данните директно се свързват с товарите, които консумират електрическа енергия. Качеството на събраните данни започва с измерването: на подходящо място, в подходящо време и в необходимия обем. По същество, измерват се напрежението и тока, а от тези стойности се определят всички останали параметри: мощност, енергия, фактор на мощността, коефициент THD (Total Harmonic Distortion) за оценка на несинусоидалността на тока и напрежението и др. Измерването на хармоничните токове определя степента на разпространение на изкривяванията в различни клонове на мрежата и позволява бързо и сигурно откриване на източника на висши хармоници.

Получената информация е предназначена за следните цели:

• рационално управление на енергийния процес и намаляване на енергийните разходи;

• оптимизиране и увеличаване на срока на експлоатация на различни компоненти, свързани с електрическата мрежа;

• анализ на енергийните потоци – проверка изправността на мрежата, балансираност на товарите, главни потребители, дневни и седмични товарови графици и т.н.;

• локализиране на повреда, анализ на аварийна ситуация и незабавно придвижване на оперативния персонал към района с подходяща резервна част;

• иницииране на своевременно техническо обслужване, като се вземе под внимание използването на електрообзавеждането.

Следователно измервателните устройства, използвани в SCADA системата, трябва да отговарят на следните изисквания:

✓ Възможност за измерване с висока точност на ток, напрежение, честота, мощност (активна, реактивна и пълна), консумирана енергия (активна, реактивна и пълна), фактор на мощността, THD, следене на натрупани часове.

✓ Възможност за създаване на архиви, съдържащи моментни, осреднени, максимални и минимални стойности и отклоненията на тока и напрежението (дисбаланс), THD.

✓ Възможност за комуникация с контролния център.

За изследването на енергийните компоненти в разработваната SCADA система са избрани измервателни устройства на фирмата Siemens (доказана марка на пазара, сравнително ниски цени). Избран е Sentron PAC 3200 – мрежов анализатор среден клас, добро съотношение цена/качество [6]. Обхват на напрежение без измервателни трансформатори е 400V, честота 45 – 64 Hz, има възможност за свързване на токови трансформатори за измерване на ток (x1/ x5 A). Активиране на аларми може да се извърши софтуерно или чрез цифров изход. Техническата спецификация е дадена в общ вид в табл.1, а външният изглед на анализатора с преглед на менютата и възможностите за визуализация на измерваните величини са показани на фиг.1.

4. ИЗБОР НА PLC

Изборът на платформи за автоматизация от последно поколение се стимулира от възможностите, които те предлагат за намаляване на общите производствени разходи. През последните години водещите компании в областта на автоматизацията разработиха програмируеми логически контролери (PLC) с много по-малки габаритни размери в сравнение с моделите отпреди десетилетие, бе

Таблица 1

Технически възможности на Sentron PAC3200

Измервана величина		**точност**
Напрежение	Линейно, Фазно, Средно	0,3%
Ток	За всяка фаза, Среден фазен	0,2%
Активна / реактивна / пълна мощност	За всяка фаза и обща	0,5/0,5/2%
Фактор на мощността	За всяка фаза и общ	
THD на напрежение и ток	За всяка фаза	
Активна, реактивна енергия – 4Q	Консумирана/Върната в мрежата Две тарифи	Class 0,5S ; 2
Пълна (привидна) енергия	Две тарифи	
Мин./Макс. стойности	Напрежение – Линейно, Фазно Честота Ток, Мощност, THD и cos φ – за фаза Средни трифазни стойности на I, U	
Ethernet (вграден интерфейс)	10 Mbit/s; протокол Modbus TCP	
Програмируеми цифрови входове/изходи	1/1 (24 V DC)	

Фиг.1. Общ изглед на Sentron PAC 3200: меню и визуализация на параметри

понижена сложността на свързването им, наложиха се системни решения с разпределено управление и значително се разшириха комуникационните им възможности. Усъвършенстването на използваните софтуерни пакети улесни конфигурирането на контролерите и разшири функционалността им. Тенденции в развитието на PLC-базираното управление са поевтиняване на системата, разширяване на комуникационните ѝ възможности, налагане на отворените системни решения. В разработваната SCADA система са необходими PLC за изпълнение на следните функции:

- осигуряване на връзка между консуматорите и контролния център,
- четене на данни от мрежовите анализатори,
- създаване на архиви и интегриране в SCADA,
- включване и изключване на различни консуматори,
- включване на резервни захранвания (в случая – дизелови агрегат).

Siemens предлага голям набор и от подходящи контролери. Когато се използват устройства на един производител, вероятността за несъвместимост се намалява значително. Най-популярен сред новите поколения е PLC S7-1200. Избран е модел S7 1214C, а основните му параметри са показани в табл.2 [7, 8].

За захранване на контролера е необходимо отделно устройство, предлагано от Siemens – работно напрежение 230 V AC, 47÷63 Hz, изходно напрежение 24 V DC ±3%, 2,5 A; КПД под товар >83 %.

На фиг.2. е показан общ изглед на избраните PLC и захранващ блок.

5. СТРУКТУРА НА SCADA СИСТЕМАТА

Първоначално се дефинира броят програмируеми контролери и мултифункционални измервателни устройства Sentron PAC3200 (фиг.3). В системата са включени по два анализатора на етаж за отделните токови кръгове и един за сървърното помещение, както и 7 броя PLC S7-1214C, захранени чрез съответните блокове. Всеки един мрежов анализатор е свързан независимо от останалите и сле-

ди параметрите на различните консуматори, разположени на отделните етажи. Данните се предават чрез PLC към контролния център и се визуализират на три работни станции.

Към PLC се свързват и необходимите сензори, изпълнителни механизми и интелигентни устройства за мониторинг и управление на съоръженията [9].

Таблица 3

Технически възможности на PLC S7-1214C

Номинално напрежение	24V DC (20,4÷28,8 V)
Памет за програми (защитена)	4 MB / 24 MB с карта памет.
Работна памет	75 kB (2 kB област с данни, която не се губи при отпадане на захранването)
Памет за флагове	8 kB
Бързодействие на процесора: За битови операции: За операции с думи: За операции с плаващи числа:	 min. 0,085 µs; / операция 1,7 µs; / операция 2,3 µs; / операция
Вградени цифрови входове	14 (6 за високочестотни броячи), 24 VDC
Вградени цифрови изходи	10 транзисторни (4 ВЧ – 100 кHz) 24VDC
Товарна способност на изхода	0,5A с резистивен товар, 5W лампа
Входно/изходно адресно пространство	1024 B за входове / 1024 B за изходи
Вградени аналогови входове	2; 0-10 VDC, 625 µs (точност ≥ 10 бита)
Възможности за разширение на контролера	До 3 комуникационни модула 1 разширителна платка 8 входно-изходни модула
Комуникация	Вграден Ethernet порт 10/100 Mb, TCP/IP Вграден Web server със страници
Вграден часовник	Да, с NTP протокол, Време за работа на без захранване >240 ч.

Фиг.2. Общ изглед на PLC S7-1214C DC/DC/DC и съответния захранващ блок.

Фиг.3. Структурна схема на SCADA системата

За повечето входни и изходни точки могат да се установят прагови стойности, при преминаването на които да се задействат аларми и автоматично да се предприемат коригиращи действия. Създадена е, също така, възможност за включване / изключване на консуматорите както автоматично от системата, така и от оператора в контролния център с цел намаляване на потреблението във върховата зона и корекция фактора на мощността, като същевременно се осигурява оптимален микроклимат в помещенията (температура, влажност, осветеност, скорост на движение на въздуха и т.н.). По този начин се повишава енергийната ефективност на сградата. Разположението на съответните контролно-управляващи устройства е предварително известно, като е необходимо да се реализира съответното съгласуване при свързването им към входовете и изходите на PLC.

За осигуряване на непрекъсваемо захранване на контролерите и работните станции са предвидени UPS, а резервното захранване на консуматорите се реализира от дизел-агрегатни системи, разположени на всеки етаж от сградата.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ИЗВОДИ

Разработена е SCADA система за динамично събиране на данни, оценяване на състоянието и реализиране на управляващи въздействия на контролираните технически обекти, разположени на 3 етажа в бизнес сграда. Осигурява се гарантирано електрозахранване и ефективност на работа на съоръженията, както и комфорт в помещенията. Предоставена е възможност за оптимизиране на експлоатацията на електрическата мрежа – техническото лице, по време на мониторинга, веднага може да вземе мерки по отстраняването на възникнали неизправности, както и да извършва управление на процесите с цел повишаване на енергийната ефективност.

Системата е в процес на надграждане и допълване. Последователността на разработване дава цялостната методология за синтез на структурата на система за мониторинг и управление с конкретна практическа реализация в зависимост от зададените функции и може да се използва при разработване на подобни системи в различни сфери на индустрията.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Горанов Е., Е. Димитрова (2010), ***Системи за дистанционен контрол и управление в транспорта***, София, ВТУ

[2] Димитрова Е. (2016), ***Управление и контрол на пространствено разсредоточени обекти в транспорта и енергетиката***, Монография, Годишник на ВТУ „Т. Каблешков", София, ISSN 1314-362X, бр. 7

[3] ***Съвременни SCADA системи***, сп. "Инженеринг ревю", бр.5/2017, стр. 34-38

[4] Петров П. (2013), ***SCADA системи в енергетиката***, "Енергия – Списание за оборудване, технологии и инженеринг", година V, бр. 6, стр.50-55

[5] *Building Technologies: The future of building management,* Siemens, 2014

[6] *PAC 3200 – operation manual*, Siemens, 2011

[7] *SIMATIC S7-1200 – Function Manual*, Siemens, 2013

[8] *SIMATIC S7-1200 – Technical Specification*, Siemens, 2017

[9] Dimitrova E. (2016), ***Building automation and control systems***, Acad. journal "MTC", ISSN 1312-3823, Vol. 14, 3/2, art. ID:1395

Автори: Васил Димитров Димитров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков" - София, E-mail address: *vdimitroff@abv.bg ;* **Емилия Андонова Димитрова**, доц. д-р инж., катедра „Съобщителна и осигурителна техника и системи", ВТУ „Тодор Каблешков" - София, E-mail address: *edimitrova@bitex.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Николай Матанов

СОФТУЕР ЗА КОНФИГУРАЦИЯ И НАСТРОЙКА НА SCADA-СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ НА ЕНЕРГИЙНИЯ ПРОЦЕС В БИЗНЕС-СГРАДА

Васил Димитров, Петко Костадинов

Резюме: *В доклада е представена методология за конфигуриране и настройка на SCADA система за мониторинг и управление на енергийния процес в модерен бизнес център с помощта на технологичната платформа за напълно интегрираната автоматизация TIA Portal. Дефинирани са три работни станции, програмни устройства за връзка с контролираните съоръжения и мултифункционална измервателна апаратура. Извършена е конкретна настройка на системите за измерване, контрол и управление с помощта на специализиран софтуер за съответните приложения, както и конфигурация на мрежата. Представен е графичен интерфейс за визуализация на информацията в контролния център и за поддържане на диалога с операторите.*
Ключови думи: *SCADA системи, PLC, мрежови анализатори, TIA portal*

SOFTWARE FOR CONFIGURATION AND SETTING OF SCADA SYSTEM FOR ENERGY PROCESS MONITORING AND CONTROL IN BUSINESS CENTER

Vasil Dimitrov, Petko Kostadinov

Abstract: *The paper presents a methodology for programming and setting a SCADA system for energy process monitoring and control in a modern business center using the Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) software environment. Three workstations, controllers and multifunctional measuring equipment are defined. A specific setup of measurement, control and management systems has been implemented with specialized software for the relevant applications as well as network configuration. There is a graphical interface for visualizing the information in the control center and for maintaining the dialogue with the operators.*
Keywords: *SCADA systems, PLC, network analyzers, TIA portal*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

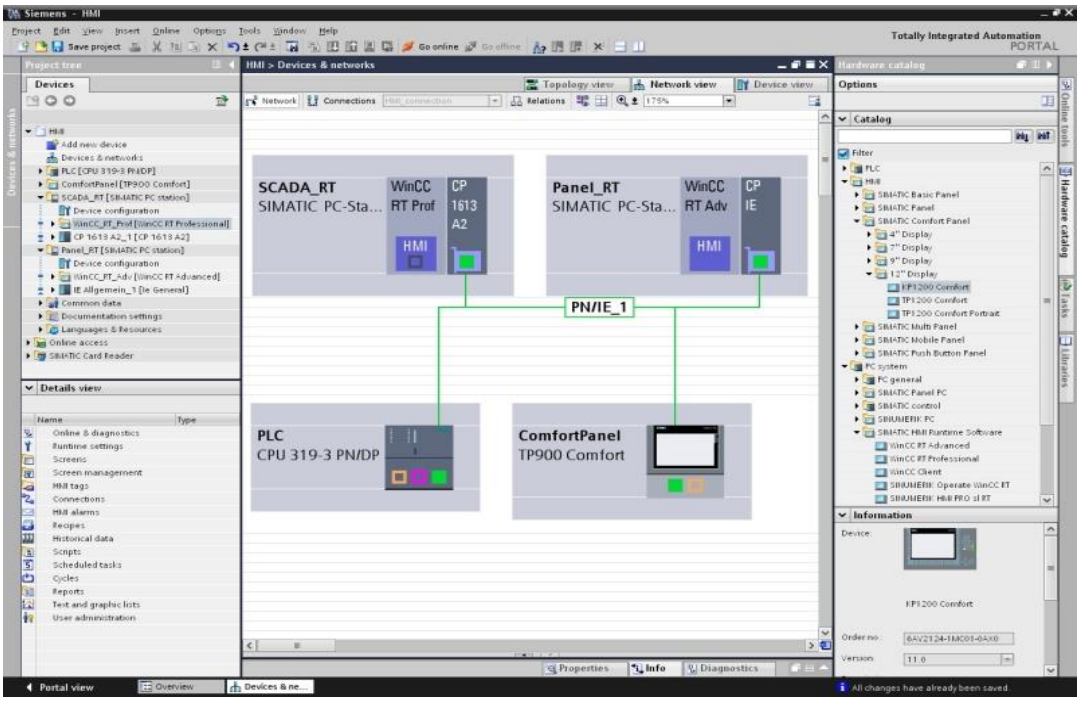
Разработена е SCADA система за динамично събиране на данни, оценяване на състоянието и реализиране на управляващи въздействия на контролираните технически обекти, разположени на 3 етажа в модерен бизнес център [1]. Системата осигурява гарантирано електрозахранване и ефективна работа на съоръженията, както и комфорт в помещенията. Дефинирани са функциите и са изб-

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

рани измервателни и контролно-управляващи устройства, като са използвани съвременни компоненти, разработени от Сименс [2].

В настоящия доклад се извършва програмиране и настройка на системата и избраното оборудване, като се използва развойна среда, включена в технологичната платформа за напълно интегрирана автоматизация TIA Portal (Totally Integrated Automation), предлагана от фирмата – производител [3, 4]. Тя е оптимално пригодена за всички изисквания и е отворена за международните стандарти. Със системните си характеристики TIA Portal предлага цялостни решения за всеки сегмент в автоматизацията на базата на обширен обхват от продукти: интегрира в себе си развойни среди Simatic Step7 за програмиране на контролери, Simatic WinCC за разработване на човеко-машинен интерфейс (HMI) с цел визуализация върху панели или компютърни работни станции, предлага функции за диагностика и управление на енергийните процеси и др. (фиг.1).



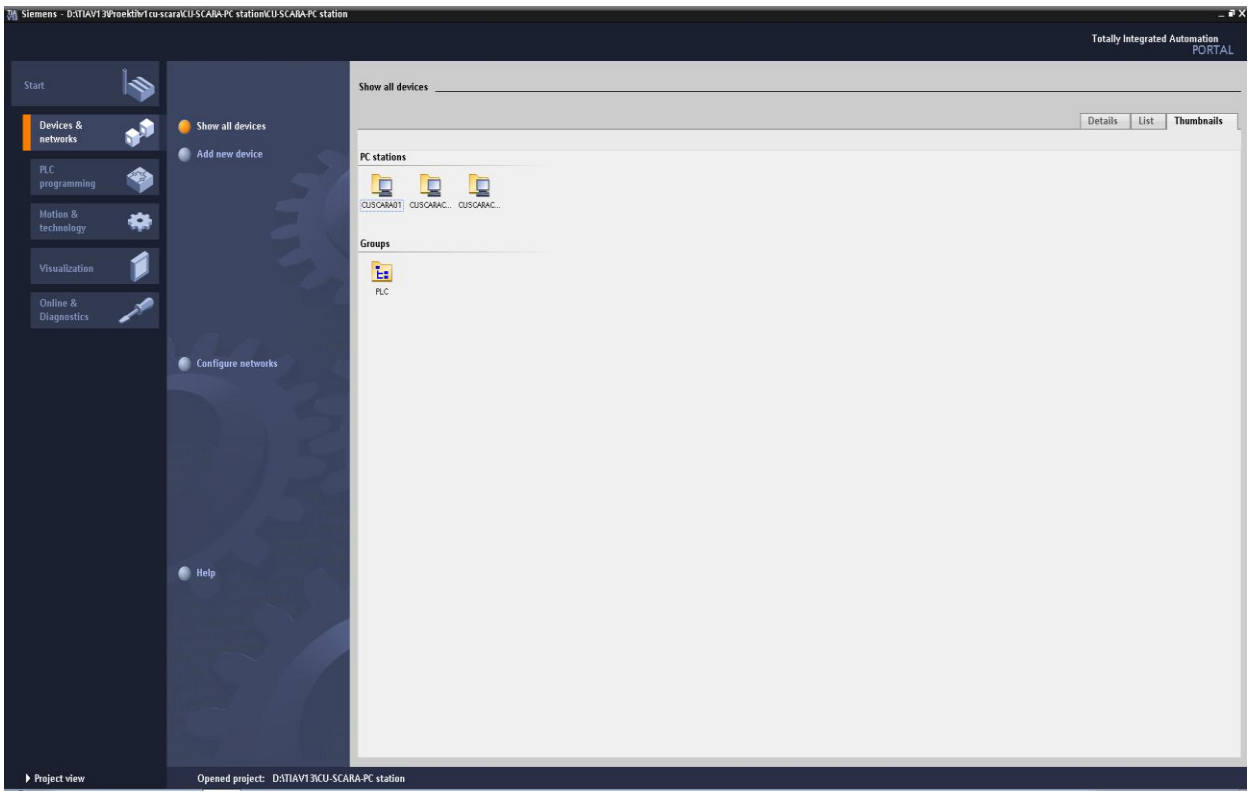
Фиг.1. Софтуерна среда за програмиране TIA Portal.

2. СЪЗДАВАНЕ НА РАБОТЕН ПРОЕКТ

Изграждането и настройката на SCADA системата се извършва последователно, с помощта на софтуерната развойна среда TIA Portal. Най-напред се създава работен проект (фиг.2), в който се дефинират и създават програмни устройства (фиг.3). В системата са предвидени 7 на брой PLC S7-1214C, с подходящ захранващ модул [1].

Към мрежовата система са включени мултифункционални измервателни устройства Sentron PAC3200 (също 7 на брой) – с тях се следят енергийните параметри на различните консуматори, разположени на отделните етажи.

Дефинират се и три работни станции – един сървър и 2 клиента.



Фиг.2. Създаване на работен проект.

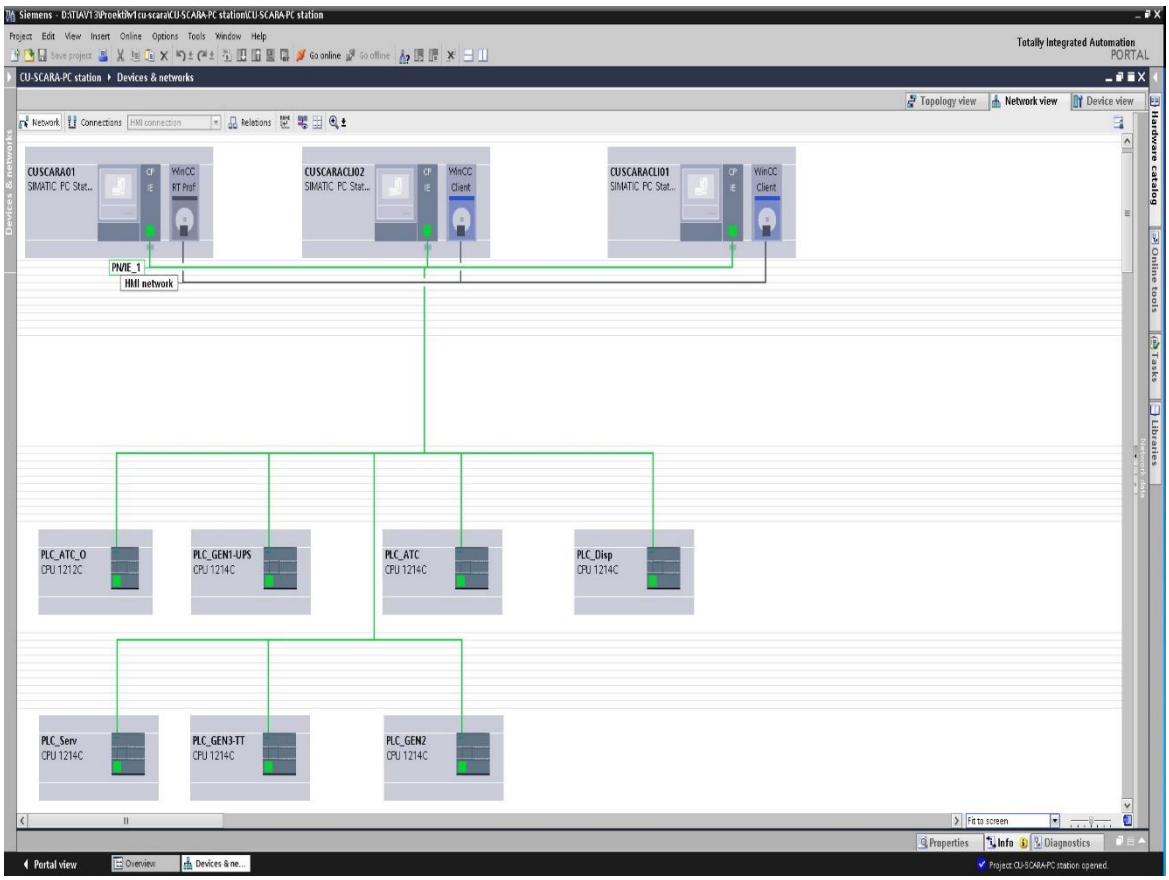
Във всяка работна станция се дефинират мрежова платка за комуникация чрез Ethernet порт и съответният Win CC пакет – сървър или клиент.

3. КОНФИГУРАЦИЯ НА МРЕЖАТА

След като вече има изградени сървър и клиентски станции, се пристъпва към създаването и конфигурацията на цялата мрежа, а именно – мрежово адресиране на контролерите. Всеки един от използваните PLC S7-1200 се идентифицира с уникален IP адрес в мрежовото пространство, а всички контролери са обединени в една мрежова топология (фиг.3).

При конфигурирането на PLC S7-1200 се задават необходимите IP адрес, subnet mask и рутер адрес, за да става възможно осигуряването на отдалечен достъп. Конфигурират се входно изходните параметри, синхронизацията, разрешаването на Web server interface, като има възможност да се включат допълнителни входно-изходни или комуникационни модули, когато това е необходимо. Предимството на този контролер е, че разполага с достатъчно на брой цифрови входове и изходи, както и два аналогови входа.

Връзката между отделните контролери и мрежовите анализатори Sentron PAC 3200 се осъществява с помощта на комуникационен блок Modbus client. Всеки един такъв блок се изисква по отделно за конкретния случай, като се конфигурират различни параметри, включващи режима на работа (четене или запис), размера на информацията при четене/запис (брой байтове), както и адресиране на пространството, откъдето се осъществява самото четене/запис.



Фиг.3. Мрежова топология на SCADA системата.

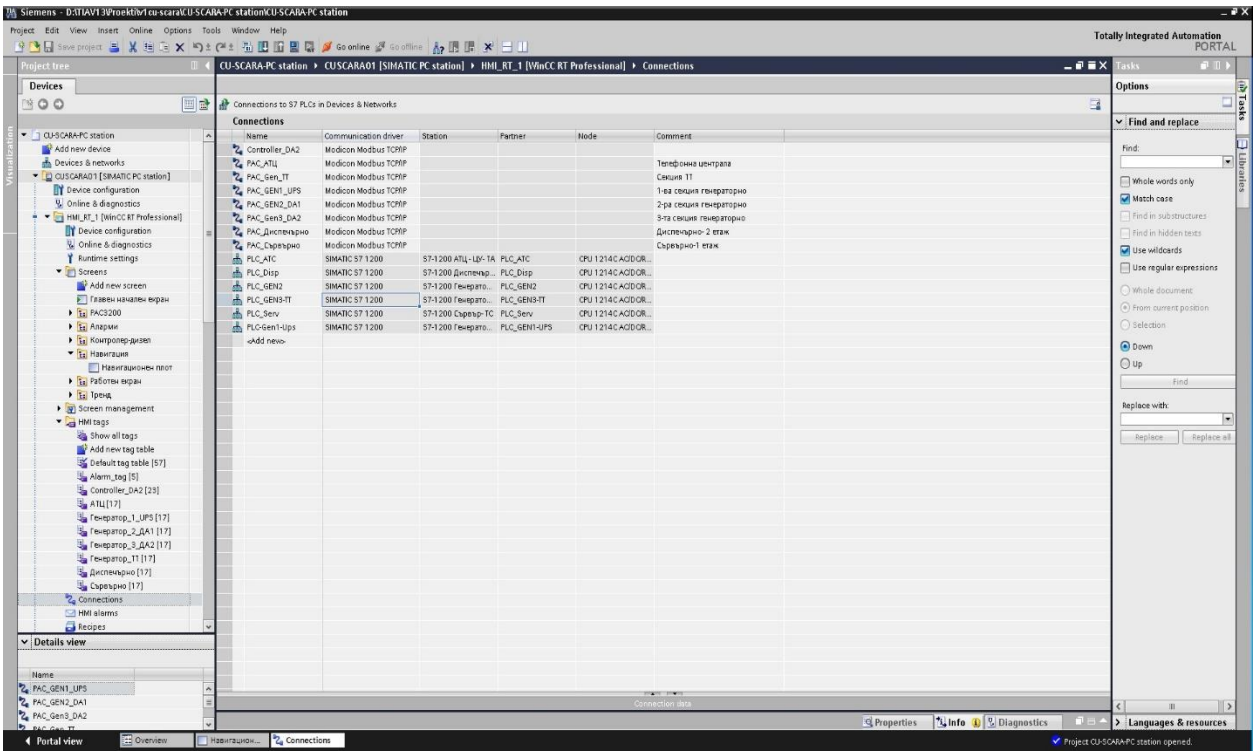
Конкретната настройка както на системата за измерване, така и системата за контрол, се извършва с помощта на специализиран програмен софтуер, пригоден за нуждите на приложенията.

След като са конфигурирани компютърните станции и са настроени съответните контролери S7-1200, с помощта на мрежовата се свързват трите клиентски компютъра, мрежовите анализатори и контролерите (фиг.4).

4. ГРАФИЧЕН ИНТЕРФЕЙС

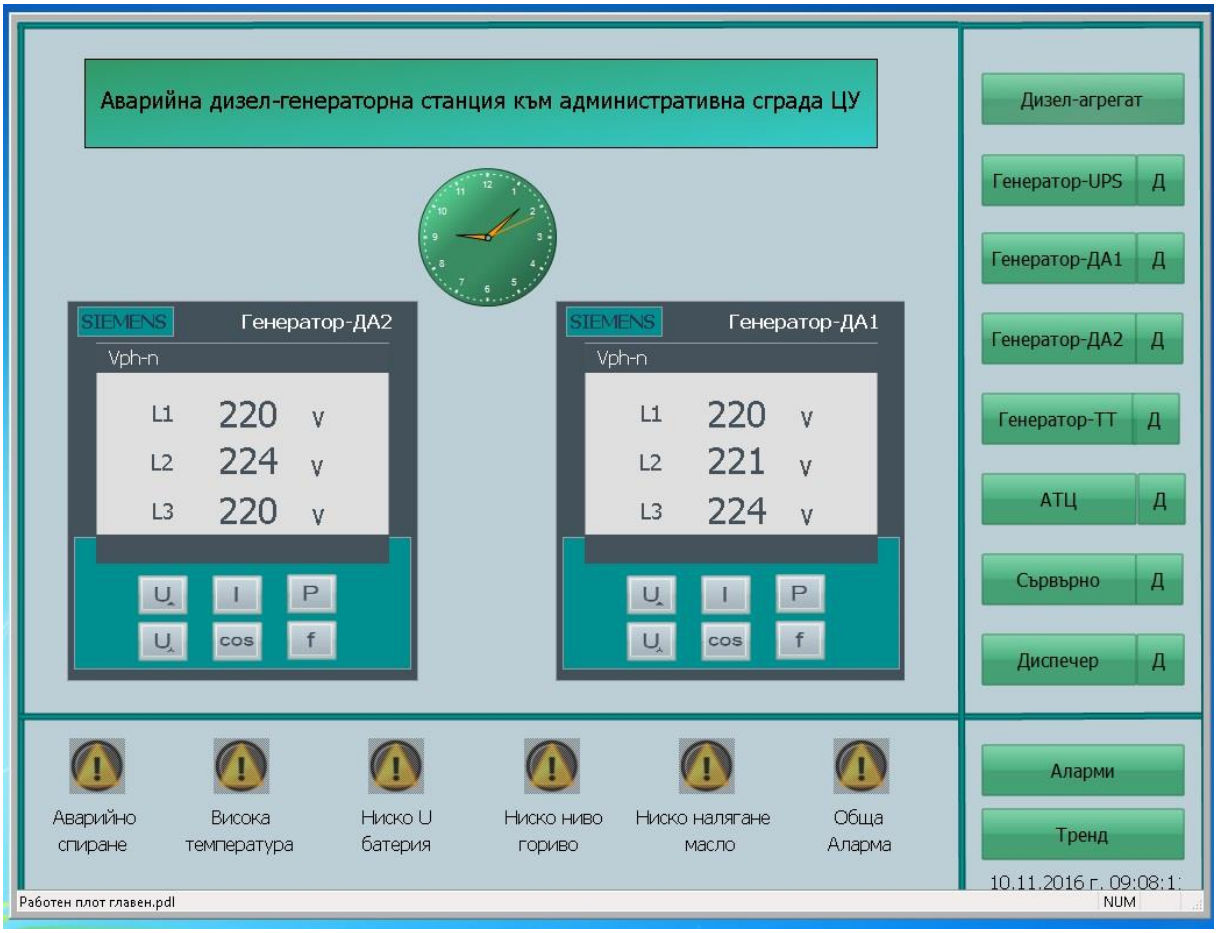
Важна функция на SCADA е представянето на данните за операторите и поддържането на диалога с тях. Въпреки че всяко от устройствата в системата може да има вградени средства за комуникация с персонала като индикатори, ключове, малки клавиатури и др., основната част от презентацията на данните се извършва в контролния център. Чрез нея операторите имат достъп до всички устройства в системата, могат да наблюдават всички входове и да управляват всички изходи. Графичният интерфейс се управлява с менюта и включва лесни за разбиране и донякъде стандартизирани изображения на процесите, които се наблюдават в системата. Изображенията могат да покажат местата на датчиците и изпълнителните механизми в сградата и близо до тях да показват текущите, целевите и праговите стойности на величините [5-7]. Главната станция може да включва и елементите на изкуствен интелект, за да поддържа управлението на системата в зададените стойности.

Главният екран на SCADA системата е показан на фиг.5.



Фиг.4. Обвързване на устройствата в SCADA системата.

Предоставена е възможност за мониторинг на два мрежови анализатора PAC 3200, които се избират от навигационното меню вдясно.



Фиг.5. Главен екран на SCADA системата.

С помощта на функционалните бутони на всеки анализатор може да се превключва визуализацията на различните параметри на сградната инсталация като ток, напрежение, мощност, cosφ и др. Предвидени са предупредителни аларми в случай на повреда (в долната част на екрана). До тях вдясно се намират бутони „Аларми“ и „Тренд“ – за проверка на отминали и непотвърдени аларми и за графична визуализация на параметрите на Sentron PAC 3200.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представена е методология за конфигуриране и настройка на SCADA система в модерен бизнес център с помощта на технологичната платформа TIA Portal. Осигурена е визуализация на параметрите на контролираните електросъоръжения, както и включване на аварийно захранване (дизел агрегат) при отпадане на мрежовото напрежение. Предвидени са и допълнителни аларми в случай, че даден параметър е извън предварително зададени прагови стойности или при повреда. Основната функция на SCADA системата е получаването на данни от устройствата и осигуряване на възможности за цялостен контрол на системата от разстояние посредством софтуерна платформа. Тя обезпечава и локален контрол на процесите, така че съоръженията да се включват и изключват автоматично в подходящо време, допълвайки стратегията за отдалечено управление, събиране на данни и регистриране на различни събития.

Методологията може да се използва при инсталиране и настройка на подобни системи в различни сфери.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Димитров В., Е. Димитрова (2017), ***Разработване на SCADA система за мониторинг и управление на енергийния процес в бизнес сграда - избор на елементи и устройства***, IX научна конференция „ЕФ 2017”

[2] *Building Technologies: The future of building management,* Siemens, 2014

[3] ***Totally Integrated Automation TIA-Portal,*** Siemens, available at: *https://www.siemens.com*

[4] ***Новата версия 14 на TIA Portal от Siemens,*** available at: *www.инженер.bg*

[5] ***Съвременни SCADA системи***, сп. “Инженеринг ревю”, бр.5/2017, стр. 34-38

[6] Димитрова Е. (2016), ***Концептуално описание на процесите на дистанционно управление и мониторинг на подвижни обекти***, Н. сп. “Механика, Транспорт, Комуникации”, ISSN 1312-3823, т. 14, бр. 3/2, стр. XI-22 – XI-25

[7] Dimitrova E. (2016), ***Building automation and control systems***, Acad. journal “MTC”, ISSN 1312-3823, Vol. 14, 3/2, art. ID:1395

Автори: Васил Димитров Димитров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков“ - София, E-mail address: *vdimitroff@abv.bg;* **Петко Георгиев Костадинов**, докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”,

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Николай Матанов

СИСТЕМА ЗА ОСИГУРЯВАНЕ НА РЕЗЕРВНО ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ НА БИЗНЕС СГРАДА

Васил Димитров, Гюлек Неджиб

Резюме: *В доклада е разработена система за дистанционно управление и мониторинг на аварийна дизел-агрегатна система, която реализира резервно захранване на модерен бизнес център на три етажа, извършена е конфигурация и настройка на системата. Осигуряват се автоматично и ръчно включване на резервното захранване, визуализация на параметрите на агрегатите в контролния център и изработване на аларми.*
Ключови думи: *резервно електрозахранване, SCADA система*

SYSTEM FOR PROVIDING BACKUP POWER SUPPLY OF BUSINESS CENTER

Vasil Dimitrov, Gyulek Nedzhib

Abstract: *In this paper, a system for remote control and monitoring of an emergency diesel-aggregate system, which implements a backup power supply to a modern business center on three floors, has been developed. System configuration and setup are performed. Automatic and manual switching of the backup power supply, as well as monitoring of the aggregates parameters in the control center and making alarms have been assured.*
Keywords: *backup power supply, SCADA system*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В статията е разработена система за управление и мониторинг на аварийни дизелови агрегати, които осигуряват резервно захранване на триетажна бизнес сграда [1]. Предвидени са три дизелови агрегата и е реализирана система за дистанционен контрол на състоянието им, както и възможност за автоматично и ръчно включване – от системата при отпадане на основното електрозахранване или от операторите в контролния център при необходимост.

2. СТРУКТУРА НА СИСТЕМАТА

Основни елементи в SCADA системата са мрежови анализатори Sentron PAC3200 и програмируеми логически контролери PLC S7 1200, с помощта на които се наблюдава състоянието на дизеловите агрегати [1 – 6].

Мултифункционалният измервателен уред Sentron PAC3200 на Siemens предоставя възможност за мониторинг на параметрите на електрическата енергия и из-

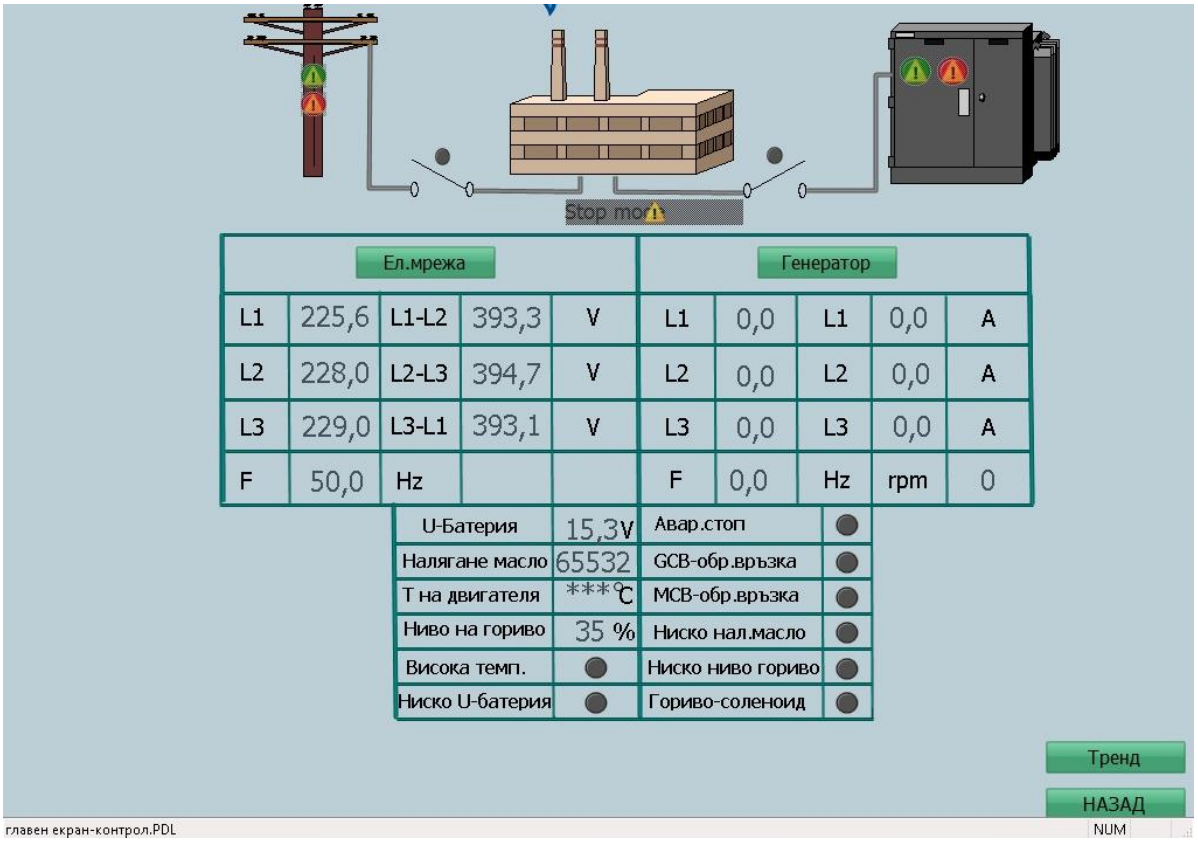
© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

пращане на данни в реално време, като се използва вграденият Ethernet порт и протокол Modbus TCP със скорост на предаване 10 Mb/s. Такива уреди масово се използват в съвременните системи за дистанционен мониторинг и управление на енергийните процеси в промишлеността и енергетиката, предлагат възможност за внедряване към SCADA системи [2, 3].

Основната функция на контролерите е да следят мрежовото напрежение (от PAC3200) и в случай на отпадане на някоя фаза да включват аварийното захранване – съответния дизел агрегат.

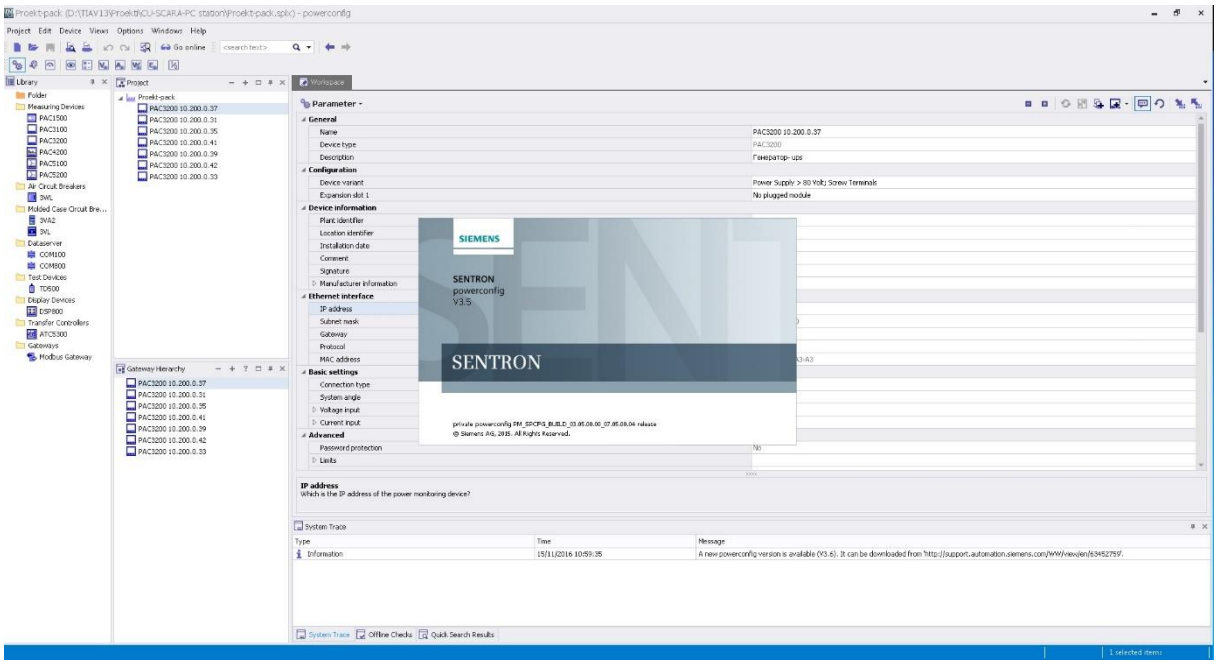
Главният екран, с помощта на който диспечерът може да следи основните параметри на даден агрегат, е показан на фиг.1. Визуализират се токовете, напреженията (линейни и фазни) и честотата на мрежовото захранване, както и параметрите на агрегата: токове и напрежения на трите фази на генератора, честота, скорост на въртене, напрежение на акумулатора, налягане на маслото, температура на двигателя и ниво на горивото. Предвиден е автоматичен пуск на аварийния агрегата при отпадането на захранването от мрежата, както и допълнителни аларми в случай на повреда от страна на двигателя. Ако диспечерът прецени, има възможност за ръчен пуск на резервното захранване с помощта на телеуправляемия прекъсвач, намиращ се горе вдясно на екрана. Съответно този отляво е за включване към захранване от мрежата, като програмно е реализиран алгоритъм на превключванията, както и блокировка, която не позволява едновременното включване на двата прекъсвача.



Фиг.1. Главен екран на системата „Дизел-агрегат“.

3. КОНФИГУРИРАНЕ НА SENTRON PAC3200

Предварителната настройка на мрежовите анализатори е задължителна за правилната им работа и за осигуряване на ефективно измерване. За целта се използва специализиран софтуер “Powerconfig” (фиг.2), който е включен в технологичната платформа за напълно интегрирана автоматизация TIA Portal (Totally Integrated Automation), с която се извършва конфигурацията и настройката на SCADA системата [7, 8].

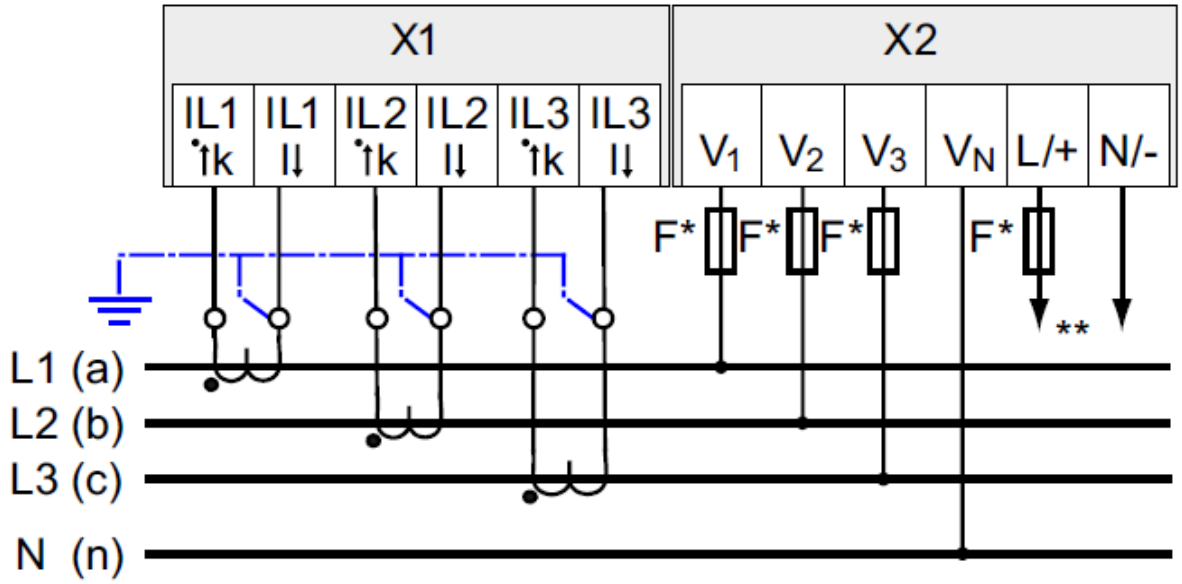


Фиг.2. Конфигуриране на Sentron PAC3200.

С помощта на „Powerconfig” се уточняват схемата на свързване и обхватите на измерване в зависимост от използваните токови и напреженови трансформатори, ако са включени в системата. Има възможност за избор на език на менюто и за настройка на дисплея (контраст, осветеност и др.). Може да се въведе и защитна парола за достъп до уреда [9].

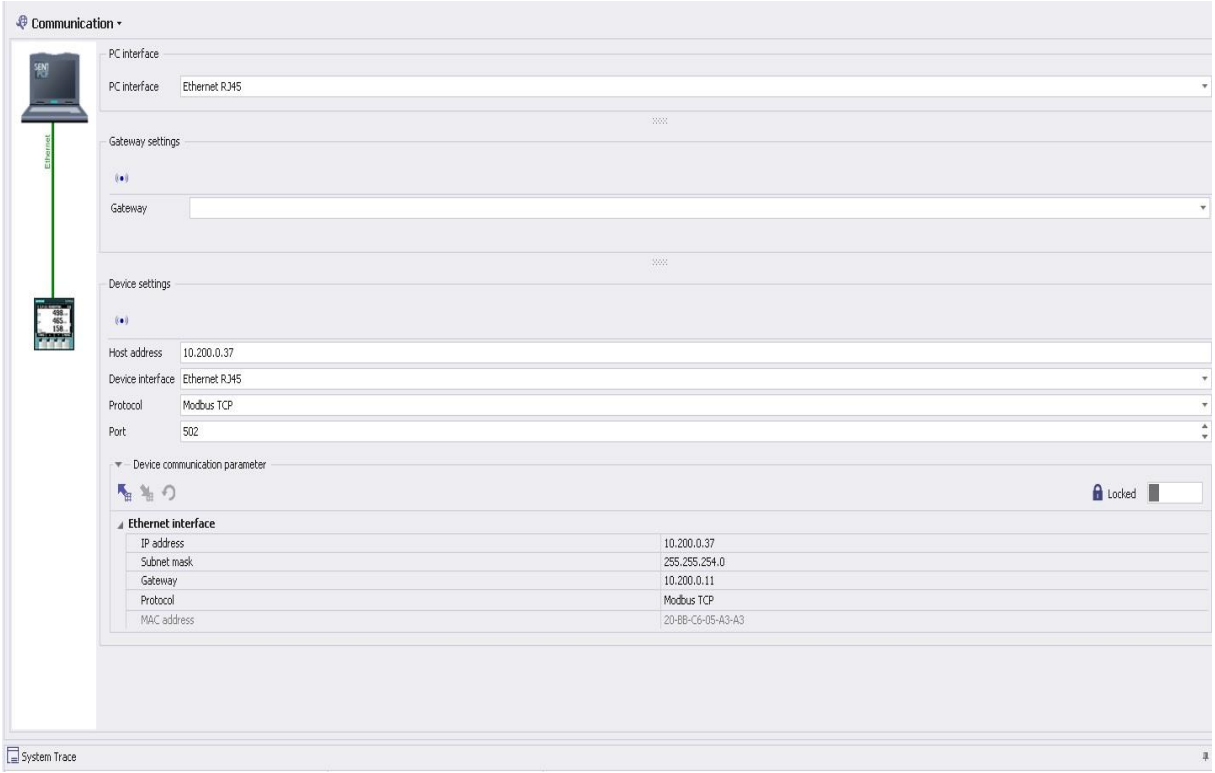
Поради спецификата на работа и обхвата на измерване, най-подходящ в конкретния случай е схема на свързване с три токови трансформатора (към клеморед X1, като е важно да се спази обозначената посока на тока) и без напреженови, тъй като консумираната мощност е голяма, а напрежението на отделните фази е не по-голямо от 230 V (директно свързване на клемореда X2 към мрежата – измервателните клеми V_1, V_2, V_3 и V_N – към трите фази и нулевия проводник, клемите за захранване на уреда L/+ N/- – към фаза и нула). Не е задължително поставянето на предпазителите F [3].

Следователно, в менюто за настройка в софтуера „Powerconfig” трябва да се уточни коефициентът на преобразуване на токовите трансформатори и да се избере начин на свързване 3P4W – 3 фазна, 4 проводна мрежа, небалансиран товар, без напреженови трансформатори. Има възможност за задаване на прагови стойности на величините, които да се обвържат с изработване на аларми.



Фиг.3. Схема на свързване на Sentron PAC3200.

Комуникацията на Sentron PAC3200 с контролния център се осъществява посредством Ethernet порт, който е вграден в този мрежов анализатор. Трансферът на данни е посредством Modbus TCP/IP. Всяко устройство в Modbus мрежата получава уникален адрес (фиг.4). Настройката на комуникацията може да се извърши в софтуера „Powerconfig", като за всеки уред се дефинират IP адрес, Subnet mask, Gateway адрес и използваният протокол (Modbus TCP). При правилната настройка се осигурява предаване на информация в реално време към контролния център за стойностите на измерваните величини.

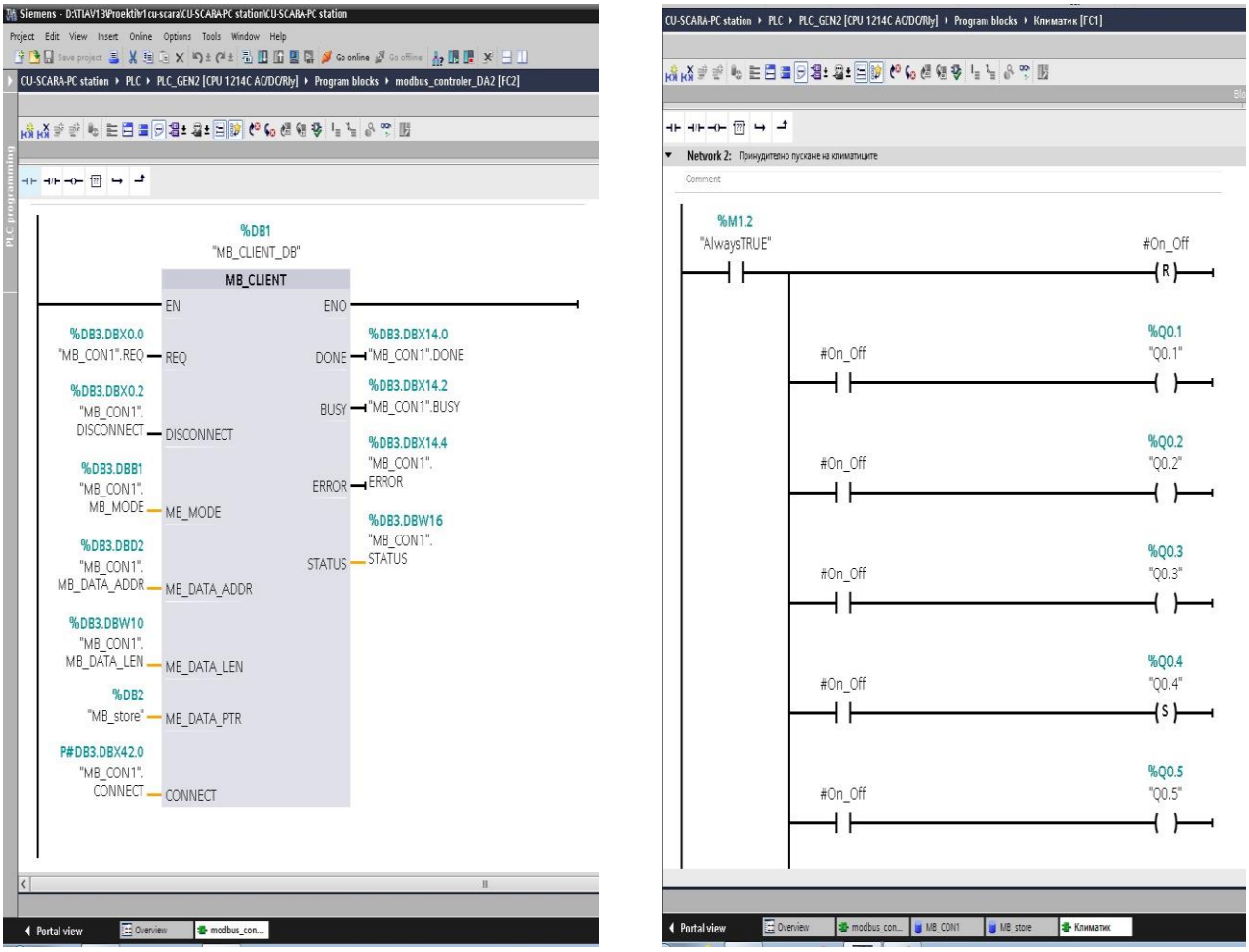


Фиг.4. Конфигуриране на комуникация на Sentron PAC3200.

4. КОНФИГУРИРАНЕ НА PLC

Комуникация между мрежовите анализатори PAC3200 и съответния PLC се осъществява с помощта на основния комуникационен блок в технологичната платформа TIA Portal – т.нар. Modbus client (фиг.5). Всеки един такъв блок се изисква по отделно за конкретния случай, като се конфигурират различни параметри, включващи режима на работа (четене или запис), размера на информацията при четене/запис (брой байтове), както и адресиране на пространството, откъдето се осъществява самото четене/запис [4, 5, 7, 8]. Този блок разполага и с тагове (аларми), отговарящи на статуса и грешките, които възникват при работата на PAC 3200, за да може техническото лице, по време на мониторинга, веднага да вземе конкретните мерки по отстраняването им [6].

Функциите на контролерите по управление на консуматорите и включване на аварийното захранване се осигуряват чрез въвеждане на алгоритъм в развойната среда Simatic Step7 за програмиране на PLC: когато се установи „1“ на даден изход на контролера се подава сигнал към контактор или реле за съответния консуматор. В Ethernet мрежи всяко устройство може да инициира команда, в която се съдържа и адреса на устройството, за което е предназначена. По този начин се задейства само то, въпреки че и други устройства могат да я получат.



Фиг.5. Създаване на комуникационен блок
и на алгоритъм за включване / изключване на консуматори в
технологичната платформа за напълно интегрирана автоматизация TIA Portal.

Всички Modbus устройства преминават през проверка на данните, които гарантират, че командите ще пристигнат без изменение. Възможните грешки по време на обмена са свързани с изкривяване на информацията при предаване и логически грешки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ИЗВОДИ

Разработената система осигурява дистанционен мониторинг и автоматично управление на дизелови агрегати, които се използват за резервно захранване на бизнес център. Инсталираните в системата PLC S7 1200 следят мрежовото напрежение чрез мултифункционални измервателни уреди Sentron PAC3200 и в случай на отпадане на някоя фаза подават команда за включване на аварийното захранване – съответния дизел агрегат. Осигурена е визуализация на параметрите в контролния център: токове, напрежения и честота (на агрегатите и на захранването от мрежата), напрежение на акумулатора, налягане на масло, температура на двигателите, скорост на въртене, ниво на горивото и др. Предвидени са и допълнителни аларми в случай на повреда от страна на двигател или превишаване на прагови стойности на параметрите.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Димитров В., Е. Димитрова (2017), ***Разработване на SCADA система за мониторинг и управление на енергийния процес в бизнес сграда - избор на елементи и устройства***, IX научна конференция „ЕФ 2017”

[2] *Building Technologies: The future of building management,* Siemens, 2014

[3] *PAC 3200 – operation manual*, Siemens, 2011

[4] *SIMATIC S7-1200 – Function Manual*, Siemens, 2013

[5] *SIMATIC S7-1200 – Technical Specification*, Siemens, 2017

[6] Dimitrova E. (2016), ***Building automation and control systems***, Acad. Journal “MTC”, ISSN 1312-3823, Vol. 14, 3/2, art. ID:1395

[7] ***Totally Integrated Automation TIA-Portal,*** Siemens, available at: *https://www.siemens.com*

[8] ***Новата версия 14 на TIA Portal от Siemens,*** available at: *www.инженер.bg*

[9]*http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/en/lv/portfolio/pages/powerconfig.aspx*

Автори: Васил Димитров Димитров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков“ - София, E-mail address: *vdimitroff@abv.bg;* **Гюлек Решад Неджиб**, инж. докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”- София

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: д-р инж. Борислав Бойчев

ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЕНИЕ И МОНИТОРИНГ НА АВАРИЙНА ДИЗЕЛ-АГРЕГАТНА СИСТЕМА В БИЗНЕС-СГРАДА

Васил Димитров

Резюме: *В доклада се разглежда система за дистанционен мониторинг и управление на дизелови агрегати за осигуряване на резервно захранване на бизнес сграда с цел оценяване на състоянието в реално време и своевременно реализиране на управляващи въздействия. Осигурени са следните функции: извеждане на съобщения, изработка на аларми, архивиране на събития, цифрова и графична визуализация на параметрите, включително създаване на таблици, построяване на графики и документиране на данни, проверка за отминали и непотвърдени аларми и др.*
Ключови думи: *резервно електрозахранване, SCADA система*

REMOTE MANAGEMENT AND MONITORING OF AN EMERGENCY DIESEL-AGGREGATE SYSTEM IN BUSINESS CENTER

Vasil Dimitrov

Abstract: *The report examines a system for remote monitoring and control of diesel aggregates, which provide a back-up power supply to a business building, to real-time condition assess and timely implement of control impacts. The following functions have been assured: messaging, alarm generation, events archiving, digital and graphical visualization of parameters, including creating tables, plotting graphs and documenting data, checking for past and unverified alarms, etc.*
Keywords: *backup power supply, SCADA system*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Разработената система предоставя възможности за дистанционен мониторинг и управление (автоматично и ръчно включване) на три аварийни дизелови агрегата, които осигуряват резервно захранване на бизнес сграда [1]. Мрежовото напрежение се измерва от мултифункционални уреди Sentron PAC3200 и се следи с помощта на програмируеми логически контролери S7 1200, които подават команда за включване при необходимост на съответния дизелов агрегат. В настоящия доклад се разглеждат възможностите на системата за визуализация в контролния център на състоянието на агрегатите, своевременно информиране за възникнали събития, осигуряване на възможности за дистанционно управление от операторите и безопасно изпълняване на последователност от операции при превключвания. Системата позволява бързо локализиране на повредата при

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

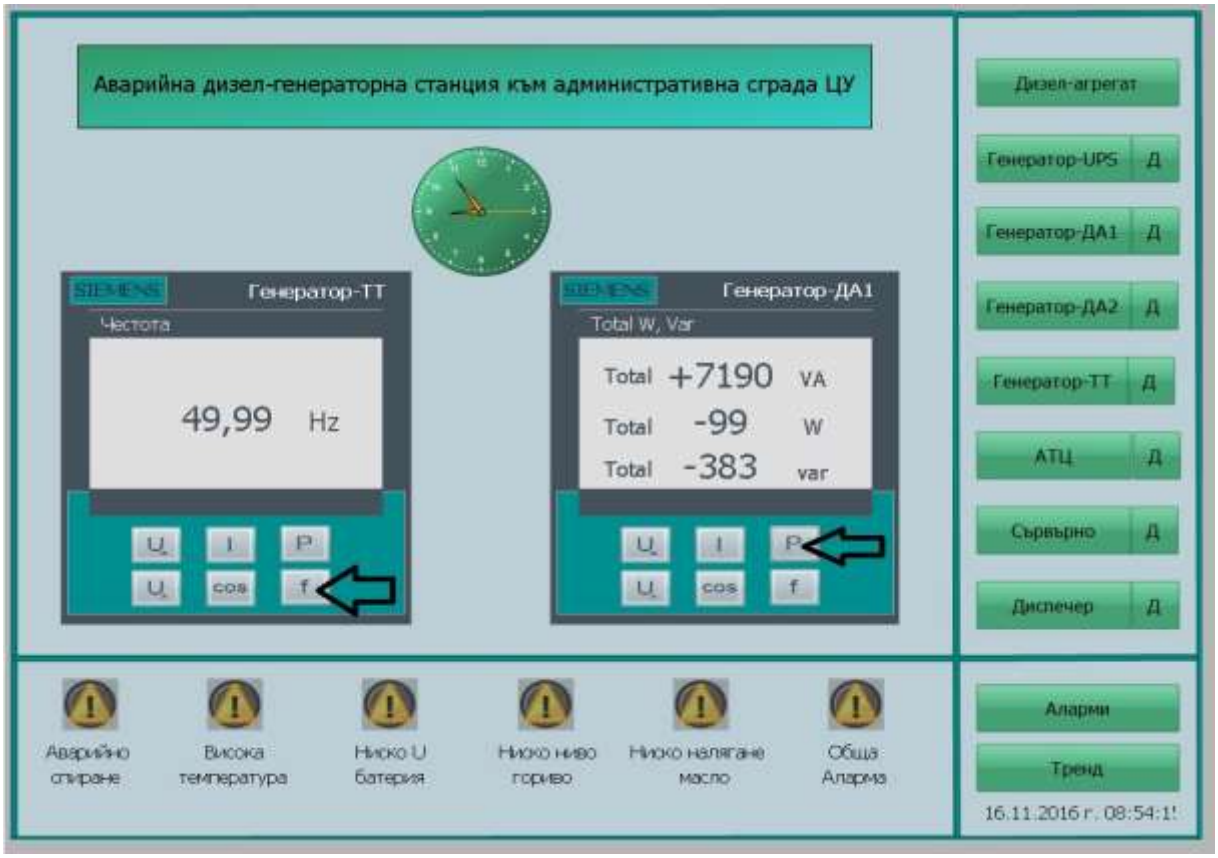
ISSN 1311-0829

възникване на аварийната ситуация, иницииране на своевременно техническо обслужване, както и извършването на анализ на енергийните потоци (проверка изправността на мрежата, балансираност на товарите и създаването на товарови графици и др.)

2. ГЛАВЕН ЕКРАН НА SCADA СИСТЕМАТА

Главният екран на системата предоставя възможност за мониторинг на два мрежови анализатора PAC 3200, които се избират от навигационно меню (фиг.1). Уредите могат да предоставят информация в реално време за параметрите на трифазна мрежа:

- Фазно и линейно напрежение за всяка фаза – $U_{1\text{-}n}$ / $U_{2\text{-}n}$ / $U_{3\text{-}n}$ / $U_{1\text{-}2}$ / $U_{2\text{-}3}$ / $U_{3\text{-}1}$), коефициент на дисбаланс и Честота f;
- Ток за всяка фаза – I_1 / I_2 / I_3;
- Активна мощност – консумирана и върната (за всяка фаза - $\pm P_1$ / $\pm P_2$ / $\pm P_3$ и обща $\pm P_{total}$);
- Реактивна мощност (за всяка фаза - $\pm Q_1$ / $\pm Q_2$ / $\pm Q_3$ и обща $\pm Q_{total}$);
- Привидна (пълна) мощност (за всяка фаза – S_1 / S_2 / S_3 и обща S_{total});
- Фактор на мощността (за всяка фаза - $|PF_1|$ / $|PF_2|$ / $|PF_3|$ и общ $|PF_{total}|$);
- Коефициент за изкривяване на формата на напрежението и тока за всяка фаза – THD-U_1 / THD-U_2 / THD-U_3 / THD-I_1 / THD-I_2 / THD-I_3).



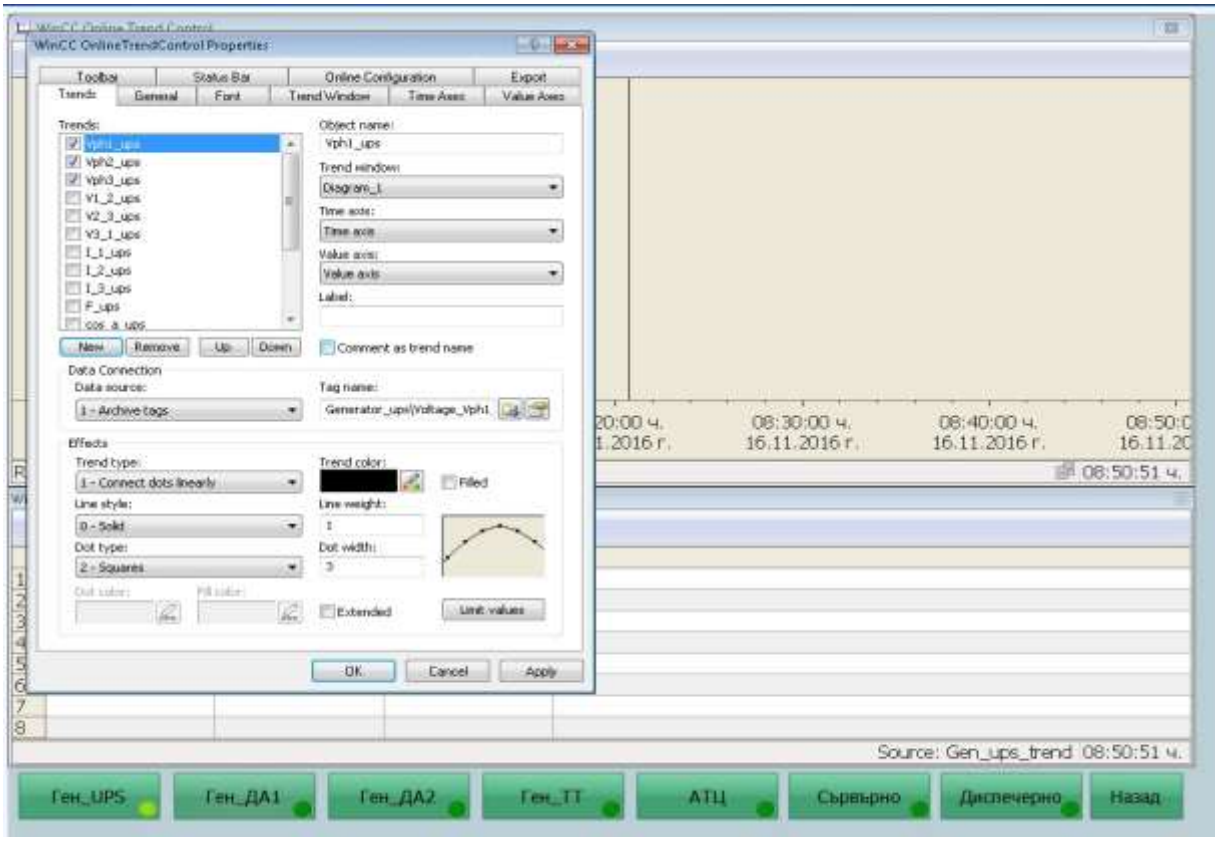
Фиг.1. Избор на параметри от опционалното под-меню на PAC 3200

Осигурен е, също така, мониторинг на състоянието на дизеловите агрегати (температура, скорост, напрежение на АБ, налягане на масло, количество гориво и

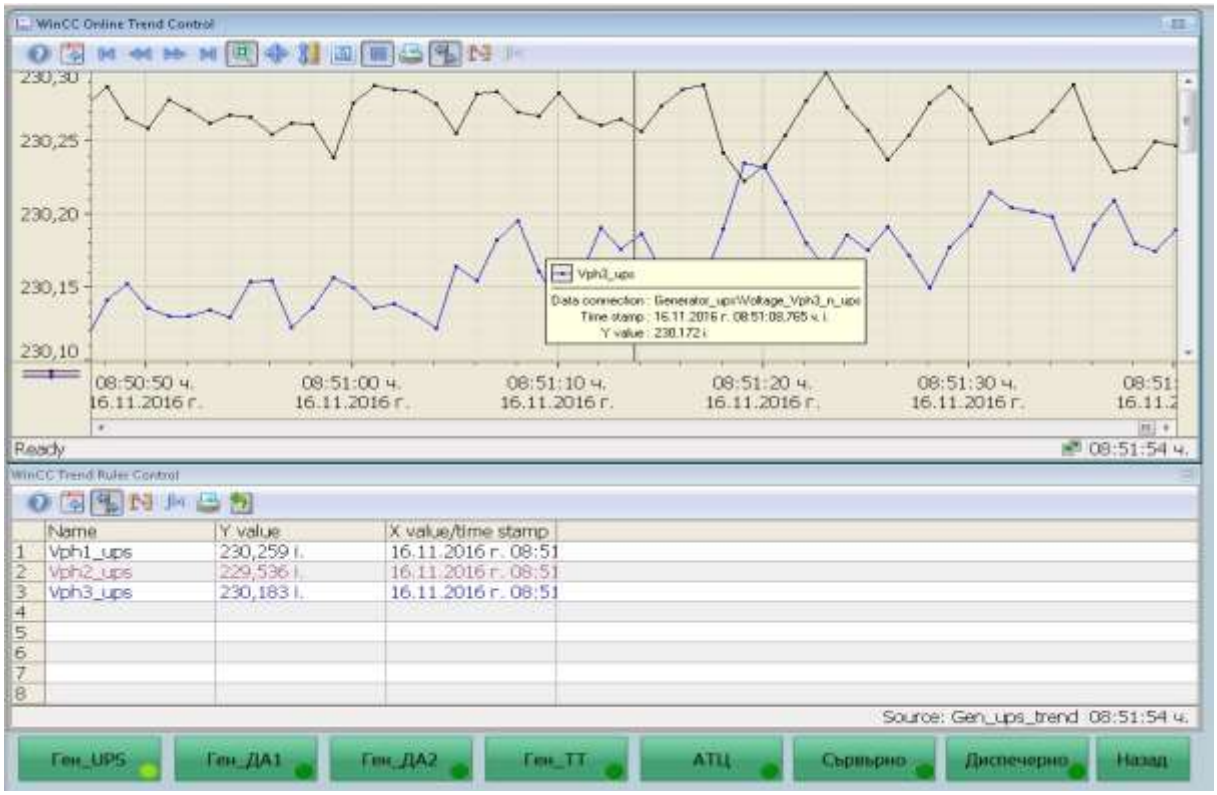
др.) чрез бутон „дизел-агрегат”. Предвидени са аларми, които се активират, ако даден параметър е извън предварително зададени граници на изменение на стойността му – изработва се светлинен и звуков сигнал. Същевременно се предлагат на вниманието на оператора подходящи команди или автоматично се предприемат коригиращи действия по предварително зададен алгоритъм.
В долния десен ъгъл на екрана са предвидени бутони за избор на под-менюта. Чрез бутон „Аларми” могат да се проверят отминали и непотвърдени аларми. Посредством бутона „Тренд” се визуализират параметрите на PAC 3200 и дизел агрегата под формата на графичен анализ.

3. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ, ГРАФИЧЕН АНАЛИЗ И АРХИВИРАНЕ НА ДАННИ

Изменението на избрани параметри може да се визуализира в графичен вид, като се използва приложението “WinCC Online Trend Control” (активира се чрез бутона „Тренд”). Появява се списък с параметри (фиг.2), като има възможност за избор на няколко величини и обединяване на графиките в един прозорец с цел сравняване на стойностите. Избраните параметри се визуализират в графичен вид и се изписват датата, часът и стойността на всяка величина в реално време (фиг.3).
Софтуерът „Powerconfig” освен това предоставя възможност за експортиране на измерените данни към Excel [2, 3]. По този начин могат да се създадат впоследствие таблици и да се построяват графики.



Фиг.2. Избор на меню „Тренд“ от главната страница



Фиг.3. Визуализация на параметри в меню „Тренд“

4. ДОКУМЕНТИРАНЕ И АНАЛИЗ НА ДАННИ

Системата поддържа системно време и дата, както и актуална база данни за всеки обект. Извършва се вътрешен автоматичен контрол и диагностика на изправността на отделните устройства, като се сравнява получената в реално време информация с предварително въведени експлоатационни стойности [4-9].

В нормален режим на работа на съоръженията и инсталациите в сградата данните за измерените величини и параметри са само оперативна информация, която впоследствие може да се използва при съставяне на товарови графици, планиране на разходи, иницииране на своевременно техническо обслужване и т.н. От друга страна, чрез получените данни се детерминират своевременно и се анализират аварийните ситуации в системата, като на тази база се предприемат мерки за отстраняването им и се осигурява незабавно оперативен персонал на място с подходяща резервна част.

Разработената система предоставя възможност за изработване и отпечатване на справки (протоколи) при поискване от оператора и по зададени от него критерии [3, 10, 11]:

- „Денонощен товаров график” - съдържа данни за почасовото потребление на активна и реактивна енергия за сградата и по отделно за всяка секция;
- „Консумирана електрическа енергия” (активна и реактивна) по тарифни зони, за отделните секции и общо;
- „Събития и команди” - включва списъци с възникнали събития, изработени алармени и неалармени съобщения, изпълнени и неизпълнени команди и др., като се отразяват датата и часът. Активните събития са сортирани по времето на регистриране (най-рано регистрираните са най-отгоре) и по ниво („Ава-

рийно”, “Предупредително” или “Информационно”). Действията като подаване на команди и потвърждаване на съобщения се свързват автоматично с името на оператора, който работи в момента със системата и ги регистрира. При подаване на определена групова команда се документира последователността на превключване на съоръженията по предварително зададена логика и последователност, както и времетраенето за изпълнението ѝ. Могат да се създадат отделни протоколи за всяко съоръжение.

- „Тестове” – извършват се автоматично или при поискване от оператора тестове на апаратурата и приложното програмно осигуряване на всички нива на системата, на изправността на комуникационните канали, на функционирането на човеко-машинния интерфейс и др.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чрез внедряването на SCADA се създава високо надеждна, самоосигуряваща се мощностна система, която дава възможността за надграждане, разширяване и усъвършенстване при необходимост, като същевременно се осигурява:

- Съхраняване, обработване, класифициране и визуализиране на голямо количество база данни в реално време;
- Осигуряване на непрекъснато поддържане в норми на технологичните показатели;
- Бърза реакция на събитията със съответните действия в реално време;
- Диагностика и оптимална поддръжка и експлоатация на съоръженията;
- Значително намаляване на разходите за монтаж, окабеляване и поддръжка и по време на експлоатация.

Предвидени са мерки за повишаване на безопасността и за предотвратяване на произшествия, аварии и др.

Реализирането на дистанционен мониторинг и управление на дизел-агрегатните системи води до оценяване на състоянието в реално време и своевременно реализиране на управляващи въздействия. На вниманието на оператора се предоставя информация и се предлагат подходящите за всеки конкретен случай команди. По този начин се повишава надеждността и ефективността на работа, елиминира се вероятността за грешни манипулации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Димитров В., Г. Неджиб (2017), ***Система за осигуряване на резервно електрозахранване на бизнес сграда***, IX научна конференция „ЕФ 2017”

[2] Димитров В., Е. Димитрова (2017), ***Разработване на SCADA система за мониторинг и управление на енергийния процес в бизнес сграда - избор на елементи и устройства***, IX научна конференция „ЕФ 2017”

[3]*http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/en/lv/portfolio/pages/powerconfig.aspx*

[4] Димитрова Е. (2017), ***Система за дистанционно управление на влаковото движение***, VIII научна конференция "ЕФ 2016", Годишник на Технически Университет – София, ISSN 1311-0829, том 67, кн. 1, стр. 407-412

[5] Димитрова Е. (2017), ***Архитектура на софтуера на система за дистанционно управление на влаковото движение***, VIII научна конференция "ЕФ 2016", Годишник на Технически Университет – София, ISSN 1311-0829, том 67, кн. 1, стр. 413-418

[6] ***Съвременни SCADA системи***, сп. "Инженеринг ревю", бр.5/2017, стр. 34-38

[7] Петров П. (2013), ***SCADA системи в енергетиката***, "Енергия – Списание за оборудване, технологии и инженеринг", година V, бр. 6, стр.50-55

[8] *Building Technologies: The future of building management,* Siemens, 2014

[9] Dimitrova E. (2016), ***Building automation and control systems***, Acad. journal "MTC", ISSN 1312-3823, Vol. 14, 3/2, art. ID:1395

[10] ***Totally Integrated Automation TIA-Portal,*** Siemens, available at: *https://www.siemens.com*

[11] ***Новата версия 14 на TIA Portal от Siemens,*** available at: *www.инженер.bg*

Автор: Васил Димитров Димитров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков" - София, E-mail address:*vdimitroff@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: д-р инж. Борислав Бойчев

РАЗРАБОТВАНЕ НА КОНЦЕПЦИЯ ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА РИСКА ПРИ ОХРАНА НА ОБЕКТИ С ВИСОКА СТЕПЕН НА ЗАЩИТА

Емилия Димитрова, Пламен Атанасов

Резюме: *В доклада е разработена методология за оценка на риска при охрана на обекти с висока степен на защита. Предложена е концепция за избор и реализация на алармени системи и критерии за подбор на периферни елементи и устройства – сензорни бариери, системи за контрол на достъп, обемни детектори. Дадени са и основните технически параметри за избор на алармени централи, както и интегриране на подходящи системи за видеонаблюдение.*
Ключови думи: *оценка на риска, алармени системи, системи за видеонаблюдение*

DEVELOPMENT OF A CONCEPT TO REDUCE THE RISK AT PROTECTION OF OBJECTS WITH HIGH DEGREE OF SECURITY

Emiliya Dimitrova, Plamen Atanasov

Abstract: *In this paper, a methodology for risk assessment at the protection of objects and sites with a high level of security is developed. A concept for the selection and implementation of alarm systems and criteria for selecting peripheral elements and devices - sensor barriers, access control systems, and volume detectors is proposed. The basic technical parameters for the selection of alarm stations, as well as the integration of appropriate video surveillance systems are also given.*
Keywords: *risk assessment, alarm systems, video surveillance systems*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В обекти от железопътната инфраструктура, метрополитен, електроцентрали, военната промишленост и други стратегически за икономиката сгради и съоръжения все по-наложително се прилагат съвременни средства за охрана, тъй като е необходима висока степен на защита. Необходимо е да се увеличи възможността за откриване на нарушител в охранявания обект преди да бъдат нанесени щети. В настоящия доклад е предложена концепция за разработване на охранителни системи, при използването на които трябва да се осигури предотвратяване на неоторизиран достъп до охраняваните обекти, вандалски прояви или терористични актове – чрез реализиране на различни степени и нива на защита и използване на широк спектър от технически средства и съоръжения.

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ОЦЕНКА И АНАЛИЗ НА РИСКА

Оценка на риска представлява оценка на възможността за провеждане на успешна атака или интрузия в охранявания обект и количествено се определя от вероятност за настъпване на събитието и щетите, които причинява (табл.1) [1].

Методологията, по която може да се извърши оценката на риска, е дадена на фиг.1 и съдържа следните основни параметри:

- ✓ Идентифициране и определяне на приоритетите за всеки от охраняваните подобекти и съоръжения.
- ✓ Идентифициране на възможните заплахи.
- ✓ Идентифициране на възможните атаки и вероятността за тяхното провеждане.
- ✓ Идентифициране на целево ниво на информационна сигурност и стратегии за неговото постигане.
- ✓ Анализ на стойността и процедурите на приетата стратегия за постигане на определеното ниво на сигурност и ефекта върху целия процес.

За целта е необходимо да се отговори на следните въпроси:

- ➢ Какво е необходимо да се защити?
- ➢ Защо е необходимо да се защити?
- ➢ Каква е неговата стойност?
- ➢ Какви са възможните заплахи срещу него?
- ➢ Какъв е рискът?
- ➢ Какви са евентуалните последици при реализиране на успешна интрузионна дейност?
- ➢ Какви са възможните сценарии за провеждането на интрузия?

Планирането на защитата се реализира на две нива: стратегическо (описва целта на защитата, принципите на организация и формалните методи за верификация) и тактическо (описва с какви конкретни средства да се постигнат стратегическите задачи) [2].

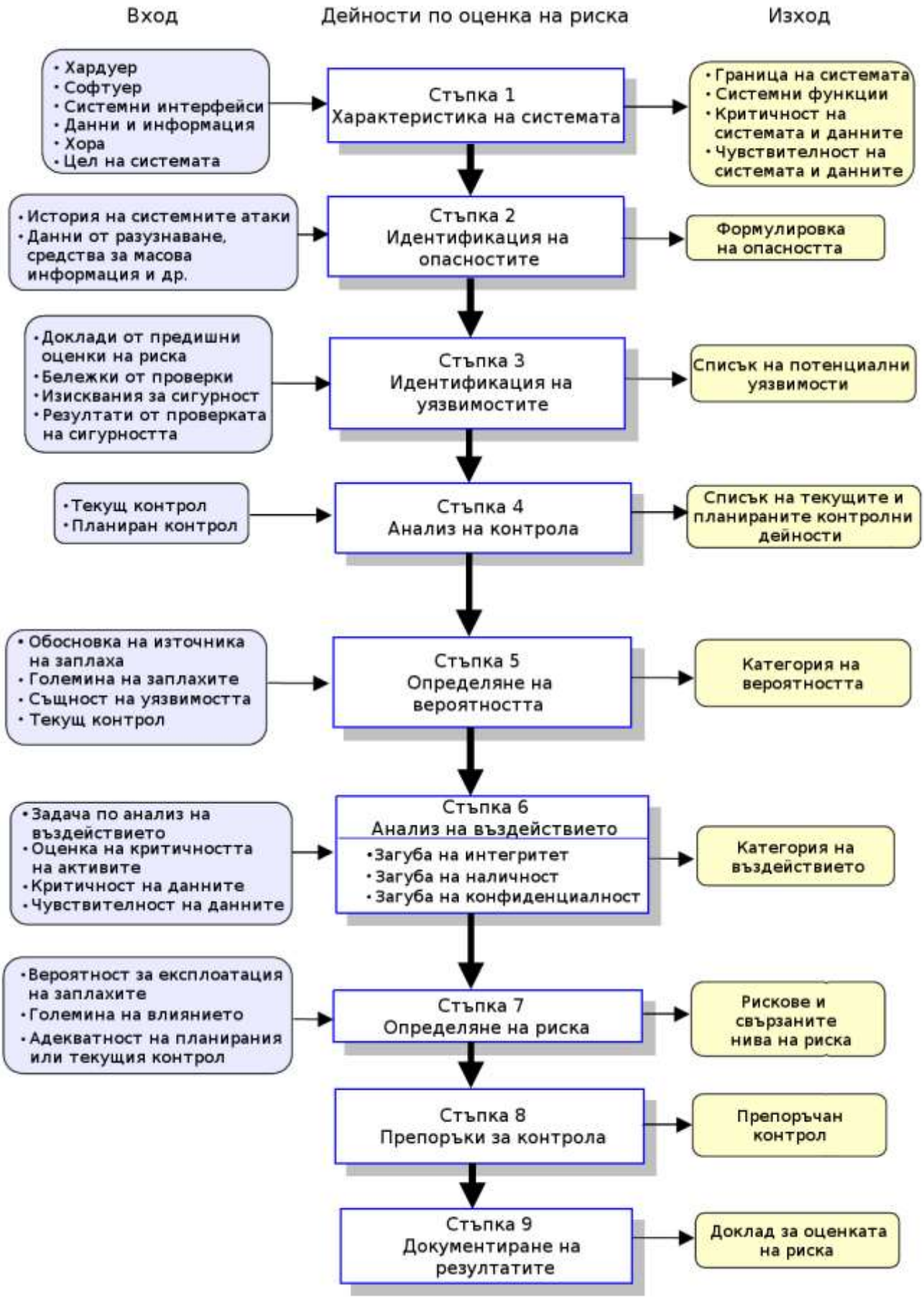
Планирането на сигурността се извършва въз основа на модела на сигурността. Най-често се използват три модела:

- Сигурност чрез неизвестност – базира се върху допускането, че ако един ресурс е неизвестен (скрит), той не може да бъде обект на атака;

Таблица 1.

Вероятност за настъпване на събитието и щети, които причинява

		Щети		
		Големи	Средни	Малки
Вероятност	Висока	Висок	Висок	Среден
	Средна	Висок	Среден	Нисък
	Ниска	Среден	Нисък	Нисък



Фиг.1. Методология за оценка на риска

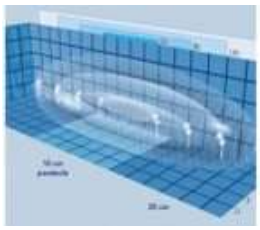
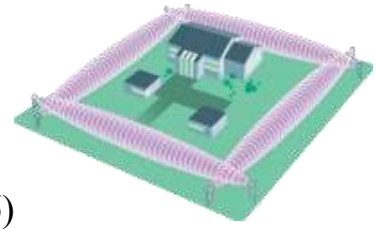
- Сигурност по периметър – ресурсите се изолират в самостоятелна защитена среда, очаква се вероятните интрудери да бъдат спирани от съответните гранични защитни устройства;

- Сигурност и защита в дълбочина – реализира се защита на различни нива и всеки обект трябва да бъде защитен поотделно. Гарантира се локализиране на интрузията в определена област при запазване работоспособността на останалите системни модули.

3. СЕНЗОРНИ БАРИЕРИ

Сензорните бариери са предназначени за реализиране на охрана по периметър около даден обект. Основните елементи са предавател и приемник. При промяна на определени параметри на сигнала, се регистрира нарушение.

Микровълнова бариера - бистатичен активен детектор, като в охраняваното пространство между предавателя и приемника се създава електромагнитно поле чрез двойка насочени антени (фиг.2). Работните честоти са стандартизирани в два честотни обхвата: около 10 GHz (X банд) или около 24 GHz (K банд).

а)  б) 

Фиг.2. Микровълнова бариера за охрана по периметър:
а) изменение на диаграмата на засичане в зависимост от разстоянието между приемната и предавателната антени; б) пример на реализация

Инфрачервена бариера - бистатичен активен детектор: предавателят излъчва инфрачервена светлина (тесен сноп лъчи), невидима за човешкото око. Приемникът следи инфрачервения сноп светлина чрез сензор и при промяна на определени параметри на сигнала се регистрира нарушение.

Оградни кабелни сензори - изграждат се като проводници около охранявания обект във вид на ограда и регистрират нарушение по следните начини:

- чрез изменение на електрическия капацитет между проводниците;
- чрез механично изменение на самите проводници;
- чрез пиезоефекта от изменение на разстоянието между проводниците.

Възспиращи системи - имат за задача да откажат нарушителя от намерението му. Подобни системи, наричани електрификатори се разработват в различни конструктивни варианти и се използват в обекти с висока степен на защита. В най-често използвания вариант към проводниците, формиращи оградата, се подава периодичен импулсен високоволтов сигнал (над 1000 V) с малък коефициент на запълване на импулсите (с много малка продължителност и голям период на импулса.

4. СИСТЕМИ ЗА КОНТРОЛ НА ДОСТЪП

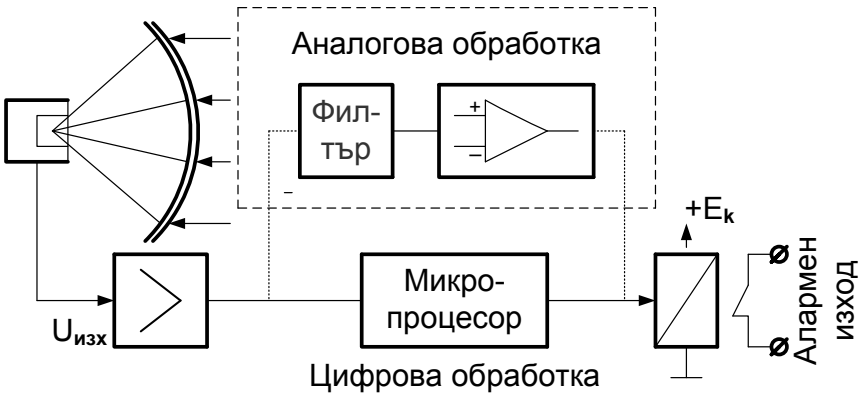
Посредством тези системи се ограничава нежеланият достъп до обектите. Могат да се използват и като средство за контрол на работното време.

Безконтактни карти, базирани на RFID технология, работят чрез микрочип и радиоантена. Най-често се използва честота 125 kHz, с обхват 5-10 cm. Самостоятелният терминал за контрол и управление на една врата SBR – 01CR, например, може да работи в режим с безконтактна карта или с пин код. Подходящ е за вътрешен или външен монтаж. Има вандалоустойчив корпус и капацитет от 2000 потребителя. Освен с ПИН код, се предлагат и други варианти с разпознаване на пръстов отпечатък, лица, ирис и др.

5. ОБЕМНИ ДЕТЕКТОРИ

Предназначени са да откриват присъствие или движение в охранявания обект - затворено охранявано пространство – стаи или складови помещения:

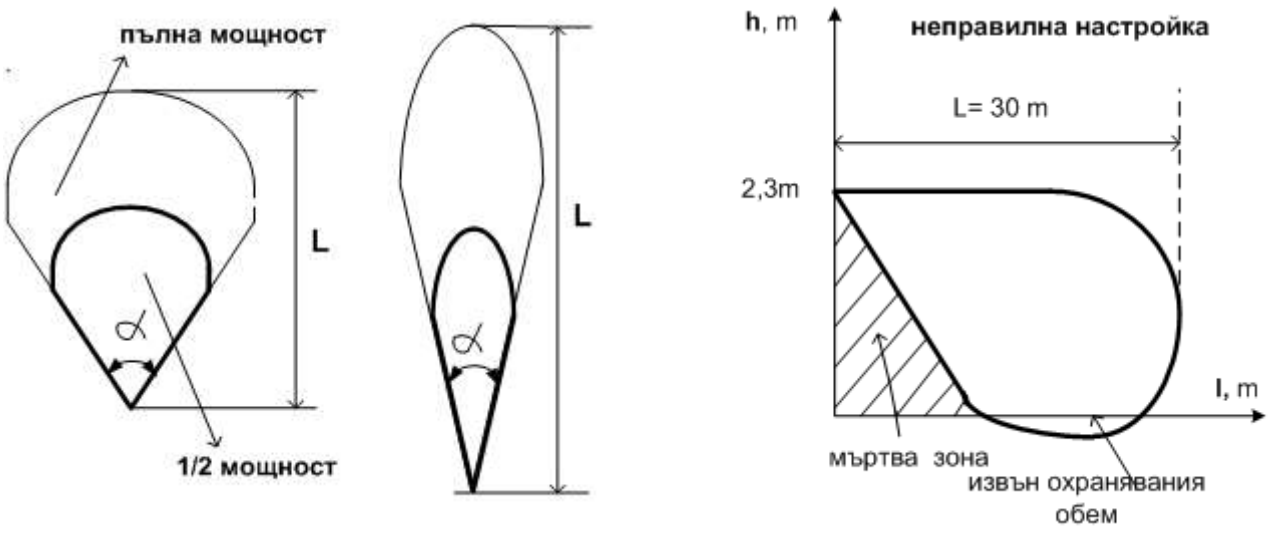
Пасивни инфрачервени детектори (PIR) – чрез тях може да се охранява обемът на помещението или част от него. Ако проникне човек, той генерира топлина, колкото една електрическа лампа с мощност 50 W, а дължината на вълната на излъчването е строго дефинирана от 8 до 14 μm (фиг.3). Това води до задействане на алармения изход.



Фиг.3. Устройство на инфрачервен детектор

Микровълнови детектори - предназначени са да засичат движение в охраняваното пемещение. Предавателят, който конструктивно е обединен с приемника, излъчва електромагнитни вълни. Създава се електромагнитно поле, което се състои от излъчените вълни и насложените върху тях отразени вълни. Честотата на излъчения сигнал е 1-10 GHz. Диаграмата на детекция има два пара-метъра: ъгъла α и дължината L. Диаграмата на засичане е показана на фиг.4.

Акустични детектори - работят в диапазона 2-40 kHz. Подразделят се на ултразвукови, звукови и инфразвукови, активни или пасивни (фиг.5).



Фиг.4. Диаграма на детекция на обемен детектор:
правилна и неправилна настройка

Фиг.5. Класификация на акустичните детектори

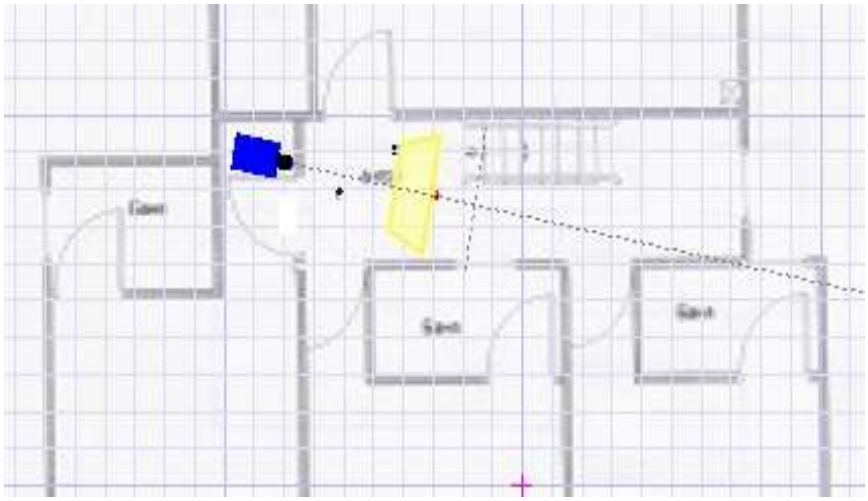
6. АЛАРМЕНИ ЦЕНТРАЛИ

Алармените централи са основата на алармените инсталации. Към тях се свързват всички периферни устройства. Разполагат с различен брой зони на детекция, което позволява да се вземат и снемат от охрана различни зони. Събитията се съхраняват в памет с дата и час на настъпване, предоставя се възможност за гласово известяване и сирена.

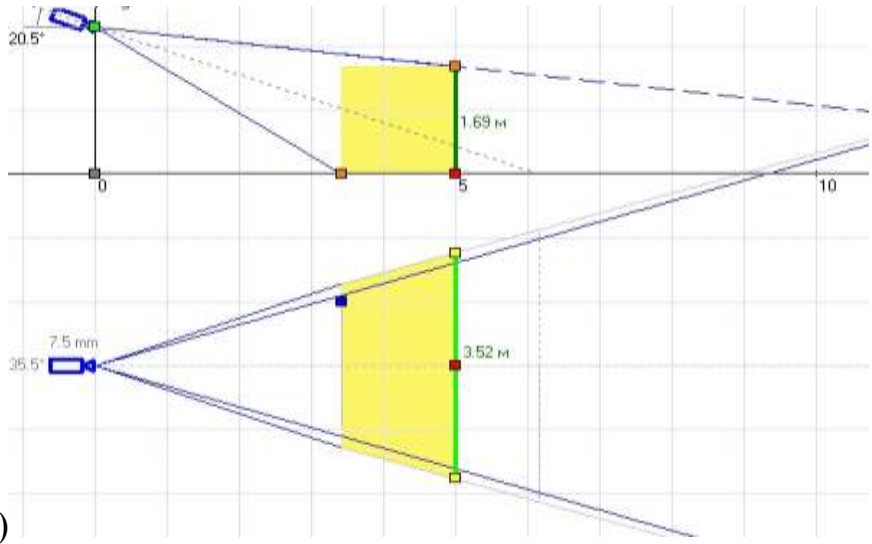
7. СИСТЕМИ ЗА ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЕ

Надеждна и сигурна охрана на широк кръг съоръжения се осигурява чрез системи за видеонаблюдение посредством камери в обектите, пренасяне на информацията до контролен център и архивиране на видеозаписи. Класическата система със CCTV камери изисква сложно окабеляване, ограничена е по разстояние и не предлага резервиране [3]. Все по-широко разпространение намират IP базираните системи с мрежови камери и пренос на сигнала по локални мрежи

(LAN) или чрез Интернет [4]. Основните предимствата са отдалечен достъп (възможност за видеонаблюдение по всяко време и от всяко място с достъп до



а)



б)

в)

Фиг.6. а) Разположение на видеокамера върху архитектурния план на обекта
б) Настройка на зрителното поле (дължина и ширина),
височината на монтаж и ъгъла на наклон на видеокамерата
в) Тестово изображение от видеокамерата

интернет чрез компютър, таблет или мобилен телефон), лесна интеграция, уп-

равляемост и интелигентни видео възможности. Видеокамерите поевтиняват с развитието на технологиите и придобиват все по-малки размери, а същевременно се увеличава резолюцията им. Високото качество на изображението създава възможност да се проследи ясно в детайли евентуален инцидент и да се идентифицират лица и обекти. Оптимално определяне на необходимия брой и местоположение на видеокамерите върху архитектурния план на охранявания обект, както и прецизната им настройка е възможно да се осъществи чрез софтуера IP Video System Design Tool (фиг.6) [5]. Правилното конфигуриране се верифицира чрез предварително въведени в софтуера 2D или 3D тестови модели.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада е предложена методология за оценка и анализ на риска и влиянието на заплахите. Систематизирани са стратегии и модели, които могат да се използват при разработване на системи за защита и повишаване на сигурността при охрана на обекти. Разгледани са тенденциите в развитието на охранителните системи – периферни устройства за гранична защита и за защита в дълбочина, формулирани са изискванията при избора на алармени централи. Акцентирано е на проектирането на системи за видеонаблюдение като важен елемент от охраната на обекти с висока степен на защита. Следователно е предложена цялостна концепция за намаляване на риска при синтез на охранителни системи с избор на подходящи елементи и устройства.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Stoneburner G., A. Goguen, A. Feringa (2002), ***Risk Management Guide for Information Technology Systems***, National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 800-30

[2] Христов Х., В. Трифонов (2005), ***Надеждност и сигурност на комуникациите***, Нови знания,2005

[3] Dimitrova E. (2017), ***Development of a video surveillance system in objects with high degree of protection***, Int. Conf „Transport-2017”, Sc. Journal “Mechanics, Transport, Communications”, ISSN 1312-3823, Vol. 15, Issue 3, 2017

[4] Dimitrova E. (2017), ***Analysis of the opportunities for integration of video surveillance in the remote monitoring and control systems***, Int. Conf. „Transport-2017”, Sc. Journal “Mechanics, Transport, Communications”, ISSN 1312-3823, Vol. 15, Issue 3, 2017

[5] IP Video System Design Tool, Manual, JVSG, 2017

Автори: Емилия Андонова Димитрова, доц. д-р инж., катедра „Съобщителна и осигурителна техника и системи”, ВТУ „Тодор Каблешков“- София, E-mail address: *edimitrova@bitex.bg,* **Пламен Атанасов**, докторант, катедра „Съобщителна и осигурителна техника и системи”, ВТУ „Тодор Каблешков“- София,

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: д-р инж. Борислав Бойчев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛИННО ПОЛЕ НА ЛАБОРАТОРНА ШИННА СИСТЕМА

Татяна Радева

Резюме: *Статията представя изследване на топлинния режим на работа на шинна система в режим на симулирано късо съединение. Шинната система е трифазна и се състои от три типа шини: алуминиева, боядисана алуминиева и медна. В изследването са използвани специализирани топлинни сензори и инфрачервена термовизионна камера. Част от получените експериментални резултати са сравнени с числен модел.*
Ключови думи: *къси съединения, шинни системи, топлинни процеси*

THERMAL FIELD ANALYSIS OF LABORATORY BUSBAR SYSTEM

Tatyana Radeva

Abstract*: This paper presents a study of thermal operational condition of a busbar system in simulated short circuit mode. The busbar system is three-phase and consists of three types of bushes: aluminum, painted aluminum and copper. Specialized thermal sensors and infrared thermal imaging camera were used in the study. Some of the experimental results obtained are compared with a numerical model.*
Key-words: *short – circuits currents, busbars system, heat processes*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Техническият прогрес изисква постоянното подобряване на твърдите електрически шини системи. Основната цел в развитието на шинните системи е да се увеличи токовия капацитета на компонентите при намаляване на изискванията за вложения материал [1], [2]. Поради строгите технически ограничения, разсейването на топлината трябва да бъде засилено, или загубите на електроенергия в шини трябва да бъдат намалени, за да останат в допустими температурните граници. Вече са публикувани много изследвания, които разглеждат решения за магнитни и термични полета в шинни системи [3], [4]. Като най-критичен режим както от електромагнитна, така и от топлинна гледна точка се разглежда режима на късо съединение в трифазните шинни системи. Електромагнитни и топлинни изчисления на такива режими са доста затруднени поради значителната конструктивна сложност на шинните системи и на нееднаквото разпределение на тока, причинени главно от повърхностния ефект и ефекта на близост [1], [2].

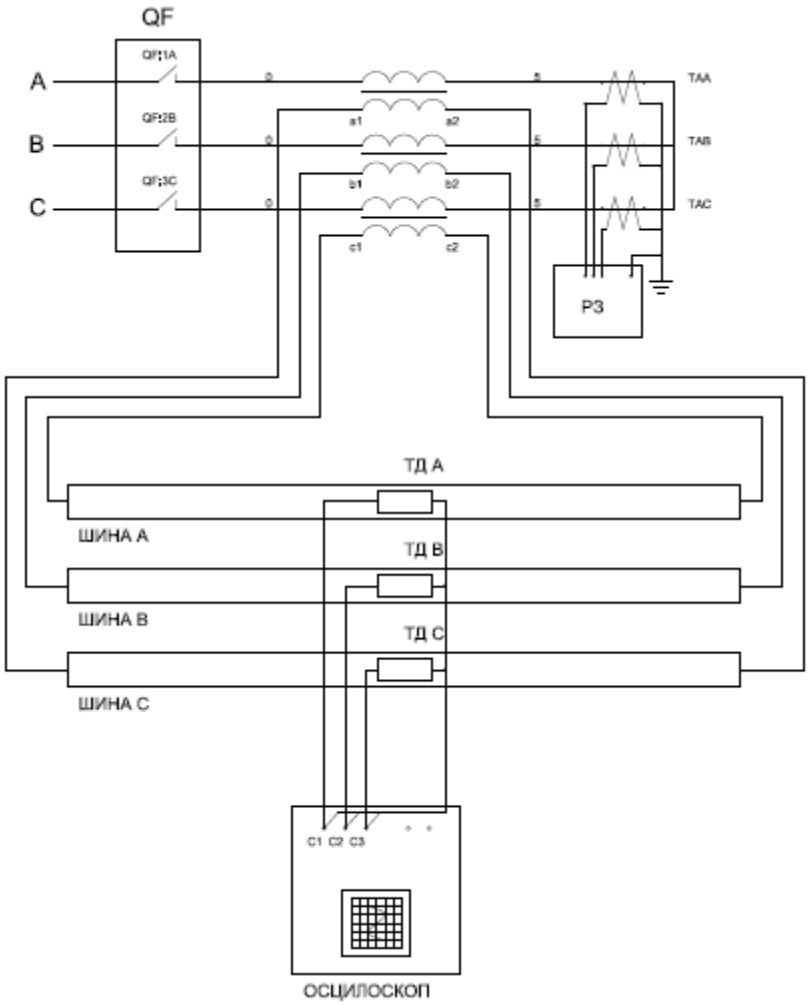
© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Повърхностният ефект и ефекта на близост [5], [6] могат значително да увеличат общите загуби на мощност. Влиянието на тези ефекти върху загубите на мощност в шините са широко дискутирани в литературата. Това води до намаляване на активното напречно сечение на проводника и повишава образуването на топлина.

В случай на късо съединение токовете са значително по-високи от нормалните. Загряването на проводниците, компонентите на оборудването и елементите на разпределителните системи в нормален режим се определя от номиналните токове на натоварване и техните температури не надвишават нормалните за непрекъсната работа. Затова техните температурите бързо се повишават и достигат по-високи от допустимите стойности в нормален режим. Независимо от кратката продължителност на късото съединение тези високи температури могат да доведат до намаляване на механична якост и деформация на материала на електрическите части и оборудване. Като се вземат предвид посочените по-горе проблеми, задълбочени термичен анализ следва да се включи в процеса на проектиране [1].

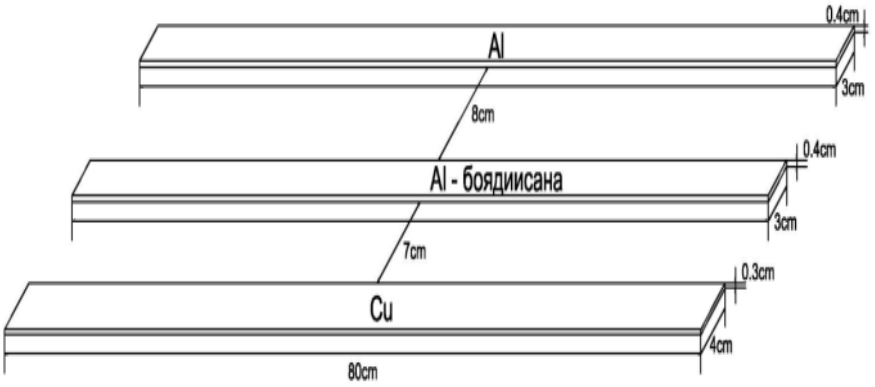
В настоящата статия е направено изследване на топлинния режим на работа на трифазна шинна система в режим на симулирано късо съединение, като са използвани специализирани сензори и инфрачервена термовизионна камера.



Фиг.1. Структура на лабораторната постановка.

2. ОПИСАНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Лабораторната шинна система (фиг.1) се състои от три различни шини с едно и също напречно сечение: небоядисана алуминиева шина Al с размери 30 x 4 mm, боядисана алуминиева шина Al с размери 30 x 4 mm и медна шина Cu с размери 40 x 3 мм, всички с еднаква дължина от 800 мм. На всяка шина се подава напрежение от собствен трансформатор, като по този начин се дава възможност за установяване на различни токове в различните шини [7].



Фиг.2. Структура на лабораторната постановка.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследване с термични сензори

Измерването на топлината на шините се извършва, чрез термо сензори тип SMT 160-30-18, монтирани върху средата на всяка една от шините (фиг.1) [7]. Самият сензор е интегриран с правоъгълен импулсен генератор. Коефициентът на запълване $K_з$ на правоъгълни импулси е пропорционален на температурата.

Температурата на съответния коефициента на запълване $K_з$ се изчислява по формула, предоставена от производителя на сензора. Монтира се сонда в специалните отвори на шините на всяка фаза. Отворите около всеки сензор се пълнят със силиконов уплътнител за по-добър пренос на топлина. Изводите на сондата са запоени към вторичната платка, монтирана на шината.

Вторична платка е свързана с кабел към съответния канал на осцилоскоп и показва изходния сигнал на сензора. Сензорът се захранва от стабилизиран токоизправител с изходно напрежение 5÷15 V.

Резултатите за крайните стойности на температурата, получена от трите сензора са дадени в табл.1.

Табл.1

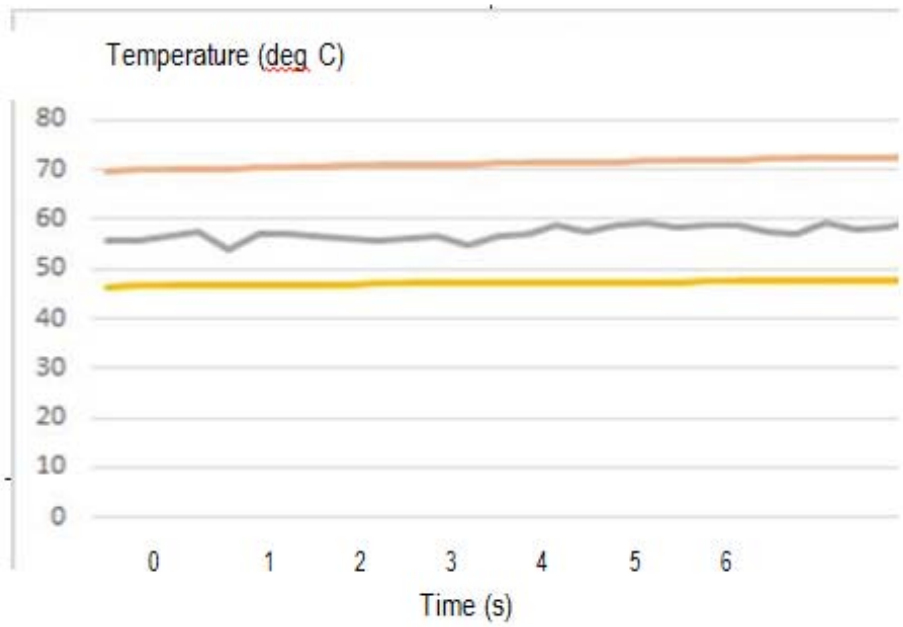
Експериментални изследвания

небоядисан алуминий	боядисан алуминий	мед
60°C	71°C	46°C

Изследване с инфрачервена термокамера

Процесът на нагряване по време на преходния режим е заснет с инфрачервена термокамера FLIR P640. Инфрачервената термокамера ъгъл на обзор 24°/18°, с минимален обхват на измерване на температурата от -20 °C до + 500 °C, температурна чувствителност 0.05 - 0.1 °C при 30 °C, детектор с 640 x 480 елемента, интегриран цифров цветен фотоапарат, режим на измерване с различни обективи, 1 GB памет и софтуер.

Експерименталните резултати, получени за температурата на трите шини по време на нагряването, са показани на фиг.3.



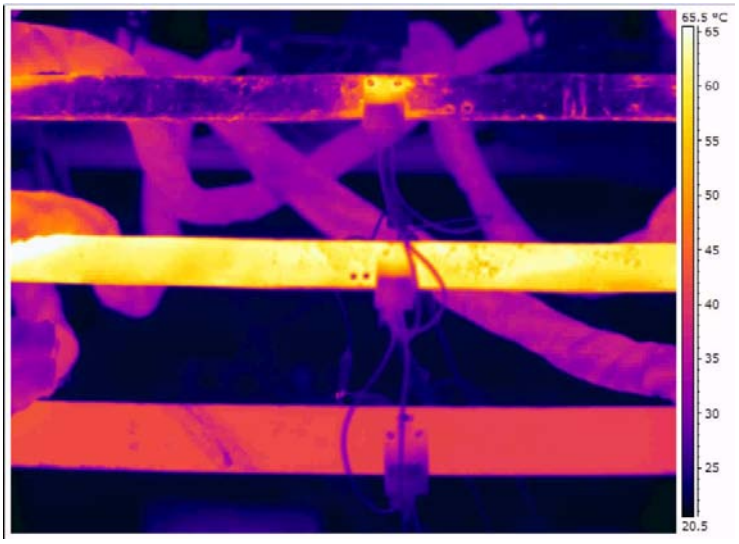
Фиг.3. Температура спрямо времето за трите шини (измерена).

Изображението получено от камерата по време на нагряването е показано на фиг.4. а); б); в).

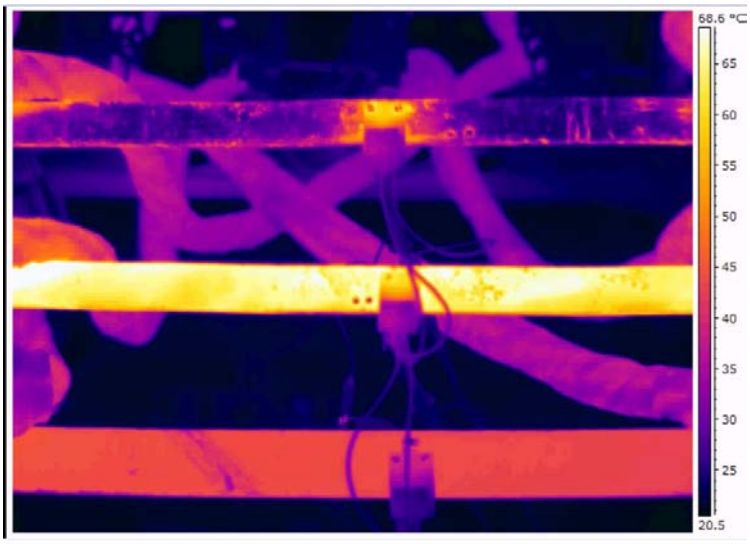
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изчислените резултати от сензора за правоъгълен сигнал са близки до тези, получени с използване на термична камера, като разликата не надвишава 0.5 °C.

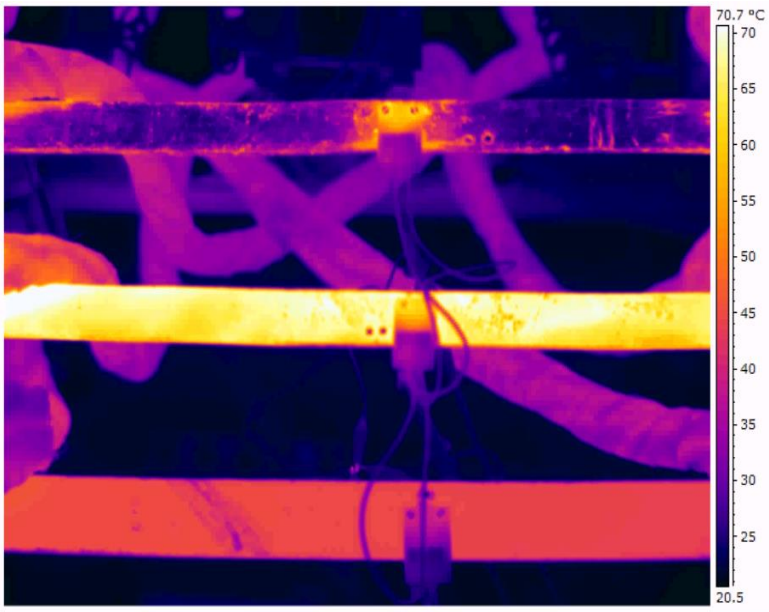
Показаната методика на работа с термо камера е изключително удобна за изследване на топлинни режими на шинни системи. Отличава се с висока точност, при безконтактност на измерването от безопасно разстояние, при разнообразни климатични условия. Приложима е за широк диапазон разнообразни конструктивни решения шинни системи, изследвани както в установен режим така и при краткотрайни преходни режими.



а) при температура 65,5 ºС



б) при температура 68,6 ºС



в) при температура 70,7 ºС

Фиг.4. Разпределение на температурата.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Tatyana R. Radeva, Ivan S. Yatchev, Dimitar N. Karastoyanov, Nikolay I. Stoimenov, Stanislav D. Gyoshev, "Coupled Electromagnetic and Thermal Field Modeling of a Laboratory Busbar System", Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering, Vol: 8, No: 9, 2014.

[2] S. Berleze, R. Robert, "Skin and proximity effects in nonmagnetic conductors", IEEE Transactions on Education, vol. 46, No. 3, 2003, pp. 368–372.

[3] S. L. Ho, Y. Li, E. W. C. Lo, J. Y. Xu, X. Lin, "Analyses ot three- dimensional eddy current field and thermal problems in an isolated phase bus," IEEE Trans. Magn.vol. 39, 2003, pp, 1515-1518.

[4] W. Anbo, C. Degui, S. Member, W. Jianhua, C. Bin, G. Yingsan, "Evaluation of Thermal Performance for Air-insulated Busbar Trunking System by Coupled Magneto-fluid-thermal Fields," Proc. Int. Conf. Power System Technology, 2002, pp. 2159-2163.

[5] M. A. Prsa, K. K. Kasas-Lazetic, N. D. Mucalica, "Skin Effect and Proximity Effect in a Real, High Voltage, Double Three-phase System", Proc. IEEE EUROCON, 2011, pp. 1-4.

[6] T. Keikko, J. Kotiniitty, L. Korpinen, "Calculations of Magnetic Fields from Indoor Distribution Substation Busbars", IEEE PES Summer Power Meeting 4, 2000, pp. 2309-2314.

[7] A. Ovcharov, A. Krumov, D. Todorov, Manual for laboratory exercises.

Автор: Татяна Радева, гл. ас. д-р инж., катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане" (ЕСЕО), Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *t_radeva@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Рад Станев

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ ПРЕГРЯВАНЕТО НА МАСЛЕН РАЗПРЕДЕЛИТЕЛЕН ТРАНСФОРМАТОР

Емил Мечков, Николай Стоименов

Резюме: *В тази статията са представени резултатите от експериментално изследване прегряването на маслен разпределителен трансформатор с обявена мощност 160kVA, проведено съгласно стандарт БДС EN 60076-2:2011 (Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори, потопени в течност.), точка 7.3.2, и посредством термодвойки и инфрачервена камера. Извършена е проверка на механичната якост на херметично затворения казан на трансформатора. Направен е анализ на резултатите и сравнение между прегряването на намотките в най-горещата точка, определено чрез изчисление и това, получено, чрез директно измерване по време на изпитването на трансформатора на прегряване.*
Ключови думи: *прегряване, трансформатор, термодвойка, инфрачервена камера*

EXPERIMENTAL TEMPERATURE RISE INVESTIGATION OF AN OIL-IMMERSED DISTRIBUTION TRANSFORMER

Emil Mechkov, Nikolay Stoimenov

Abstract: *In this paper the results from experimental temperature rise investigation of an oil-immersed distribution transformer with rated power 160kVA, carried out according to standard БДС EN 60076-2:2011 (Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers), clause 7.3.2, and by means of thermocouple sensors and infrared camera, are presented. Verification of transformers hermetically sealed tank mechanical strength is performed. Analysis of the results and comparison between hot-spot windings temperature rise determined by calculation and these obtained by direct measurement during the temperature rise test is made.*
Keywords: *temperature-rise, transformer, thermocouple sensor, infrared camera*

1. INTRODUCTION

The temperature rise of the transformer is a significant parameter governing a transformer's performance. According to [1] the standard method for the determination of the steady-state temperature rises is the equivalent test in short-circuit connection. During this test the transformer if not subjected to rated voltage and rated current simultaneously, but to the calculated total losses, previously obtained by two separate determinations of losses, namely load loss at reference temperature and no-load loss, which are described in [2].

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

The purpose of the test is to establish: the top-liquid and average liquid temperature rises in a steady-state condition with dissipation of total losses; the average winding temperature rise at rated current for the average liquid temperature rise as determined above; the hot-spot winding temperature rise at rated current and for top-liquid temperature rise as mention above. This is achieved in two testing steps: total loss injection and rated current injection.

The values of average temperature of the two windings are determined from the resistance variations, and in addition by taking into account the liquid temperature decrease when the current is reduced to the rated value, as well as the variation of the external cooling medium temperature.

If the direct measurement of the hot-spot winding temperature is provided, the corresponding temperature rise is obtained by taking the highest reading before disconnecting and applying the correction because the liquid temperature decreases when the current is reduced to the rated value.

Another method is back-to-back method. In this case, two transformers, one of which is the transformer under test, are connected in parallel and exited at the rated voltage of the transformer under test. By means of different voltage ratios or an injected voltage, rated current is made to flow in the windings of the transformer under test.

In current investigation a short-circuit method for two winding transformers is adopted.

2. THERMOCOUPLE SENSOR SELECTION

In [3] investigation of several different types of contact temperature sensors was presented, since they consist the most efficient method to measure the temperatures of transformers (compared to fiber-optic systems). Based on the literature as well as on the market survey, the most common contact sensors for measuring temperature are thermocouples, thermistors, and resistance temperature detectors. In particular, thermocouple is the most commonly used type of all the temperature sensing devices due to its simplicity, low cost, ease of use and their speed to response to changes in temperature, due mainly to their small size. Thermocouples also have the widest temperature range of all temperature sensors from below -200°C to well over 2000°C. Another type of contact temperature sensor is the Resistance Temperature Detector (RTD). RTDs as nearly as popular as thermocouples and can maintain a stable temperature reading for years. In contrast to thermocouples, RTDs have a smaller temperature range (approximately -200 to 850°C), require current excitation, have a slower response time and are more expensive. Because the RTD is a resistive devise, we need to pass a current through them and monitor the resulting voltage. However, any variation in resistance due to self-heat of the resistive wires as the current flows through it (Ohm's Law), causes an undesirable error in the readings.

Finally, thermistors are another type of contact temperature sensors. They have smaller temperature range (approximately -90 to 130°C) than previously mentioned sensors. They have the best accuracy (± 0.05°C), but they are more fragile than thermocouples and RTDs.

3. DESCRIPTION OF THE INVESTIGATION

3.1. Investigated object

Investigated object is oil-filled distribution transformer type TMX 160kVA, 10/0.4kV.

3.2. Temperature-rise test

As already mentioned above, the temperature-rise test was carried out according to clause 7.3.2 of [1]. The test arrangement is shown on Fig. 1.

The transformer was supplied by 1.3 times rated current for first two hours, in order to demonstrate overloading capability, after that by the total measured losses (2445 W) from its HV side, and the transformer LV side was short-circuited. The tap changer was in position 3 (10000 V). After the top-oil temperature rise had been established, the test current was reduced to the rated value (9.24 A) for 1 h. After shutdown the resistances of winding were measured in 1 min intervals. The average winding temperature rise at the instant shutdown was determined by the extrapolation of the cooling down curves.

3.2.1. Ambient temperature (Θ_a)

The temperature of the cooling medium in the heat run test is based on the ambient temperature in the case of the ONAN transformer. The ambient temperature, averaged from the measurements of the four thermometers, was 27.4℃. The thermometers were distributed around the transformer, about 2m away from the tank, and placed at a level about halfway up the cooling fins.

3.2.2. Top liquid temperature (Θ_0)

The top liquid temperature is the temperature of the insulating liquid at the top of the tank, representative of top liquid in the cooling flow stream. The top liquid

Fig. 1 Test arrangement

temperature is conventionally determined by thermometer immersed in the insulating liquid in pocket at the top of the tank. The top liquid temperature was measured while the total losses were applied. The test was terminated when the rate of change of top liquid temperature rise has fallen below 1 K/h and has remained there for a period of 3 hours. The top liquid temperature (Θ_0) was 58.2°C on the rated power and the top liq-

uid temperature rise ($\Delta\Theta_0$) was 30.8K which is the temperature difference between the top liquid temperature and the ambient temperature. This satisfies the top liquid temperature rise limit of 60K.

3.2.3. Bottom (Θ_b) and average (Θ_{0m}) liquid temperature

Bottom liquid is the term which actually means the temperature of the liquid entering winding at the bottom. For practical reasons, it is identified with the temperature of the liquid returning from the cooling equipment to the tank. The bottom liquid temperature (Θ_b) determined by thermocouple (see Fig. 4) was 43.6°C and the bottom liquid temperature rise ($\Delta\Theta_b$) was 16.2K which is the temperature difference between the bottom liquid temperature and the ambient temperature. The average liquid temperature (Θ_{0m}) is in principal intended to be the average temperature of the cooling liquid in the windings. It is used for the calculation of the average winding gradient and for correction of certain temperature rise test results. The average liquid temperature is:

$$\Theta_{0m} = \frac{\Theta_0 + \Theta_b}{2} = \frac{58.2 + 43.6}{2} = 50.9°C \tag{1}$$

And the average liquid temperature rise ($\Delta\Theta_{0m}$) was 23.5K which is the temperature difference between the average liquid temperature and the ambient temperature.

3.2.4. Average winding temperature (Θ_2)

The average winding temperature is determined by measurement of winding resistance. On three-phase transformers, the measurements should be normally performed including the middle phase of the windings. For star connected, low voltage and high current windings, the measurement should be made between line terminals in order to exclude the neutral connection from the test circuit. A reference measurement (R_{1HV}=7.104Ω; R_{1LV}=0.010415Ω) of all winding resistances is made with the transformer at ambient temperature, in a steady-state condition (acc. To [2]). When the resistance (R_2) is measured after disconnection of the power supply, extrapolated to the instant of shutdown (Fig. 2), this yields the temperature value:

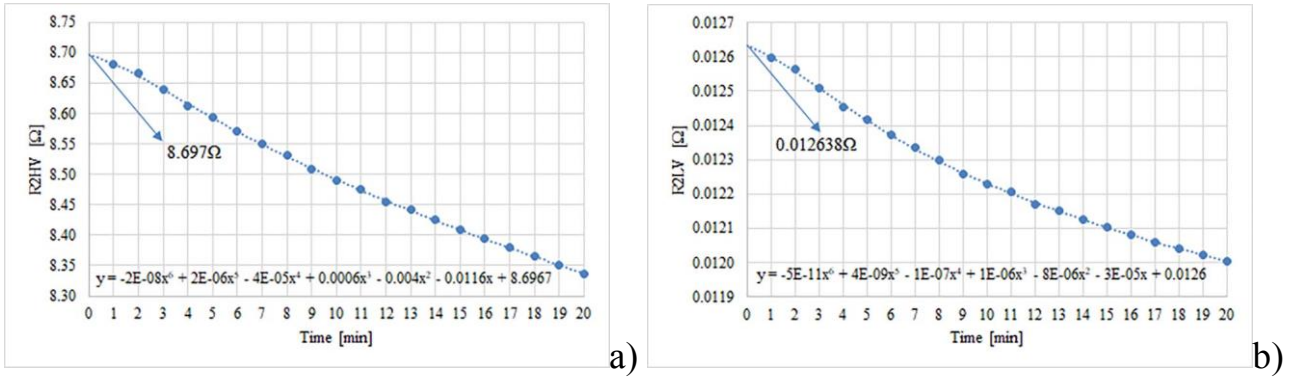
$$\Theta_{2HV} = \frac{R_{2HV}}{R_{1HV}}(225 + \Theta_1) - 225 = \frac{8.697}{7.104}(225 + 25) - 225 = 81.06°C \tag{2.1}$$

$$\Theta_{2LV} = \frac{R_{2LV}}{R_{1LV}}(225 + \Theta_1) - 225 = \frac{0.012638}{0.010415}(225 + 25) - 225 = 78.361°C \tag{2.2},$$

where Θ_2 is the average temperature of the winding at the instant of shutdown.

3.2.5. Average winding temperature rise ($\Delta\Theta_W$)

The average winding temperature rise was determined using the value of resistance at the instant of shutdown determined as indicated above. The values of winding average temperature shall be raised by the same amount as the average liquid temperature has fallen at the end of the 1 h with rated current. The corrected winding



a) b)

Fig. 2 Extrapolation of the cooling down curve - HV winding (a) and LV winding (b)

average temperature rise ($\Delta\Theta_W$) is then:

$$\Delta\Theta_{WHV} = \Theta_{2HV} + \Delta\Theta_{0fm} - \Theta_a = 81.06 + 0.5 - 27.375 = 54.185K \quad (3.1)$$

$$\Delta\Theta_{WLV} = \Theta_{2LV} + \Delta\Theta_{0fm} - \Theta_a = 78.361 + 0.5 - 27.375 = 51.486K \quad (3.2),$$

where Θ_2 is the average temperature of the winding at the instant of shutdown, Θ_a is the external cooling medium temperature at the end of the test period with the total losses, Θ_{0fm} the fall of the temperature of the average liquid during the 1 h test at rated current. This satisfies the average winding temperature rise limit of 65K.

3.2.6. Average winding to liquid temperature gradient (g)

The average winding to liquid gradient (g) was determined as difference between the uncorrected average winding temperature (Θ_2) and the average liquid temperature (Θ_{0m}) at shutdown:

$$g_{HV} = \Theta_{2HV} - \Theta_{0m} = 81.06 - 50.9 = 30.16°C \quad (4.1)$$

$$g_{LV} = \Theta_{2LV} - \Theta_{0m} = 78.361 - 50.9 = 27.461°C \quad (4.2).$$

3.2.7. Hot-spot winding temperature rise ($\Delta\Theta_h$)

- *Determination by calculation*

For transformers having concentric windings regularly distributed along the core limbs, the hot-spot winding temperature rise can be calculated starting from the results of the temperature rise test, assuming for the liquid at the winding exit the temperature of the top-liquid and for average liquid temperature, the average between the top-liquid temperature and the bottom liquid temperature. The temperature rise of the liquid inside the windings of the transformer is assumed to increase linearly with the height of the windings. The heat, transferred from the winding to the liquid all along the winding requires a temperature drop between winding and surrounding liquid which is assumed to be constant at all levels of height with the exclusion of the winding extremities. In the graphic given in Fig. 3, the winding temperature rise and the liquid temperature rise will therefore appear two parallel lines.

The hot-spot winding temperature rise was determined using the following equation:

$$\Delta\Theta_{hHV} = \Delta\Theta_0 + Hg_{HV} = 30.825 + 1.1 * 30.16 = 64.001K \quad (5.1)$$

$$\Delta\Theta_{hLV} = \Delta\Theta_0 + Hg_{LV} = 30.825 + 1.1 * 24.461 = 61.032K \quad (5.2),$$

where $\Delta\Theta_0$ is top liquid temperature rise, g is average winding to liquid temperature

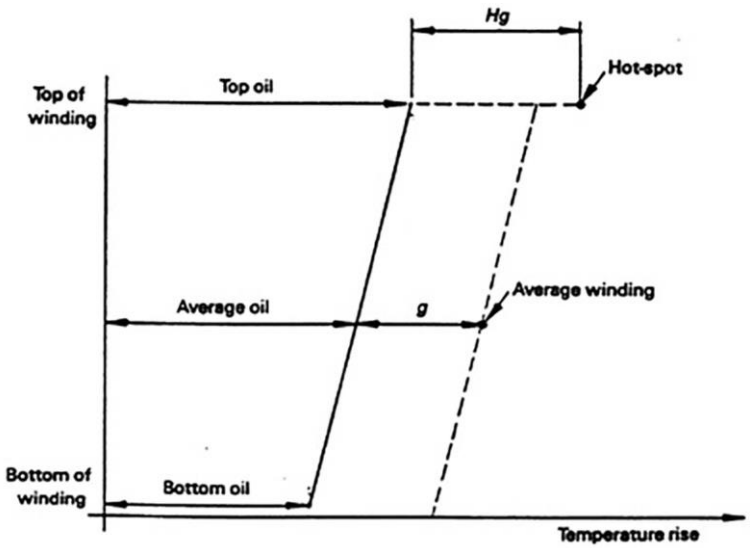


Fig. 3 Temperature rise distribution model

gradient and H is winding hot-spot factor, which assumed to be 1.1 according to [4].

- *Determination by direct measurement during the temperature rise test*

A number of thermocouples was mounted on the top and bottom place of cooling fins and inside the windings in positions where it is supposed the hot-spots are located (see Fig. 4). The hot-spot winding temperature rise ($\Delta\Theta_h$) is the obtained by:

$$\Delta\Theta_{hHV} = \Theta_{hHV} + \Delta\Theta_{0f} - \Theta_a = 89 + 0 - 27.375 = 61.625K \tag{6.1}$$

$$\Delta\Theta_{hLV} = \Theta_{hLV} + \Delta\Theta_{0f} - \Theta_a = 86 + 0 - 27.375 = 58.625K \tag{6.2}$$

where Θ_h is the temperature reading at shutdown, $\Delta\Theta_{0f}$ the fall of the top-liquid temperature during the 1 h test at rated current, and Θ_a the ambient temperature at the end of the total loss test period.

Result from both way of determination satisfies the hot-spot winding temperature rise limit of 78K.

Fig. 4 Installation of thermocouples

3.2.8. Graphically presented results for all measured temperatures by means of thermocouples during the test

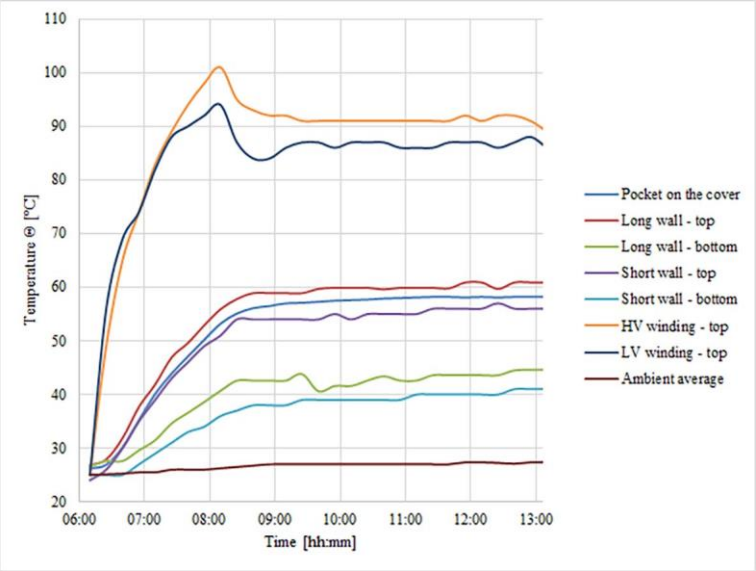


Fig. 5 Temperatures versus time

3.2.9. Results for temperatures captured with infrared camera at the end of the test

Temperatures along cooling fins were captured by means of thermal infrared camera FLIR P640 at the end of the test. The obtained results are filled in Table 1. The image of short tank's wall is shown in Fig. 6 a) and of long wall – in Fig. 6 b). To each image, a corresponding graph of measured temperatures is shown in Fig. 7 a) and Fig. 7 b).

Table 1

Temperatures of tank's walls

Figure	Graphics	Θmax [°C]	Θmin [°C]	Θavg [°C]
7 a	Li1	62.1	43.5	56.7
	Li2	61.9	43.9	56.8
	Li3	62.2	44.4	57.1
	Li4	61.9	41.1	56.4
	Li5	61.9	34.8	56.7
7 b	Li1	58.5	43.5	54.3
	Li2	60.4	41.6	55.1
	Li3	60.8	41.6	55.3
	Li4	60.9	42.0	55.5
	Li5	60.8	42.6	55.6
	Li6	59.9	42.7	55.1
	Li7	60.1	42.7	55.1

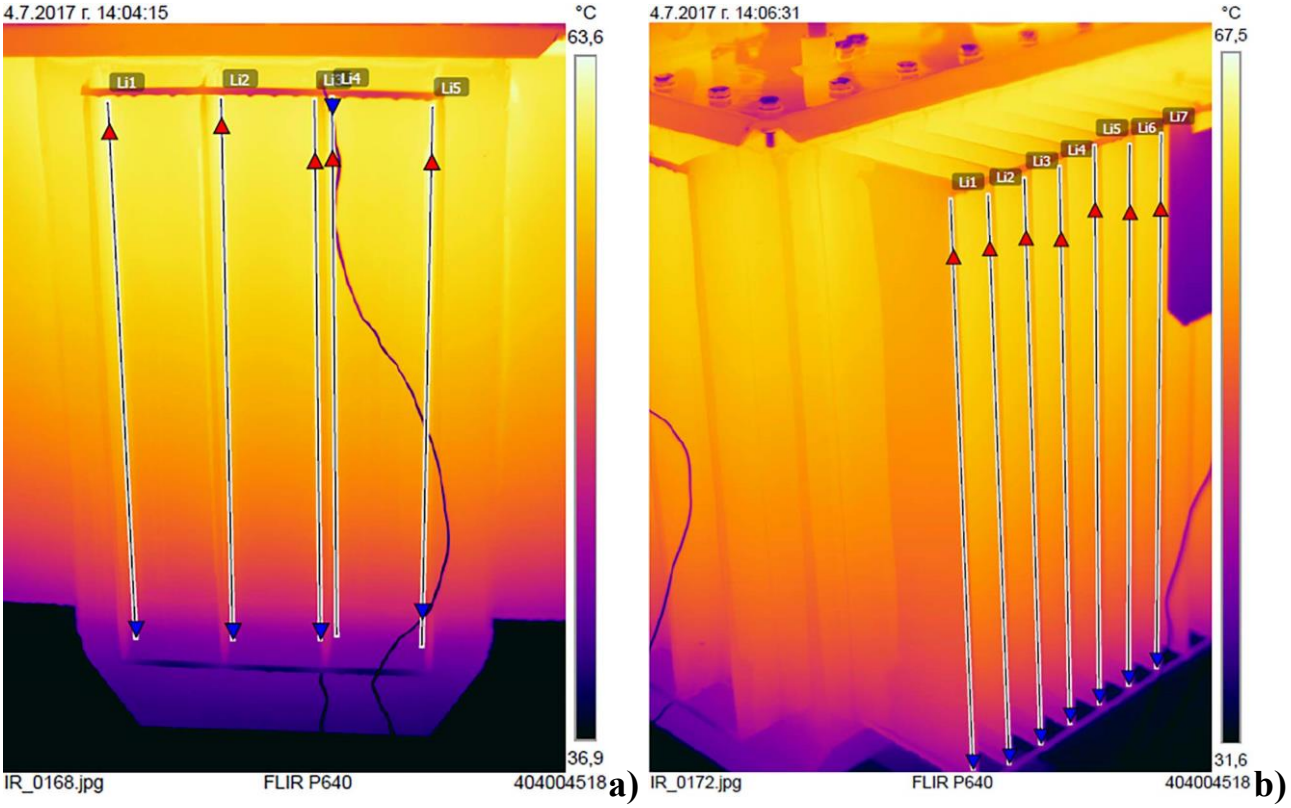


Fig. 6 Thermal images of short tank's wall (a) and of long wall (b)

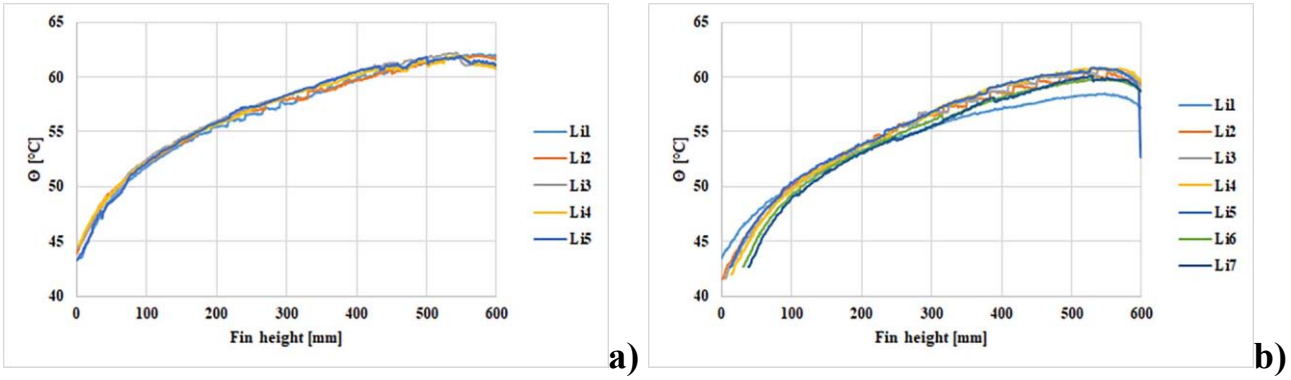
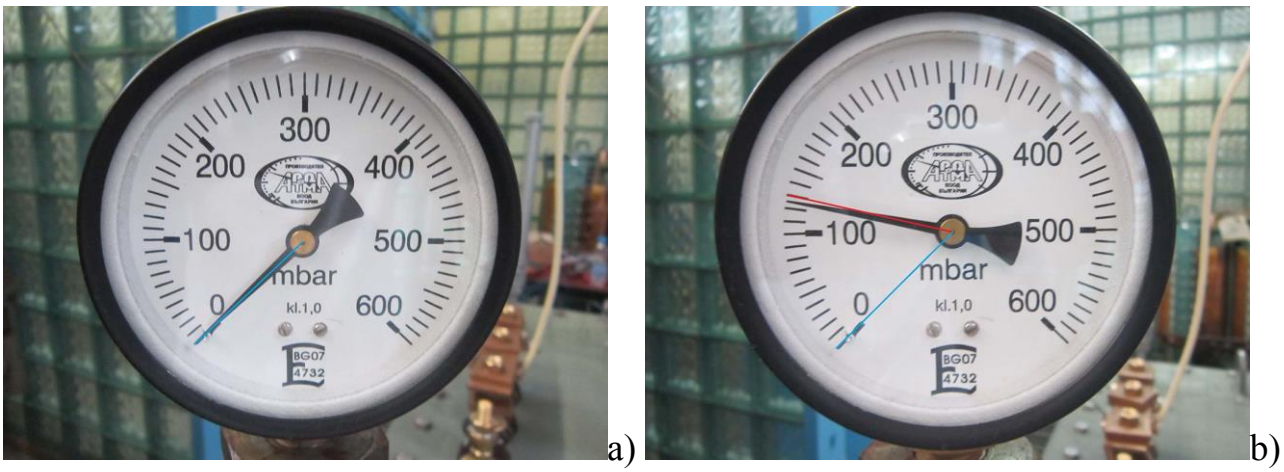


Fig. 7 Graphs of measured temperatures of short tank's wall (a) and of long wall (b)

3.2.9. Tank pressure

Hermetically sealed transformers, don't have conservator and the transformer oil cannot expand easily. In this type of transformers, the oil pressure is higher than the atmosphere pressure and despite of conservator type transformers, the tank of these transformers act as a pressurized vessel. In this case, due to elimination of conservator, oil temperature variations leads to expansion and contraction of transformer tank and so this affects transformer tank design, behavior and aging. Transformer tanks are manufactured in corrugated form for efficient heat transfer and oil cooling. In hermetically sealed transformers, the ribs of corrugated tank have the essential rule in cooling and tolerating pressure variations. During the temperature-rise test the tank pressure was obtained as is shown in Fig. 8 and calculated as per proposed methodology in [5] in order to compare results (see Fig. 9)



a) b)

Fig. 8 Tank pressure change during temperature rise test – at start (a), at end (b)

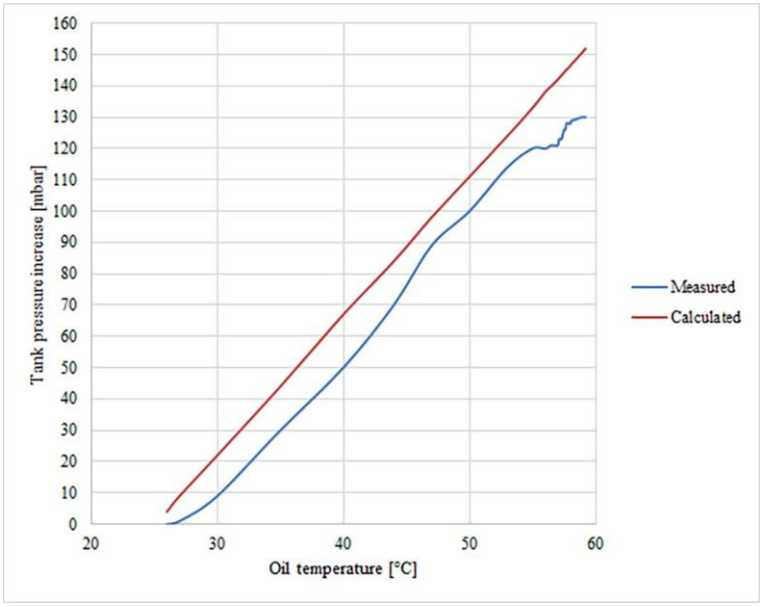


Fig. 9 Tank pressure increase versus oil temperature

4. CONCLUSION

Obtained results from the proposed experimental temperature rise investigation of an oil-immersed distribution transformer, based on temperature rise test carried out according to clause 7.3.2 of [1], direct measurements by means of thermocouples and thermal infrared camera, show that investigated transformer fulfills the requirements of standard.

When comparing hot-spot windings temperature rise determined by calculation and this obtained by direct measurement during the temperature rise test, we find that difference for HV winding is 3.71% and for LV winding – 3.76%. This is due to the fact, that the winding hot spot factor H is winding-specific. Studies show that the factor H varies within the ranges 1.0 to 2.1 depending on the transformer size, its short-circuit impedance and winding design.

From graphs showed on Fig. 7, it is visible that the temperature varies along the height of cooling fins similar to exponential law. Due to the fact, that fins of short wall are with too small depth compared to distance between them, graphs for all five

lines (from Li1 to Li5) are practically the same. This is true and for long wall, except line Li1 (along end fin), because here fins have much larger depth compared to distance between them, and convection is difficult due to closure, not applicable for outer side of end fin.

Results from tank pressure measurement and its analytical calculation lead to conclusion that measured tank pressure increase is slightly lower than calculated, but can be said that proposed methodology in [5] have enough accuracy for purpose of design and maintenance of transformers.

ACKNOWLEDGMENT

Authors thank the management of transformer factory "Elprom Trafo CH" JSC for the provided real model of investigated transformer and for using its testing laboratory.

REFERENCES

[1] БДС EN 60076-2:2011, ***Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers.***

[2] БДС EN 60076-1:2011, ***Power transformers - Part 1: General.***

[3] Disios K., Mantas I., Melanitis A., Amoiralis E., Tsili M., ***Electric machine design through investigation of thermal performance by installing thermocouple sensors,*** Materials Science Forum, ISSN: 0255-5476, Vol. 856, Trans Tech Publications, Switzerland, 2016, pp 349-355.

[4] БДС EN 60076-7:2012, ***Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers.***

[5] Herfati D., Kamvar B. A., Tavakkol A., Milani K. R., ***Calculation of mechanical stresses in hermetically sealed transformers,*** CIRED2007 Session 1, 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21-24 May 2007, Paper 0309.

Authors: Emil Mechkov, M. Sc. Eng., PhD Student, Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia, E-mail address: *emil_pm@abv.bg;* **Nikolay Stoimenov**, Ch. Ass. PhD. Eng., Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Science, E-mail address: *nikistoimenow@gmail.com*

Received 15 December 2017 **Reviewer:** M. Eng. PhD Bozhidar Stoev

АНАЛИЗ НА РАБОТАТА НА ИНДУКЦИОННИ ПЕЩИ СЪС СРЕДНА ЧЕСТОТА

Димитрина Коева, Свилен Рачев, Любомир Димитров

Резюме: *В работата са извършени изследвания на работата на тигелна индукционна пещ с малка мощност. Измерванията са проведени при топене на стомана, с пълен и половин капацитет на пещта (режим синтероване). Получени са стойности на фазови напрежения и нива на хармоници, постъпващи в тиристорния преобразувател за разглежданите два режима и са определени съответните к.п.д. Предложени са мерки за повишаване на енергийната ефективност.*
Ключови думи: *тигелна индукционна пещ, общо хармонично изкривяване, нива на хармоници, енергийна ефективност.*

ANALYSIS OF MEDIUM FREQUENCY INDUCTION FURNACES OPERATION

Dimitrina Koeva, Svilen Rachev, Lyubomir Dimitrov

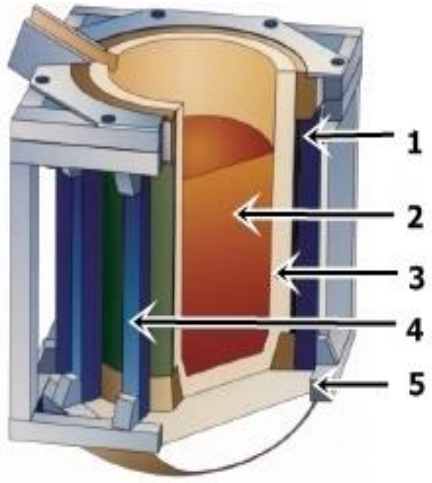
Abstract: *Paper deals with studies of the operation of a low-power crucible induction furnace. The measurements have been carried out at melting steel, with a full and half capacity of the furnace (sintering mode). The values of phase voltages and harmonic levels received in the thyristor transducer for the two regimes under consideration have been obtained and the corresponding efficiency has been determined. Measures to increase energy efficiency have been proposed.*
Keywords: *crucible induction furnace, total harmonic distortion, harmonic levels, energy efficiency*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

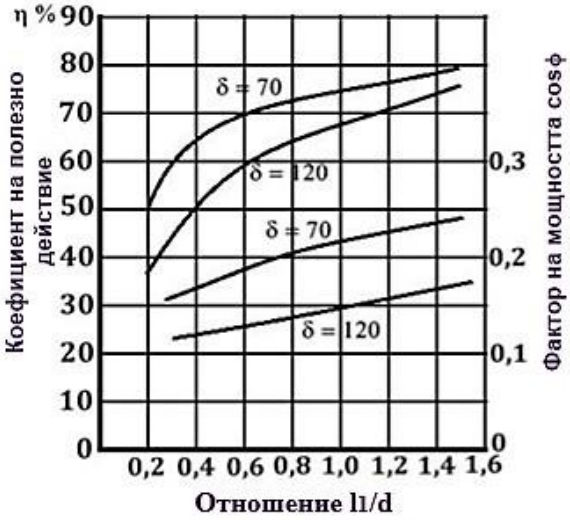
Металолеенето е един от най-широко разпространените, високотехнологични и в същото време най-предизвикателните производствени процеси. Модерната технология на металолеене включва шест различни етапа – топене, сплавяване, формоване, отливане, втвърдяване и окончателна обработка. На всеки етап са необходими високи нива на точност и оптимално процесно управление. Също така металолеенето е и един от най-енергийно интензивните индустриални процеси, като топенето на метала отговаря за голяма част от консумираната енергия. Поради това и като се имат предвид покачващите се цени на електроенергията, оправдани са значителните усилия в посока повишаване на енергийната ефективност [2, 6].
Основните елементи на тигелната индукционна пещ са представени на фиг.1.

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829



Фиг.1. Основни елементи на тигелна индукционна пещ: 1 - индуктор, включен към източник на променлив ток (първична намотка); 2 - шихта - нагряваният метал (вторична намотка); 3 - тигел; 4 - магнитопровод; 5 - тяло на пещта.



Фиг.2. Връзка между геометричните размери на тигела, к.п.д. и фактора на мощността при различни дебелини на стената на тигела (η - коефицент на полезно действие; l_1 - височина на бобината; d - диаметър на пещта; δ - дебелина на облицовката на тигела).

Сред предимствата на тигелните пещи са:

- лесно достигане на висока температура, тъй като енергията се отделя непосредствено в загрявания метал;
- отсъствие на съприкосновение на метала с гориво или електроди, което позволява получаването на метали и сплави с висока чистота на химическия състав;
- наличие на интензивно движение на масата от разтопен метал вътре в тигела под въздействието на електродинамичните сили; това способства за получаване на еднороден химически състав на сплавта, без да се налага използването на механични бъркалки за сплавта по време на топенето;
- малка окисляемост и съдържание на пепел при наличие на студена шлака на повърхността на огледалото от разтопен метал;
- възможност за провеждане на топенето във вакуум или неутрална среда за получаване на сплави с много високи качества;
- липса на прегряване на облицовката на пещта, което повишава експлоатационния й срок;
- възможност за работа в периодически режим, което от своя страна намалява престоя на пещта на празен ход и позволява промяна на химическия състав на топилката без провеждане на промивна топилка и без да остават нестопени остатъци от метала;
- много проста спрямо каналните пещи конструкция на огнеупорния тигел.

Сред недостатъците на индукционните тигелни пещи по-съществените са:

- при електрозахранването на индукционните пещи основен проблем е ниският естествен фактор на мощността: cosφ=0.08÷0.25 и несиметричността, която създават в електропреносната мрежа (индукторът се захранва с линейно напрежение); това налага включването на кондензаторни батерии и реактори в захранващата верига за подобряване на cosφ и намаляване на несиметрията на товара;
- поява на "мениск" – пръски от разтопен метал над повърхността от големите електродинамични сили, действащи в топилката;
- пещите с малка и средна мощност се нуждаят от захранващ източник с повишена честота на напрежението;
- като основен недостатък на технологията при индукционните пещи е ниската активност на шлаката и оттам по-малките топлинни възможности на самата пещ; това намалява ефективността на обезсярването и обезфосфоряването на стоманата;
- огнеупорната зидария на тигелите е с малка издръжливост.

Индукционните пещи се разглеждат като съчетано електротехническо и електронно съоръжение и по време на работния им процес при топене на метал се явяват нелинеен товар за мрежата и са източник на широколентови смущения. Най-често при работата си тези пещи предизвикват нарушение на следните интегрални показатели за качество на електрическата енергия (ПКЕЕ): отклонения на напрежението, колебания на напрежението, несинусоидалност на напрежението и несиметрия. Съществуват зависимости между размерите на тигела и очакваните стойности на фактора на мощността и к.п.д. в работен режим, фиг.2, [4].

Индукционните пещи се считат за „неспокоен" товар и изменението на напрежението с 1-2*%/s* и повече има случаен характер. По време на работния процес се наблюдават несиметрия, несинусоидалност, а в някои случаи и непълнофазни режими, като фазните токове и напрежения имат както четни, така и нечетни хармоници. Честотният състав на хармониците и реактивната мощност, консумирана от пещта се изменят в широки граници, а компенсиращите устройства са настроени за най-тежкия режим – топене на шихтата. Това води до неефективна филтрация на хармониците и до прекомпенсация на реактивна мощност. Тези негативни явления се проявяват при понижено натоварване на пещта. Генерираните при работа на пещта висши хармоници на напрежението и тока водят до допълнителни загуби на активна мощност и енергия, които са 10÷35% от конвенционалните загуби на мощност и енергия. Несиметричните режими от друга страна обуславят появата на т.нар. пулсираща мощност, която също предизвиква допълнителни загуби на мощност и енергия (5÷8% от конвенционалните загуби на мощност и енергия), [1, 2, 5].

Допустимите стойности на n-я хармоник на напрежението при $U_H = 400\ V$ се представят в таблица 1, [1].

Табл. 1.

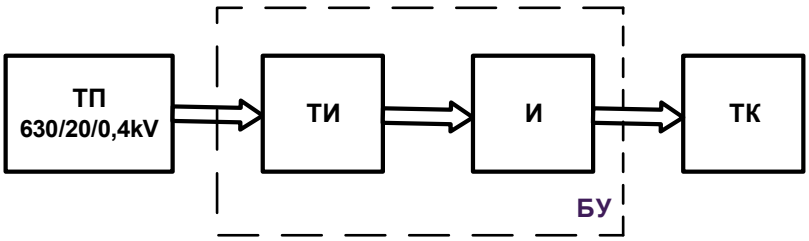
Допустими нива на хармониците при $U_H = 400\ V$.

Хармоници	Номер на хармоника ϑ	Средна стойност, %
Нечетни, некратни на 3	5	6.0
	7	5.0
	11	3.5
	13	3.0
	17	2.0
	19	1.5
	23	1.5
Нечетни, кратни на 3	3	5.0
	9	1.5
	15	0.3
	21	0.2
Четни	2	2.0
	4	1.0
	6	0.5
	8	0.5
	10	0.5
	12	0.2

2. РЕЗУЛТАТИ ОТ ПРОВЕДЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Разглежда се работата на малка индукционна тигелна пещ с номинална мощност 400 *kW* и работна честота до 1000 *Hz*. Този тип пещи се срещат в леярски цехове за малогабаритни отливки, получени при топене на чугун, обикновени и високолегирани стомани и сплави, ремонтни цехове към промишлени предприятия, работещи с легирани стомани и сплави.

Принципната блокова схема на този вид пещи е представена на фиг.3.



Фиг.3. Блокова схема на индукционна пещ ПИ-400.

Захранващото напрежение (3x400V/50Hz) постъпва през трансформаторен пост ТП, изправя се посредством статичен тиристорен преобразувател ТИ, постъпва в мостов инвертор, след което се подава на трептящия кръг ТК. ТП и И се управляват от електронен блок за управление. Регулируемият тиристорен преобразувател (схема Ларионов) консумира от мрежата 475 *kW*, $U_{TП}$ = 100÷500 *V* при честота f_H = 1000 *Hz*±2.5%. Инверторът има автоматичен регулатор за изменение на честотата. Трептящият кръг се състои от индуктор и кондензаторни

батерии. Изменението на честотата на трептящия кръг се постига по два начина: електронно и ръчно, в зависимост от натоварването на пещта. Честотата се изменя в границите f = 700 *Hz* при пускане на пещта и f = 1000 *Hz* при работа. Инверторът има въведени следните ограничения: по входен ток, по изходно напрежение, по време на възстановяване на инверторните тиристори, ограничение по честота. Пещта ПИ-400 работи със средна честота, като по този начин се постига по-голяма специфична мощност и по-голяма производителност при една и съща вместимост в сравнение с пещите, работещи с мрежова честота.

Номиналното напрежение на индуктора е 800 *V*, при номинален ток – 800 *A* и максимален – 1000 *A*. Пещта има производителност 250 *kg/h*, задвижването се хидравлично, а охлаждането е водно. Хидравличната система се състои от: резервоар, хидравлична помпа тип А14Х, манометър, тръбен хидравличен разпределител, регулируем дросел с обратен клапан, силов цилиндър, филтър, трифазен асинхронен двигател с мощност 4 *kW* и честота на въртене 1450 min^{-1}. Двигателят задвижва помпа за нагнетяване на масло с налягане $6.10^5 \div 7.10^5 MPa$.

Водната система е за охлаждане на индуктора, кондензаторните батерии, хидроелектрическите съоръжения и тиристорния преобразувател. Пещта и съоръженията към нея имат следните топлинни излъчвания, посочени от производителя: тиристорен преобразувател – 2.5 *kW*; кондензаторен модул – 2 *kW*; шинопровод от кондензаторния модул – 2.5 *kW*; излъчване на пещта – 3.5 *kW*. Дебитът на водата за охлаждане на тези съоръжения са, както следва: за преобразувателя – 6 m^3 при мощност 30 *kW*; за кондензаторния модул – 4.2 m^3 при мощност 22 *kW*; за пещта – 2.5 m^3 при мощност 60 *kW*.

В блоковете за управление са предвидени следните защити:

- термична защита срещу претоварване – осъществява се с три броя биметални елемента;
- максимално-токова защита (автоматични прекъсвачи);
- минимално-напреженова защита, сработваща при намаляване на мрежовото напрежение под $0.85 U_H$;
- бързодействащи стопяеми предпазители във веригите на изправителните тиристори;
- защита на тиристорния изправител от пренапрежения;
- бързодействаща максимално-токова защита на тиристорния изправител;
- защита от прекъсване на една от фазите;
- стопяеми предпазители в оперативните вериги;
- максимално-напреженова защита на инвертора при превишаване на напрежението над 800 *V*;
- защита на инвертора против едновременно отпушване на тиристори от едно рамо;
- защита от липса на охлаждаща вода или намаляване на дебита й – осъществява се с контактни термоманометри – 3 броя за тиристорния изправител и 9 броя за инвертора.

За анализ на ефективността на работа на пещта са проведени измервания при топене на стомана, с пълен и половин капацитет на пещта (режим синтероване), при следните условия: $U_{ИНВ}$=750 V, f = 800 *Hz*, $U_{ТИ}$ = 500 *V*, $I_{ТИ}$ = 800 *A*. Температурата на разтопения метал е 1630^oC, а в режим на синтероване – 800^oC. Резултатите от измерванията за трите фази са представени в Таблици 2, 3 и 4.
Режимът синтероване започва с увеличаване на температурата в пещта със 100$^oC/h$ до достигане на 800^oC. След това скоростта на нарастване на температурата се променя на 150$^oC/h$ до 200$^oC/h$. Температурата на синтероване трябва да се поддържа не по-малка от 50^oC над работната, в продължение на 1-2 часа. За този период е необходимо увеличаване мощността на пещта с ΔP, съобразно количеството метал в нея G, [kg] и обема на тигела, отчетен с коефициент α:

$$\Delta P = \alpha G, \quad (1)$$

където α = 0.14 за пещи до 16 t и α = 0.1 за пещи над 16 t, [3, 4].

Табл. 2.

Регистрирани стойности на фазови напрежения и нива на хармоници, постъпващи в ТИ за разглежданите два режима.

	Режим на пълно натоварване			**Режим на синтероване**		
	U_A	**U_B**	**U_C**	**U_A**	**U_B**	**U_C**
U_H, V	225	226	222	225	224	221
THD_U, %	7.2	7.8	8.4	8.4	9.6	7.7

Табл. 3.

Измерени нива на хармониците при пълно натоварване на пещта.

Номер на хармоника ϑ	**Средна стойност, %**		
	A	**B**	**C**
3	0.3	0.5	0.6
5	5.4	5.0	5.3
7	3.6	3.6	3.8
9	0.8	0.5	1.1
11	1.8	3.4	2.5
13	2.2	2.1	2.1
15	0.3	0.4	0.1
17	0.9	1.2	1.4
19	0.1	0.1	0.7
21	0.6	0.5	0.3

Табл. 4.
Измерени нива на хармониците при половин натоварване на пещта (режим синтероване).

Номер на хармоника ϑ	Средна стойност, %		
	A	**B**	**C**
3	0.2	0.4	0.6
5	2.8	2.4	2.8
7	2.2	1.3	1.3
9	0.4	0.3	0.2
11	1.5	1.4	1.6
13	1.0	0.8	0.8
15	0.1	0.5	0.2
17	1.0	1.6	1.5
19	1.2	0.2	0.8
21	0.4	0.4	0.4

За оценка ефективността на работа на една пещ се използват два метода, [1, 3], директен и индиректен. При директния метод коефициентът на полезно действие може да бъде определен чрез измерване на количеството гориво/енергия, изразходвано за загряване на единица тегло от материала, произведен от пещта:

К.п.д. на пещта = Топлина в материала / Топлина в консумираното гориво (2)

Количеството топлина Q, подадено към материала може да се определи чрез израза:

$$Q = mC_P(t_2 - t_1), \tag{3}$$

където: Q – количество топлина, *kJ*; m – тегло на материала, *kg*; C_P – специфичен топлинен капацитет, *kJ/kg.K*; t_2 – крайна желана температура, ^oC; t_1 – начална температура на материала, преди да влезе в пещта, ^oC.

При индиректния метод к.п.д. на пещта се изчислява след изваждане на загубите на топлина в димните газове, загубата в резултат на влагата в димните газове, загуба на топлина през отворите и обшивката на пещта, както и други неотчетени загуби от входа на пещта. Параметрите, които следва да бъдат взети предвид, за да се изчисли к.п.д. по индиректния метод са: почасовото потребление на енергия, произведен материал, излишък на въздух, температура на димните газове, температура на пещта в различните зони, температурата на обшивката на пещта и температура на въздуха.
К.п.д. на промишлена пещ се пресмята по зависимостта:

$$\eta = \left(\frac{Q_1}{Q_P}\right).100\%, \tag{4}$$

$$Q_1 = Q_{out.m} - Q_{in.m} + Q_{out.furn.} - Q_{ekz} - Q_{end.}, \tag{5}$$

където: Q_1 - полезно използвана топлинна енергия, Q_P – разполагаема топлинна енергия за 1 kg гориво; $Q_{out.m}$ – топлинен поток, който напуска пещта с обработения материал; $Q_{in.m}$ – топлинна енергия, постъпваща в пещта с подлежащия на топлинна обработка материал; $Q_{out.furn.}$ – топлината, която е оползотворена за вторични цели извън пещта; Q_{ekz} – топлина от екзотермичните реакции в пещта; $Q_{end.}$ – топлина от ендотермичните реакции в пещта.

Загубите на топлина S_Q имат няколко компонента: Q_2 – загуби на топлина с изходящите газове; Q_3 и Q_4 – загуби от топлинна енергия, дължаща се на химично и механично недоизгаряне; Q_5 – топлинни загуби, вследствие топлообмена през стените на промишлената пещ; Q_6 – топлинни загуби от отпадъчните продукти, изхвърляни от съоръжението.

$$S_Q = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \tag{6}$$

Следователно, к.п.д. на една промишлена пещ може да се представи с израза:

$$\eta = \left(1 - \frac{S_Q}{Q_P}\right).100\% . \tag{7}$$

При известни специфична топлина на стоманата – 0.186 Wh/kg/^{o}C, и латентна топлина за топене на стоманата 40 Wh/kg/^{o}C, може да се определи коефициентът на полезно действие на пещта при пълно натоварване. Точката на топене на стоманата, измерена при наблюдавания процес е 1630°C при температура на околната среда 30°C (в момента на провеждане на измерванията). Топлосъдържанието на пещта определяме като произведение:

Топлосъдържание = 250 *kg* . 0.186 *Wh/kg/^{o}C* . (1630-30) = 74.4 *kWh/t*
Латентна топлина = 40 *Wh/kg/^{o}C* . 250 *kg/h* = 10 *kWh/t*
Обща топлина = 74.4 *kWh/t* + 10 *kWh/t* = 84.4 *kWh/t*

При действително използвана енергия 400 kWh, коефициентът на полезно действие на пещта е: 84.4/400=21.1%. За режим синтероване (поддържане на плавка при по-ниска температура от 800°C и работа при половин натоварване на пещта), к.п.д. определен по този начин е 10.2%.

Потенциал за енергийни спестявания

За да се реализира енергийна ефективност при средни и малки пещи трябва добре да се познават и разбират енергийните и материални потоци в процеса на металолеене. В [6, 7, 8, 9] са анализирани подходи за директни и индиректни спестявания на енергия. Директни спестявания на енергия могат да се реализират чрез предварителното подгряване на метала; повишаване на топилния капацитет на пещта; редуциране на необходимата за топенето енергия. При зареж-

дането и трансфера на предварително загретия метал обаче може да се стигне до загуба на големи количества топлина чрез конвекция и излъчване. Следователно, за да се редуцират ефективно тези загуби, процесите на предварително подгряване и топене трябва да се извършват в близост един до друг.
За повишаване на енергийната ефективност могат да се приложат няколко подхода:

- намаляване честотата на зареждане на метала, което ще доведе до понижаване на загубата на метал и топлинна енергия;
- осигуряване на обучение за операторите на пещта – доказано е, че работата на оператора може да повлияе на енергопотреблението в размер на 10%;
- поддържане на леко положително налягане на камерите на пещите;
- пещта да се натоварва в съответствие с нейния капацитет;
- утилизация на отпадната топлина;
- проучване на цикъла на работа на пещта и избягване на работа при удължено време и излишно нагряване.

Индиректни спестявания на енергия могат да се реализират чрез материална експлоатационна ефективност (съотношението между качествено отлетите детайли и общото количество стопен метал). Подобряването на действителния добив е може би най-простият начин леярните да спестят енергия. Методът се фокусира предимно върху самия процес и търсенето на възможности за пестене на материал, а не е свързан в такава степен с работните характеристики на производственото оборудване. За да се определи действителният добив от процеса на металолеене, трябва да се анализират всички негови етапи.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тигелната индукционна пещ, работата на която е обект на анализ, работи в режим „работа с постоянни анализи“. Счита се, че всяка плавка има еднакъв химичен състав, в пещта може да остава различно количество „блато“, което при добра организация ще позволява работа при номинална мощност и по-голяма стойност на фактора на мощността.
Основни проблеми при електроснабдяването на индукционните пещи са изразеният влошен естествен фактор на мощността, несиметричният товар в мрежата и променящото се захранващо напрежение, което силно влияе на мощността на кондензаторните батерии. За разглеждания случай несиметричността е минимална. Отклонения се появяват при аварийни ситуации. От товаровите графици става ясно, че по време на топене при пълно натоварване на пещта се наблюдава неравномерна консумация на активна енергия. Най-благоприятният за изпълнение на компенсиране и симетриране на товара е основният режим на работа, който продължава около 85 min при $\cos\varphi = 0.2 \div 0.88$.
Разглежданите в статията проблеми са с научно-приложен характер и са насочени към оценка и начини за повишаване на енергийната ефективност на индукционни пещи с малка мощност. Тъй като металолеенето е високо енергийно-интензивен процес, от съществено значение е оптималното процесно управление при добро познаване на енергийните и материалните потоци.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Жежеленко И. В., А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк, Ю. Л. Саенко, Н. А. Нойберегер. (2012), ***Электромагнитная совместимость потребителей***, „Машиностроение“, Москва, 2012, ISBN 978-5-94275-637-6.

[2] Киров Р., И. Илиев. (2017), ***Електроенергийна ефективност***, ЕНА ЕООД, Варна, 2017, ISBN 979-619-7255-05-8.

[3] Харлов Н. Н. (2007), ***Электромагнитная совместимость в электроэнергетике***, Издательство ТПУ, Томск, 2007, УДК 537.86/87.

[4] Слухоцкий А. Е. (1981), ***Установки индукционного нагрева***, Энергоиздат, Ленинград, 1981.

[5] Илиев И. (2015), ***Изследване, анализ и количествена оценка на реалния принос за влошаване на качеството на електрическа енергия от страна на индустриалните потребители и комунално-битовия сектор***, дисертационен труд за придобиване на о.н.с. „доктор”, Технически университет-Габрово, 2015.

[6] Енерджи ревю, бр. 4, 2017, юли, ISSN 1314-0671,(*www.energy-review.bg*)

[7] *http://adportal.bg*

[8] *http://inductor.su/techlit_1.php*

[9] *http://www.mgu.bg/sessions/07/3/vbagarov_ivylev.pdf*

Автори: Димитрина Йорданова Коева, гл. ас. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”,Технически университет - Габрово, E-mail address: *dkoeva@abv.bg*; **Свилен Радославов Рачев**, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Технически университет - Габрово, E-mail address: *sratchev@mail.com*; **Любомир Диянов Димитров**, гл. ас. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Технически университет - Габрово, E-mail address: *eng.l.dimitrov@abv.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: д-р инж. Борислав Бойчев

ТЕГЛИТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ТРАМВАЙНА МОТРИСА T8M-700 IT

Тодор Йонов

***Резюме**: В статията по изчислителен път са получени теглителните характеристики на трамвайни мотриси T8M-700IT Те могат да се използват главно като методически при учебен процес, както и при сравнение на получените след тягови изчисления величини.*
***Ключови думи:** трамвайни мотриси, тяга, тягови изчисления, асинхронен двигател, честотен преобразувател.*

CALCULATION TRACTION CHARACTERISTICS OF TRAMS T8M-700 IT

Todor Yonov

***Abstract:** The article by calculations are derived traction characteristics of trams T8M-700IT They can be used mainly as methodical in learning process, as well as comparison of the after traction calculations quantities.*
***Key words**: trams, traction, traction calculations, induction motor, frequency converter*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Напоследък в София се наблюдава усилена замяна на трамвайния парк в градският електрически транспорт. Ускореното навлизане на нови транспортни средства в трамвайния транспорт от внос /PESA 122NaSF Swing/, както и новото производство на трамвайни мотриси в София /T8M-700IT/ постепенно заменя старите мотриси /България 1300 и др./, изпълнени по класическата схема – постояннотокови двигатели с последователно възбуждане [ПТД с ПВН] управлявани с помощта на пускови резистори.
При мотрисите наше производство - T8M-700IT се използва вносно силово електрообзавеждане производство на Прагоимпекс,- тягови асинхронни двигатели [АД] TAM1004C/1000 управлявани от силов (честотен) преобразувател [СП] CAC 1000AM/Cegelec. Обикновено производителите дават данни, касаещи предимно експлоатацията и обслужването на електрообзавеждането, но теглителните и спирачните характеристики не се дават. Те са необходими за тягови изчисления, както при проектирането на следващите участъци, така и за контролни тягови изчисления на даден участък, при промяна на местата на спирките. Тези изчисления дават основните връзки между електрическите и механични величини при различните режими на движение на транспортно средство

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

– теглене, свободно движение /по инерция/ и спиране. Тук е направен опит като се изходи от изискванията на транспортното средство да се построят интересуващите ни характеристики, необходими в учебният процес по дисциплината „Електрически транспорт“

2. НАЧАЛНИ ДАННИ

Като начални данни за изчисление на характеристиките се изхожда от

- номиналните данни на двигателите /ТАМ1004С/1000/ на трамвайните мотриси Т8М-700IT.

$P_н = 90$ kW, $U_н = 400$V; $I_н = 158$A; $f_н = 67$ Hz;

$n_н/n_{max} = 1976/4800$ min^{-1}; $M_н/M_{max} = 439/1525$ Nm

- номиналните данни на мотрисата - $L_{мот}= 26,62$m; $B_{мот} = 2,25$m;

$G_{нето} = 30,04$t; $G_{max} = 50,9$t; конструктивна скорост $v_{max} = 60$ km/h; максимален преодоляван наклон $i_{max} = 60‰$ предавателно число на редуктора – $\mu = 8,77$; отношение на диаметър ново колело / износено колело – 695/590 mm.

- тягови групи - двигатели и преобразуватели - 4 броя.

АД като тягов двигател има безспорни предимства пред традиционно използваните ПТД с ПВН – по-ниска цена за единица мощност, по-голяма мощност при еднакви маса и габарити, по-лесна експлоатация и ремонт. Основният недостатък на АД, като тягов е трудното регулиране на честотата на въртене, свързана с регулиране на честотата на захранващото напрежение. С напредъка на силовата електроника използването на системата ЧП-АД в транспорта вече се налага с много бързи темпове. Това налага и необходимостта от наличието на тягови характеристики на системата ЧП-АД.

Най-разпространените до момента тягови електродвигатели използвани за задвижване на транспортни средства са ПТД с ПВН. Това се дължи на техните безспорни предимства пред останалите – меки електромеханични (теглителни) характеристики, голям пусков момент, голяма претоварваща способност и др. [2]. Затова и при използване на друга система за електрозадвижване, производителите винаги се стремят към запазване на меките теглителни характеристики. Това се доказва и от редица публикации [2,3].

3. ТЕОРЕТИЧНИ ПРЕДПОСТАВКИ

Един от най-важните параметри на АД е хлъзгането, определено от (1) [1]

$$s = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \tag{1}$$

$$\omega p = 2\pi f \tag{2}$$

където p са чифтовете полюси; f - честотата на захранващото напрежение; n – честотата на въртене.

С индекси 1 и 2 са означени захранващата честота на напрежението и въртенето на статорното магнитно поле и ротора.

При работа на АД неговото хлъзгане се променя от 1 (при скорост на въртене нула) до $s = 0$ (при изравняване на скоростта на ротора с тази на въртенето на статорното магнитно поле). Работната област (устойчивата част) на характерис-

тиката въртящ момент – хлъзгане M(s) е при стойности на хлъзгането $0 \le s \le s_{кр}$. В останалата област на изменение на хлъзгането до *s = 1* АД работи неустойчиво. За използването на системата ЧП-АД като тягова параметърът хлъзгане не дава пълна информация за състоянието: при движение е необходима промяна на честотата на захранващото напрежение f_1 и съответно на ротора f_2, в много широк диапазон – от 0 до f_1^{max}, по-голяма от номиналната, за режими на работа на двигателя със скорост над синхронната.

Връзката между момента и ъгловата скорост и хлъзгането е дадена с (3)

$$M = \frac{m_1 . r_2' . U_1^2}{\omega_0 [(r_1 . s + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]} \tag{3}$$

където параметрите на различните величини са съгласно еквивалентната схема с изнесена намагнитваща верига на изводите на първичната [1]. Ако се изследва моментът спрямо хлъзгането за минимум и максимум – критичен момент ($M_к$) във функция на критичното хлъзгане ($s_к$) в генераторен и двигателен режим, след приравняване на dM/ds=0 се вижда, че изразът се нулира ако

$$r_2'^2 - r_1^2 . s^2 - x_k^2 . s^2 = 0$$

Тогава за критичното хлъзгане се получава

$$s_k = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$$

Като се има в пред вид, че при големи АД r_1 е съществено по-малко от $x_к$ следва, че $s_k \approx \pm {r_2'}/{x_k}$ и за критичният момент се получава

$$M_k \approx \pm \frac{m_1 . U_1^2}{2\omega_0 x_k} \tag{4}$$

Ако се вземе отношението на двата момента ($M/M_к$) и се положи $\varepsilon = r_1 / \sqrt{r_1^2 - x_1^2}$ и при условието, че $r_1 \approx 0$, за момента на двигателя се получава

$$M = \pm \frac{2 . M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \tag{5}$$

Тъй като натоварването на АД при движение на транспортното средство се изменя в много широк диапазон, е много важно да се търси минимизация на изразходваната за тягови нужди енергия. От това условие следва че се търси режим на работа с минимизиране на загубите на мощност ΔP. Тези загуби имат три съставки - загуби в медта на статора, загуби в ротора и магнитни. Загубите в статора и магнитните загуби не зависят от натоварването. Тогава задачата за минимизиране на загубите се свежда до минимизация само на загубите в ротора. Или

$$\Delta P_2 = M . (\omega_1 - \omega_2) = \frac{2.\pi}{p} . M . (f_1 - f_2) = \frac{2.\pi}{p} . M . \Delta f \tag{6}$$

Или условието за минимум е

$$\Delta f = (f_1 - f_2) = const \tag{7}$$

При разглеждане на два режима при различни напрежение и честота се получава (8)

$$\frac{U_1}{U_1'} = \frac{f_1}{f_1'} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_1'}} \tag{8}$$

За нуждите на транспортното средство са важни не моментът и честотата, а скоростта на движение и теглителната сила. Лесно е да се премине от момент и честота в скорост след преобразуване може да се запише:

$$\frac{U_1}{U_1'} = \frac{v_1}{v_1'} \cdot \sqrt{\frac{F_1}{F_1'}} \tag{9}$$

Характерните закони на регулиране са представени на фиг.1

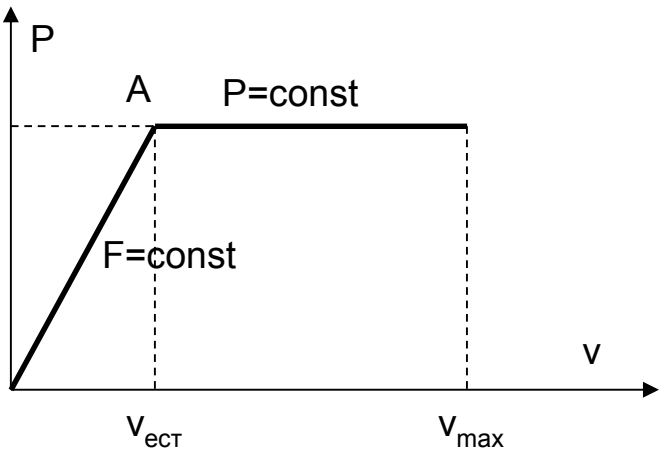
От условието за пускане на АД с постоянна теглителна сила F следва, че трябва въртящият момент на двигателя M който зависи от взаимодействието на статорното магнитно поле и тока на ротора, приведен към статора $I_2' = const$ да остане постоянен [2]. И следователно токът на статора $I_1 = const$. Това условие се изпълнява, ако за времето на пусковия режим, се спазва условието

$$\frac{F_1}{F_1'} = 1 \tag{10}$$

Или тогава от (9) и (10) следва, че

$$\frac{U_1}{U_1'} = \frac{v_1}{v_1'} \tag{11}$$

Следователно, за да се гарантира пусков процес с максимални енергийни показатели е необходимо напрежението подавано на статора да се повишава пропорционално на скоростта на движение на транспортното средство.



Фиг.1.

След излизане на естествена характеристика /фиг. 1, точка А при скорост $v_{ест}$/ за равномерното натоварване на всички съоръжения е необходимо да се спазва условието за постоянна мощност на АД или P = const.

След заместване и преобразуване и във връзка с (10) се получава, че

$$\frac{U_1}{U_1'} = \sqrt{\frac{v_1}{v_1'}} \tag{12}$$

При движение с постоянна скорост от (11) следва, че е необходимо да се спазва условието

$$\frac{U_1}{U_1'} = \sqrt{\frac{F_1}{F_1'}} \tag{13}$$

Теглителната характеристика F = F(v), се получава ако се положи, че отношението между напреженията е 1. Тогава се получава и характеристиката

$$\frac{\left(v_1^{'}\right)^2}{v_1^2}=\frac{F_1}{F_1^{'}} \qquad (14)$$

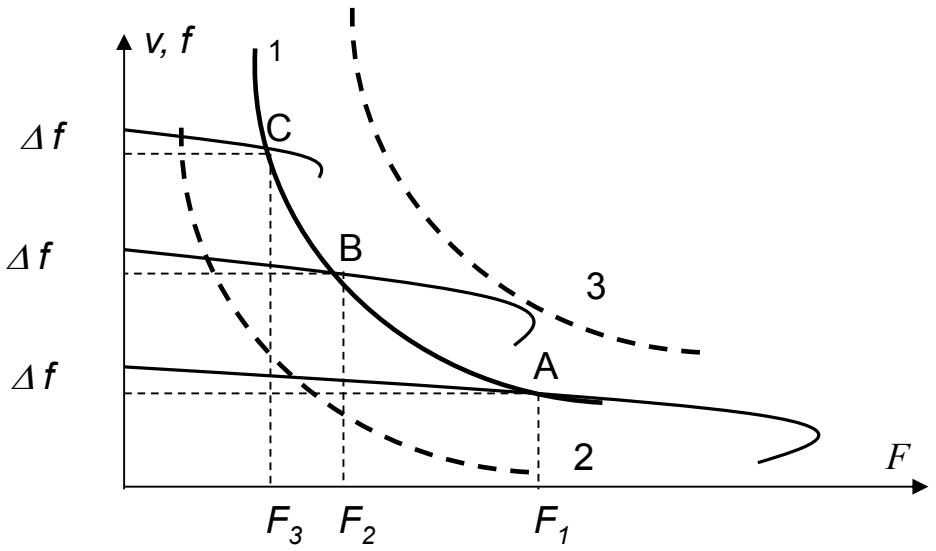
Следователно, характеристиката е хипербола, такава както при ПТД с ПВН при ненаситена магнитна система. Това е показано на фиг.2 [1,2].
На нея АД работи в точка А, при съответните напрежение и честота. При повишаване на скоростта на транспортното средство нараства напрежението и честотата, а теглителната сила намалява съгласно (10) при запазване на условието $\Delta f = const$, АД работи в нова т. В. При по-нататъшното увеличение на скоростта – т.С и т.н. Така се изписва характеристиката 1.
Вижда се нейният характер – хипербола, повтаряща тяговата характеристиката на ПТД с ПВН. Ако се променя само захранващото напрежение при повишаване (или понижаване) се получава характеристиката 3 /2/.

Регулирането на въртенето може да се извърши при различни условия [3]. При поддържане на $U_1/f_1 = const$ статорният ток и моментът зависят само от скоростта на въртене на ротора. Тогава моментът на двигателя е пропорционален на квадрата на статорния ток.

ЧП може да се управлява така, че АД [3] да работи с управление по *ток* или *напрежение*. Като са възможни варианти с или без обратни връзки. В транспорта най-често използваните обратни връзки са тези по скорост [3]. При управление *по ток*, лесно се вижда, че без обратна връзка по скорост теглителната сила е пропорционална на квадрата на тока в ротора. Или характеристиката е както на ПТД с ПВН.
При наличие на обратна връзка по скорост са възможни две комбинации на променливите:

1. Поддържат се постоянни напрежението и скоростта на въртене на ротора, а се променя честотата f_1 . Лесно може да се провери, че в този случай характеристиките на разглежданата система – електромеханични и механична са като на ПТД с ПВН.
2. При поддържане на постоянни статорен ток и скорост на въртене на ротора се вижда че за да е изпълнено условието $I_1 = const$ е необходима да се спазва условията $U_1/f_1 = const$ и $\omega_2 = const$. Тогава токът и моментът не зависят от честотата на въртене и се получават абсолютно меки характеристики.

При управление по *напрежение* и наличие или отсъствие на обратна връзка по скорост се получават характеристики, сходни с тези при управление по ток – повтарят характеристиките на ПТД с ПВН
Подобни резултати могат да се получат и при ползване на универсалните характеристики на ПТД с ПВН за трамваи [3]. Тези характеристики могат да се определят на базата на допускането, че характеристиките на база на системата СП-АД се търсят максимално близки до тези на ПТД с ПВН



Фиг.2.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ДВИГАТЕЛЯ

Съгласно теорията от т. 2, използвани литературни източници [1,2] и проведени изчисления са получени характеристиките на АД. На фиг.3 е показана зависимостта n=f(M) при изменение на честотата на захранващото напрежение в генераторен и двигателен режим, като е направено допускането, че моментите в двигателен и генераторен режим са равни.

За нуждите на тяговите изчисления са необходими не характеристики на двигателя, а на теглителната сила във функция на скоростта. Тя се изменя аналогично - фиг.4.

При определяне характеристиката на системата СП-АД трябва да се има в предвид, че електрическите транспортни средства имат редица ограничения, които трябва да се спазят. Такива са ограниченията по сцепление, ток, скорост и максимално напрежение. Изхожда се и от допусканията:

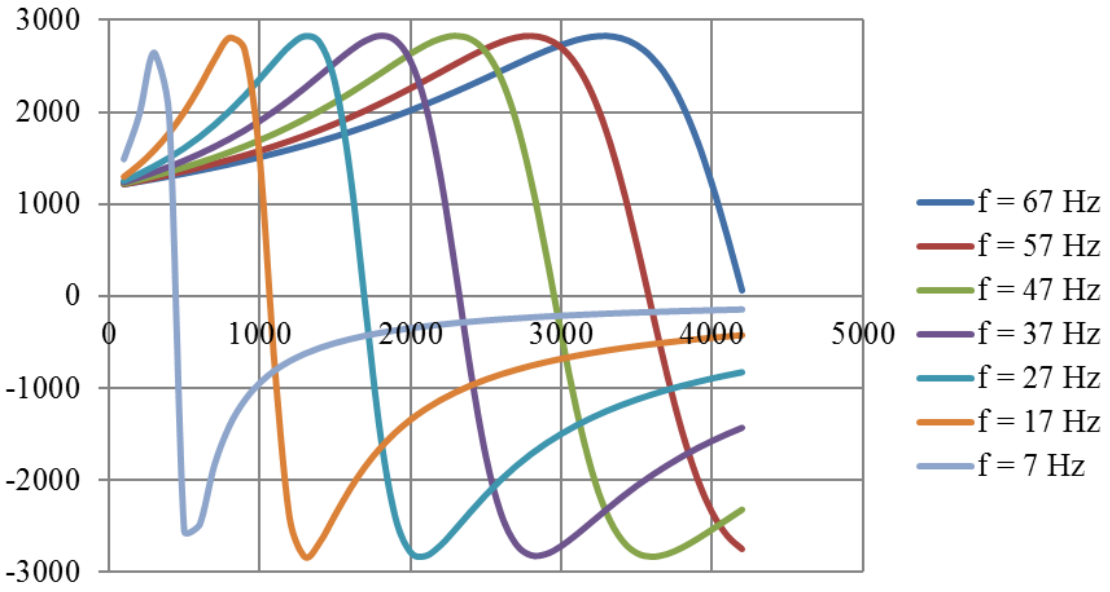
- При потегляне теглителната сила не трябва да се надвишава ограничението по сцепление, т.е

$$F_{\psi} = G.\psi \geq F_{max} \tag{15}$$

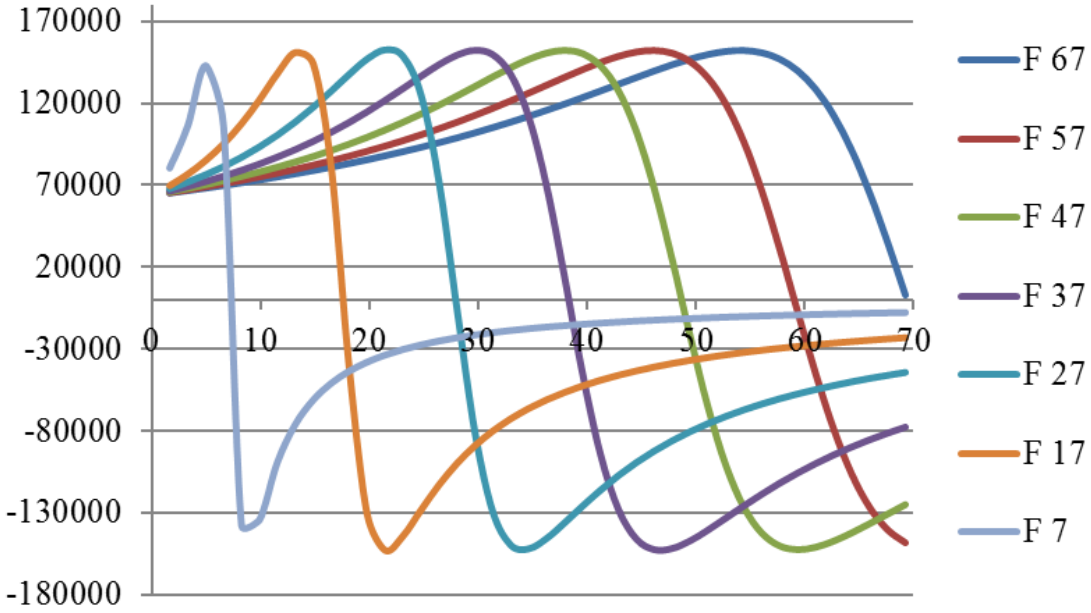
- Теглителната сила на мотрисата при потегляне трябва да е приблизително равна на максималната теглителна сила, или на критичния (максималният) момент на двигателите:

$$F_{\text{п}} \approx F_{kp} = F_{max} \leq F_{\psi} = G.\psi \tag{16}$$

Ограничението по максимален ток произхожда ограничението по сцепление и максималният ток на ограничаващият елемент от силовото електрообзавеждане На полученото ограничение по сцепление F_{ψ} отговаря ток I_{ψ}. Ограничението по максимален ток (мощност) зависи от възможностите за претоварване на системата ЧП-АД. Тя се състои от два основни компонента – силов преобразувател и тягов двигател.



Фиг.3. Зависимост M=f(n) при изменение на честотата на захранващото напрежение



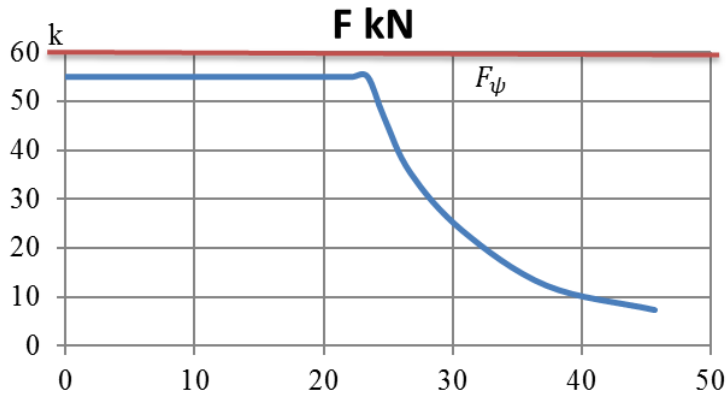
Фиг.6. Зависимост F=f(v) на мотрисата
при промяна на честотата на захранващата мрежа

Токът при пряко пускане на АД е около 4-8 пъти номиналния, като при помощни двигателя, пусковият ток е по-голям. Затова и пусковите им токове трябва да се ограничават. Обикновено в транспортните средства пусковите токове на двигателите се ограничават до $\hat{I}_{П} = (1{,}5 \div 2) I_{н}$ Или ограничението по максимален ток на двигателите е до $300A$, което за мотрисата означава около 550А. Ограничението по ток на преобразу-вателя е по-високо. Ограничението по ток е най-малкия от получените токове $I_{огр} = min(I_{ψ}, I_{maxАД}, I_{maxСП})$. Като се сравнят всички ограничения се получава, че в случая ограничението е по сцепление.
Ограничението по скорост е конструктивната скорост на мотрисата. Съгласно данните на производителя $v_к = 70\ km/h$.

Ограничението по напрежение се дава от данните за максимално напрежение на СП и АД. Тяговите двигатели за транспортни средства работещи в режим на рекуперативно спиране трябва да са оразмерени за напрежение до два пъти номиналното. Тук ограничението е от ЧП – до *800V*.
Пусковият момент, при спазване на (13) фактически е равен на критичния, намален с корекционен коефициент на запаса, $к_з \approx 0{,}95$. Ограничението по сцепление се получава 58 kN.

Теглителната характеристика на системата ЧП-АД за един тягов двигател се получава при допускането, че алгоритъмът на управление на преобразувателя се подчинява на:

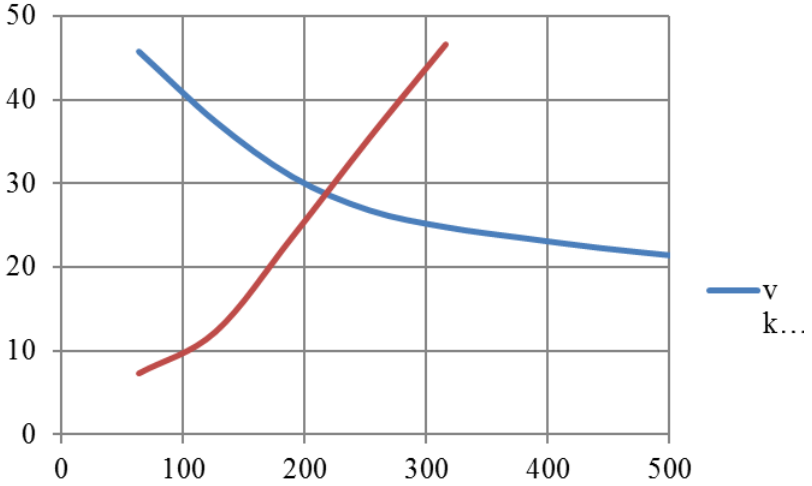
1. Законите за управление, представени в точка 2.
2. В процеса на ускорение на мотрисата, токът на тяговите двигатели се поддържа постоянен и равен на ограничението по максимален ток.
3. След излизане на естествена характеристика се търси максимално икономичен режим.



Фиг.5. Теглителна характеристика на системата ЧП-АТД на мотрисата

Тогава характеристиката се построява съгласно (15), данните за номиналната теглителна сила (16) [3]. Това е показано на фиг.5.

Освен теглителната характеристика F(v) за нуждите на тяговите изчисления е необходимо да са известни и електротяговите характеристики – F(I) и v(I). Те се построяват на съгласно изчислителните данни при същите предположения. Това е показано на фиг.6.



Фиг.6. Електротягови характеристики

5. ИЗВОДИ

От проведените изследвания и изчисления могат да се направят следните изводи:

- по изчислителен път са получени механични и електромеханични характеристики на АД и системата ЧП – АД, на трамвайни мотриси Т8М-700IT;
- получено е ограничението по сцепление на мотрисата и ток на системата ЧП – АД;
- получените характеристики, без да претендират за голяма точност, могат да се използват, *като методични* или за сравнителни тягови изчисления, при определяне на енергията при движение на трамвайни мотриси по един и същ участък.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Българанов Л.Б., И. Миленов, Г. Павлов, Ч. Джамбазки, Електрозадвижване София 2009, 281 стр.

[2] Българанов Л. Б. Електрически транспорт, София, 2009г., 284 стр.

[3] Българанов Л. Б. Проектиране на електрическата част на електрическите транспортни средства, ТУ-София, 1997г., 242 стр.

[4] Йонов Т. П. Петкова, Изчислителни тягови характеристики на системата преобразувател-двигател на метромотриси, Механика, Транспорт, Комуникации, *www.mtc-aj.com*, том 11, бр. 1, 2013, статия № 0768, стр. X-14 до X-21.

Автор: Тодор Иванов Йонов, гл. ас. Д-р, катедра ЕЕЕ, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: *todyon@tu-sofia.bg*

Постъпила на 15.12.2017 г. **Рецензент**: доц. д-р Иван Ангелов

АВТОМАТИЧНО ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ЛИНЕЙНИ ПАСИВНИ ЧЕТИРИПОЛЮСНИЦИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ - ЧАСТ 2

Симона Петракиева

Абстракт: *В настоящата работа се предлага аналитично автоматично изчисляване с Excel на коефициентите в А-системите уравнения на два линейни пасивни четириполюсника – $П_1$ (от П-тип) и $П_2$ (от Т-тип). След това четириполюсниците се свързват верижно и се определят елементите в А-матрицата на съставния четириполюсник, на чиято основа се намират реалните елементи, участващи в неговите еквивалентни заместващи схеми от П- и от Т-тип.*
Ключови думи: *линейни пасивни четириполюсници, А-система уравнения, линейни пасивни четириполюсници от П- и Т-тип – реални елементи*

AUTOMATIC CALCULATION OF THE PARAMETERS OF LINEAR PASSIVE TWO-PORT NETWORKS BY THE USE OF EXPERIMENTAL DATA – PART 2

Simona Petrakieva

Abstract: *In the paper an analytical automatic calculation with Excel of the coefficients in A-systems of equations of two linear passive two-port networks - P_1 (П-type) and $П_2$ (T-type), is proposed. Next, it is made the cascade connection of these two-port networks and it is determined the elements in A-matrix of the final compound two-port network. On this base, it is found the real elements, taking parts in the respective equivalent linear passive two-port networks from П- and T-type.*
Keywords: *linear passive two-port networks, A-system equations, linear passive two-port networks of П- and T-types – real elements*

1. INTRODUCTION

Present paper is a continuation of consequence of publications for automatic calculation of the coefficients in different mathematical models of linear passive two-port networks by the use of Excel. This predetermines from the fact, that in analysis of the two-port networks behavior the mathematical models presents in matrix form and its processing demands a large number of calculations. The main purpose of the paper is to help students in preparering the protocols for the labs on the discipline “Theoretical Electrical Engineering”.

© 2018 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

In [1] is proposed the procedure for recalculation the coefficients from *A*-matrix to *Y*-matrix and *Z*-matrix, respectively. And on this base, it determines the resulting *A*-, *Y*- and *Z*-matrices in cascade, parallel and serial connections of the considered two-port networks.

In [2] 3 procedures for analysis of 2 two-port networks, are suggested. Two of them analyze the two-port networks as an independent circuit, but the third one analyzes the compound two-port networks, gotten as a result of the cascade, parallel and serial connections of separately two-port networks. In analysis uses *A*-systems of equations.

In the both cases [1, 2] the analysis and the respective calculations with Excel are made on the experimental data from the labs on "Theory of Electrical Engineering", taken in the same named department in Faculty of Automation in Technical University of Sofia.

The present paper in continuation of the papers [1] and [2], but there it was proposed analytical automatic calculation by the use of Excel of the coefficients in different mathematical models of linear passive two-port networks, composed by real elements. Based on the final results of calculations it makes a physical interpretation of the elements, included in the compound two-port network (*П*- or *T*-type) in cascade connection of the initial two-port networks.

The present paper is organized as follows. In Section 2 are given the analytical expressions for determining the coefficients in *A*-matrices of linear passive two-port networks (of *П*- and *T*-type, respectively), defined by real elements. Formulas for obtaining the coefficients in *A*-system of the compound linear passive two-port network gotten in the cascade connection of the initial two-port networks, as well as the rule for determining the type of real elements, included in the resulting two-port network. In Section 3, the suggested in Section 2 theory is applied on the illustrative examples, as the calculations are made with Excel. Paper finish with analysis of the advantages and disadvantages of Excel for making the mathematical operation with complex numbers.

2. ANALYTICAL DETERMINATION THE COEFFICIENTS IN *A*-SYSTEM OF EQUATIONS FOR LINEAR PASSIVE TWO-PORT NETWORK, DEFINED BY REAL ELEMENTS

Relations between input and output complex currents and voltages in linear passive two-port network (Fig. 1) can be described by different systems of 2 linear equations - *Y*- , *Z*- , *A*- , *B*- , *G*- or *H*-types [3].

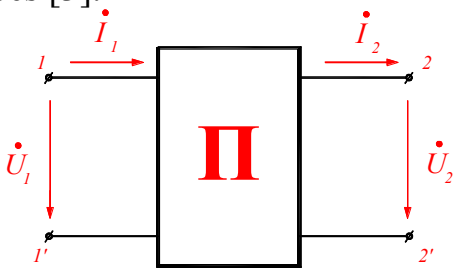


Fig. 1. Linear passive two-port network with complex values of the input and output voltages and currents

Usually, it uses the mathematical model, so called *A*-system of equations:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_1 = A.\dot{U}_2 + B.\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = C.\dot{U}_2 + D.\dot{I}_2 \end{vmatrix}, \tag{1}$$

where: $\underline{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$. Physical interpretation of each of elements in matrix $\underline{A}$ is discussed in [1].

Each linear passive two-port network can be presented by passive two-port network either in *П*- or in *T*-type (Fig. 2a or 2b).

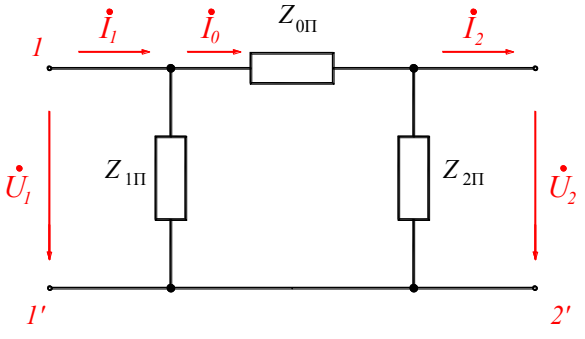


Fig. 2.a. *П*-type linear passive two-port network

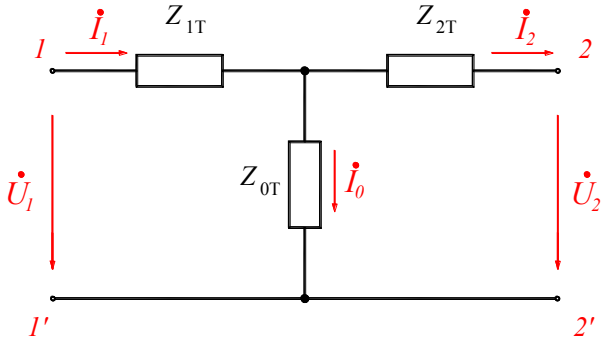


Fig. 2.b. *T*- type linear passive two-port network

The respective complex impedances, according to the used real elements, are determined in each of them. On this base, the elements of respective matrices $\underline{A}$ obtains as follows:

$$A = 1 + \frac{Z_{0П}}{Z_{2П}},\ -\qquad B = Z_{0П},\ \Omega$$
$$C = \frac{1}{Z_{1П}} + \frac{1}{Z_{2П}} + \frac{Z_{0П}}{Z_{1П}.Z_{2П}},\ S\qquad D = 1 + \frac{Z_{0П}}{Z_{1П}},\ - \tag{2a}$$

П-type linear passive two-port network

$$A = 1 + \frac{Z_{1T}}{Z_{0T}},\ -\qquad B = Z_{1T} + Z_{2T} + \frac{Z_{1T}.Z_{2T}}{Z_{0T}},\ \Omega$$
$$C = \frac{1}{Z_{0T}},\ S\qquad D = 1 + \frac{Z_{2T}}{Z_{0T}},\ - \tag{2b}$$

T- type linear passive two-port network

In cascade connection of *n* numbers of linear passive two-port networks (from Fig. 2a and 2b) with respective matrices $\underline{A}_1$, $\underline{A}_2$, …, $\underline{A}_n$ the matrix $\underline{A}$ of the resulting two-port network calculates as follows:

$$\underline{A} = \prod_{i=1}^{n} \underline{A}_i\ . \tag{3}$$

Then determines the values of the respective complex impedances in compound two-port network, gotten by this cascade connection of initial two-port networks (from *П*- or *T*-types) as follows:

$$Z_{0\Pi} = B,\ \Omega$$
$$Z_{1\Pi} = \frac{B}{D-1},\ \Omega \qquad (3.a)$$
$$Z_{2\Pi} = \frac{B}{A-1},\ \Omega$$

Π-type linear passive two-port network

$$Z_{0T} = \frac{1}{C},\ \Omega$$
$$Z_{1T} = \frac{A-1}{C},\ \Omega \qquad (3.b)$$
$$Z_{2T} = \frac{D-1}{C},\ \Omega$$

T-type linear passive two-port network

According to the value of Z it finds which real elements it includes (see the Table 1):

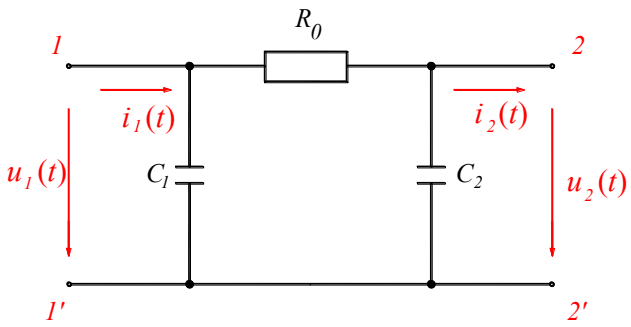
Table 1

Relations between real elements and complex impedances

Complex impedance	**Real elements**
$Z = R + jX_L = R + j\omega L$	Resistor with resistance R, Ω Coil with inductance L, H
$Z = R - jX_C = R - j\frac{1}{\omega C}$	Resistor with resistance R, Ω Capacitor with capacitance C, F
ω - frequency in considered electric circuit $\omega = 2\pi f = 2\pi.50 = 314$ rad/s	

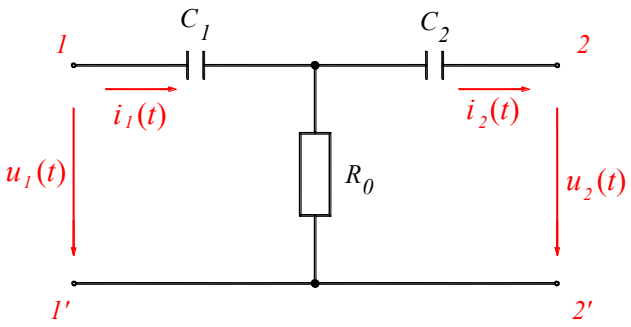
3. ILLUSTRATIVE EXAMPLES

Let consider 2 linear passive two-port networks in Π- and T-types, respectively (Fig. 3.a and Fig.3.b). The parameters, characterizing the real elements, included in the two-port networks, are known.



$R_0 = 516\ \Omega,\ C_1 = C_2 = 4\ \mu F$

Fig. 3a.



$R_0 = 304\ \Omega,\ C_1 = C_2 = 10\ \mu F$

Fig. 3.b.

Equivalent complex two-port networks with their complex parameters are shown on Fig. 2a and Fig. 2b.

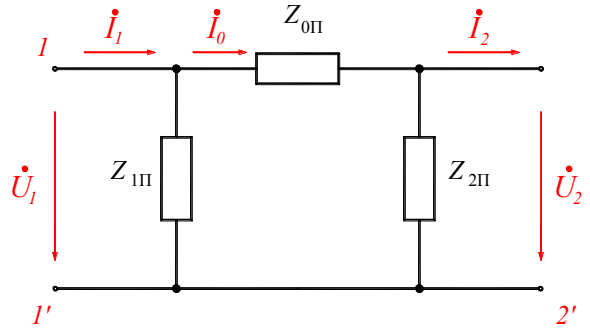


Fig. 2.a. *П*-type linear passive two-port network

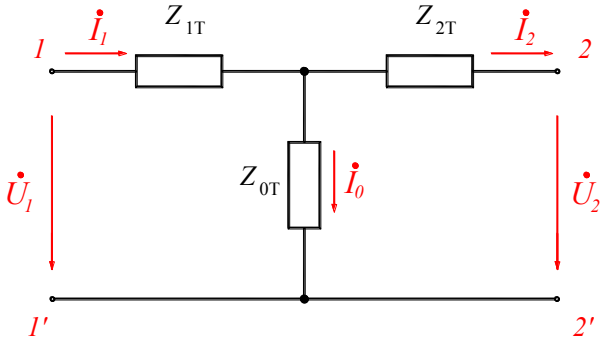


Fig. 2.b. *T*- type linear passive two-port network

$$Z_{0\Pi} = R_0,\ \Omega \qquad Z_{0T} = R_0,\ \Omega$$

$$Z_{1\Pi} = Z_{C_1} = -j\frac{1}{\omega C_1},\ \Omega \qquad (4.a) \qquad Z_{1T} = Z_{C_1} = -j\frac{1}{\omega C_1},\ \Omega \qquad (4.b)$$

$$Z_{2\Pi} = Z_{C_2} = -j\frac{1}{\omega C_2},\ \Omega \qquad Z_{2T} = Z_{C_2} = -j\frac{1}{\omega C_2},\ \Omega$$

All calculations during the analysis are made with Excel [4]. The consequence of working is following:

1. It determines the values of complex impedances for linear passive two-port networks from Fig. 2a and 2b (see Tables 2a and 2b).

Table 2.a:
П-type linear passive two-port network

Π_1		
C_1, F	C_2, F	R_0, Ω
0.000004	0.000004	516
X_{C1}, Ω	X_{C2}, Ω	
796.178	796.178	
$Z_{1\Pi}$, Ω	$Z_{2\Pi}$, Ω	$Z_{0\Pi}$, Ω
-796.178j	-796.178j	516

Table 2.b:
T-type linear passive two-port network

Π_2		
C_1, F	C_2, F	R_0, Ω
0.000010	0.000010	304
X_{C1}, Ω	X_{C2}, Ω	
318.471	318.471	
Z_{1T}, Ω	Z_{2T}, Ω	Z_{0T}, Ω
-318.471j	-318.471j	304

2. It obtains the elements of the respective matrices $\underline{A}$ in the mathematical model of the considered two-port networks; using formulas (2a) and (2b) (see Tables 3a and 3b).

Table 3a:
П-type linear passive two-port network

Matrix $\underline{A}_1$	
1+0.648096j	516
-0.000814+0.002512j	1+0.648096j

Table 3b:
T-type linear passive two-port network

Matrix $\underline{A}_2$	
1-1.047602j	-333.630848-636.942j
0.003289	1-1.047602j

3. It finds the elements of matrix $\underline{A}$ of the compound two-port network, gotten as a cascade connection of the following two-port networks: from Fig. 2a (*П*-type) and Fig. 2b (*T*-type) – see Table 4.

Table 4:
A-matrix of the compound two-port network, gotten by cascade connection of Π_1 and Π_2

Cascade connection
Matrix $\underline{A} = \underline{A}_1 * \underline{A}_2$

3.376071-0.399506j	595.168714-1393.72945j
0.005107+0.005496j	3.55052-0.719116j

4. Results from Excel according to the parameters of the equivalents compound two-port networks from *П*- and *T*-types (according formulas 3a and 3b) and the respective real elements, included there, are shown in Tables 5a and 5b.

Table 5a:
Linear passive compound two-port network - *П*-type

Complex impedances

$Z_{0П}$, Ω	595.168714-1393.72945j
$Z_{1П}$, Ω	358.892386-445.259866j
$Z_{2П}$, Ω	339.510471-529.48459j

Real elements

R, Ω	*L, H*	*C, F*	*C, μF*
595.168714		0.000002	2
358.892386		0.000007	7
339.510471		0.000006	6

Table 5b:
Linear passive compound two-port network - *T*-type

Complex impedances

Z_{0T}, Ω	90.73068-97.641633j
Z_{1T}, Ω	176.57412-268.250904j
Z_{2T}, Ω	161.194755-314.282822j

Real elements

R, Ω	*L, H*	*C, F*	*C, μF*
90.730680		0.000033	33
176.574120		0.000012	12
161.194755		0.000010	10

4. CONCLUSION

The technique for calculations with Excel, used in this paper, is helpful for analytical analysis of the elements of linear passive two-port networks. It is suggested with educational purpose to stress to the students on the physical interpretation of the lab and to decrease the time for calculations during preparering the protocol.

Main advantages of Excel in this situation are following. First one is connected with the automatic re-calculation of the respective coefficients only in changing of the values of the real elements in the initial linear passive two-port networks. Second one gives clear visualization of the data (in table form), which realized difficult in programs as Matlab and Mathcad. But instead if this in the last mentioned programs functions for making operation with matrices and with complex numbers are build-in the product and calls directly only with one command.

But the litter leads to other 2 disadvantages. First, there are no build-in functions for matrices' calculations in Excel. This realizes by functions for processing the one-di-

mensional vectors. For that reason, it has to define the needed formulae for calculation in each cell in resultant matrix. Second, each operation, made with complex numbers, realizes by separately build-in Excel function, which complicate defining the formulae in the respective cell in the table. Third, Excel interprets a complex number as a string and it works with 18-mean digits after the coma. If it is necessary to define smaller number of meaning digits after the coma, then it has to write the real and the imaginary parts of the complex number in different cells, where they have to process separately. After that these cells have to merge again in the new string to visualize the complex number according to the desire of the user.

But all mentioned "disadvantages" of Excel are compensated from its main advantage; consist of the clear visualization of the processed data.

REFERENCES

[1] Петракиева, С., ***Автоматично преизчисляване на коефициентите в различните форми на математическо описание на линейни пасивни четириполюсници,*** Международна конференция Автоматика'2016, Годишник на ТУ-София, 2016, том 66, кн. 1, ISSN: 1311-0829, стр. 401-408.
http://proceedings.tu-sofia.bg/volumes/Proceedings_Volume_66_book_1_2016.pdf

[2] Petrakieva, S., B. Boychev, ***Automatic calculation the parameters of linear passive 2-ports networks based on experimental data - part 1***, Proceedings of Summer school Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering, 15-16 Sept. 2016, Sofia, Bulgaria, ISSN: 1313-9487, pp. 151-161

[3] Hayt, W., Jr., J. Kemmerly, S. M. Durbin, ***Engineering Circuit Analysis***, 11th Edition, McGRAW-Hill, Inc., 1993, ISBN: 978-0-07-352957-8, MHID: 0-07-352957-5, 880 p.

[4] Excel - Help

Author: Simona Petrakieva, Assoc. Prof., PhD, Department of Theoretical Electrical Engineering, Faculty of Automatics, Technical University of Sofia, E-mail address: *petrakievas-te@tu-sofia.bg*

Received 15 December 2017 **Reviewer:** Assist. Prof. PhD Kamelia Nikolova