ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

Том 63, книга 5, 2013

V-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2013“

2 - 5 септември 2013 г., Созопол, България

PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 63, Issue 5, 2013

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

September 2 - 5, 2013, Sozopol, Bulgaria

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. дтн Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. дтн Елена ШОЙКОВА

членове

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

секретар-организатор

инж. Мария ДУХЛЕВА

EDITORIAL BOARD

Editor -in -Chief

Prof. D.Sc. Emil NIKOLOV

Editor -in -Vice -Chief

Prof. D.Sc. Elena SHOYKOVA

Editors

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

Organizing Secretary

Eng. Maria DUHLEVA

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

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

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

ISSN 1311-0829

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

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

V-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2013“

2 - 5 септември 2013 г., Созопол, България

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

председател

проф. дтн **Иван Ячев**

членове

доц. д-р **Вълчан Георгиев**

доц. д-р **Ангел Цолов**

доц. д-р **Петър Наков**

доц. д-р **Владимир Лазаров**

проф. дтн **Илиана Маринова**

доц. д-р **Андрей Крумов**

доц. д-р **Светлана Цветкова**

доц. д-р **Стефчо Гунински**

проф. дтн **Ганчо Божилов**

Научен секретар

гл. ас. д-р **Николай Матанов**

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

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

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

September 2 - 5, 2013, Sozopol, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEEE

chair of PC

Prof. DSc **Ivan Yatchev**

members of PC

Assoc. Prof. PhD **Vulchan Gueorgiev**

Assoc. Prof. PhD **Angel Tzolov**

Assoc. Prof. PhD **Peter Nakov**

Assoc. Prof. PhD **Vladimir Lazarov**

Prof. DSc **Iliana Marinova**

Assoc. Prof. PhD **Andrey Krumov**

Assoc. Prof. PhD **Svetlana Tzvetkova**

Assoc. Prof. PhD **Stefcho Guninski**

Prof. DSc **Gantcho Bojilov**

scientific secretary

Assist. Prof. PhD **Nikolay Matanov**

СЪДЪРЖАНИЕ том 63, книга 5

ЕЛЕКТРОТЕХНИКА

01. Danica Rosinová, Peter Valach. 17
Two Tank Energy Storage System: Robust Switched System Control with Input Constraints

02. Mária Hypiusová, Tibor Bekeš. 27
Robust Controller Design for Modular Servo System with Saving Power

03. Stanislav Stevo, Jakub Osusky. 37
Small Photovoltaic Power Plant - Model, Simulation and Consumption Optimization

04. **Адриан Иванов** 47
Микродвигател с ноктообразен магнитопровод

05. **Ангел Пачаманов, Николай Матанов, Петър Стоев, Иван Ангелов** 53
Контролно-информационна и управляваща система за електроснабдяване и осветление на пътни тунели

06. **Ангел Пачаманов, Петър Стоев, Николай Матанов**. 61
Оптимален избор на нивата на яркост на пътното платно в преходната зона на пътни тунели

07. **Ангел Пачаманов, Дилян Иванов** 67
Спектрална корекция на фотоприемници за измерване на адаптационна яркост на пътни тунели

08. **Ангел Цолов, Даниел Добрилов** 77
Бърза синхронизация на генератори в малки ВЕЦ - процеси

09. **Анелия Терзова, Валентин Матеев, Илиана Маринова** 85
Статични и динамични характеристики на електромагнит с ферофлуид

10. **Борислав Бойчев, Вълчан Георгиев**. 95
Точност на електронните преобразуватели за измерване на реактивна мощност и енергия

11. **Валентин Колев**. 105
Оценка на загубите на мощност и електрическа енергия предизвикани от присъединяването на възобновяеми източници към разпределителна електрическа мрежа средно напрежение

12. **Валентин Колев**. 111
Проучване възможностите за използване на хомогенни неизолирани проводници в електрическите мрежи средно напрежение

13. **Валентин Колев, Борислав Бойчев**. 117
Изследване на реактивната мощност и енергия в електрическата мрежа на ЧЕЗ

14. **Валентин Колев, Цветелина Богоева** 125
Оценка на влиянието на възобновяемите източници на електрическа енергия върху работата на електроенергийната система

15. **Валентин Матеев, Георги Кацаров, Илиана Маринова** 133
3D технологии при визуализирането на електромагнитни и топлинни полета

16. **Васил Агапиев, Валери Иванов** 141
Измерване на нелинейни индуктивности в установен режим

17. **Васил Димитров** 147
Фотоволтаична система за електрозахранване на лабораторни стендове

18. **Васил Димитров** 155
Адаптивно управление на тягови задвижвания - лабораторен симулатор

19. **Велислава Райдовска** 163
Формиране на напрежителен сигнал в система за непрекъснат контрол на $\tan\delta$ на проходни изолатори

20. **Величка Ботева, Георги Тодоров**. 173
Регулиране и стабилизиране на напрежението на локални консуматори

21. **Виктор Манов** 181
Съвременни тенденции за повишаване на ефективността на осветителните уредби

22. **Галина Чернева, Георги Павлов, Любомир Секулов, Явор Исаев, Тодор Лалев**. 187
Изследване и анализ на преходни процеси при дъгогасене в различни дъгогасителни среди

23. **Ганчо Божилов** 195
Механичен ресурс на асинхронни двигатели в периодични режими на работа

24. **Георги Павлов, Радка Васева, Радослав Кацов, Мартина Томчева**. 205
Проектиране на активен компенсатор на реактивна мощност за тиристорни ЕТС за променлив ток

25. **Георги Павлов, Явор Исаев, Елена Димкина** 215
Проектиране и изследване на електростатичен генератор

26. **Георги Тодоров, Божидар Стоев**. 223
Повишаване на ефективността на асинхронните двигатели

27. **Георги Тодоров, Димитър Жечев** 231
Електромагнитно моделиране и изчисление на конусни асинхронни двигатели

28. **Георги Тодоров, Ганчо Божилов**. 241
Мониторинг и анализ на статорния ток на асинхронен двигател за установяване на вътрешнонамотъчни несиметрии и къси съединения

29. **Даниел Добрилов** 249
Средства за компенсиране на капацитивна мощност - част 1

30. **Димитър Богданов** 257
Съпоставка на подходи за резервиране в системите за защита

31. **Димитър Матев, Валентин Гюров, Никола Македонски** 263
Изследване на светлотехническите параметри и енергетичните показатели за електромагнитна съвместимост на LED осветители за вътрешно осветление

32. **Димитър Матев, Валентин Гюров, Румен Киров, Никола Македонски**. 271
Пилотен проект "интелигентно улично осветление на гр. Варна"- енергетични показатели

33. **Димитър Николов, Гергана Кърджева**. 281
Изследване на натоварването и несиметрията при комунално - битови трафопостове в малки населени места

34. **Димитър Павлов, Ангел Пачаманов** 289
Разработване на филтри за спектрална корекция на CCD - камера при измерване на яркостта на различни категории улици

35. **Емил Йончев, Илия Мрянков** 297
Относно метод за калибриране на тензометрична измервателна система

36. **Емил Соколов, Дило Дилов** 305
Променливотокови двигатели за превозни средства с батерийно захранване

37. **Емилия Димитрова** 313
Симулатор на SCADA система за дистанционно управление на електросъоръжения

38. **Захари Зарков, Валентин Миленов, Яна Ненова, Симеон Рафаилов** 321
Сравнително изследване на тънкослойни фотоволтаични панели

39. **Захари Иванов** 331
Изследване на светлинната ефективност на светловодния канал в зависимост от геометричните и фотометричните му характеристики

40. **Захари Иванов** 341
Използване на кухи тръбни светловоди за въвеждане на естествена светлина в сгради

41. **Захари Иванов, Ясен Динков** 351
Разработване на сигнален светещ знак А18 със светлодиоди и автономно захранване за пешеходни пътеки

42. **Ива Драганова**. 361
Как се определя ефективността на светодиодни улични осветители

43. **Иван Ангелов** 369
Импедансно реле RIS-2 за секционен пост на тягови мрежи 25kV

44. **Иван Ангелов, Иван Петров** 377
Приложение на микроконтролери за управление на тиристорни токоизправители

45. **Иван Ангелов, Николай Матанов**. 383
Изследване работата на импедансно реле RIS-2 в тягови мрежи при къси съединения

46. **Иван Костов, Илона Ячева, Стефчо Гунински** 389
Оптимизация на конструкцията на сензор за ъглово преместване

47. **Иван Петров, Иван Лалов**. 395
Влияние на възможностите на локомотивните машинисти за подобряване на енергийната ефективност на електрическия подвижен състав

48. **Иван Ячев, Диан Маламов, Иван Хаджиев**. 399
Опростен топлинен модел на автоматичен прекъсвач

49. **Йордан Ботев** 409
Електромагнитни, топлинни и механични натоварвания в силови трансформатори - методи за изследване

50. **Йордан Шопов**. 419
Технология за производство на електромагнитни дросели

51. **Йордан Шопов, Симона Петракиева** 423
Приложение на светодиоди при променливо-токови режими

CONTENTS volume 63, Issue 5

ELECTRICAL

01. Danica Rosinová, Peter Valach. 17
Two Tank Energy Storage System: Robust Switched System Control with Input Constraints

02. Mária Hypiusová, Tibor Bekeš. 27
Robust Controller Design for Modular Servo System with Saving Power

03. Stanislav Stevo, Jakub Osusky. 37
Small Photovoltaic Power Plant - Model, Simulation and Consumption Optimization

04. Adrian Ivanov. 47
Small Electric Motor with Claws Core

05. Angel Pachamanov, Nikolay Matanov, Petar Stoev, Ivan Angelov. 53
Monitoring and control of electrical and lighting system of road tunnels

06. Angel Pachamanov, Petar Stoev, Nikolay Matanov. 61
Optimizing of Luminance Levels in the Transition Zone of Road Tunnels

07. Angel Pachamanov, Dilyan Ivanov. 67
Photosensors Spectral Correction for Measuring Unit of l20-Luminance of Road Tunnels

08. Angel Tzolov, Daniel Dobrilov. 77
Fast Generators Synchronization in Small Hydro Power Plants – Procesess

09. Aneliya Terzova, Valentin Mateev, Iliana Marinova. 85
Static and Dynamic Characteristics of Actuator with Ferrofluid

10. Borislav Bojchev, Vulchan Gueorgiev 95
Accuracy of Reactive Power and Reactive Energy Measurement

11. Valentin Kolev 105
Assessment of Loss of Power and Electricity Due to the Accession of Renewable Electricity Distribution Network to Medium Voltage

12. Valentin Kolev 111
Consideration to Using of Homogeneous No Insulated Conductors the Mains Medium Voltage

13. Valentin Kolev, Borislav Boichev. 117
Investigation Reactive Power and Energy in Electrical Network CEZ

14. Valentin Kolev, Cvetelina Bogoeva 125
Assessment of the Influence of Renewable Sources of Electricity on the Work of Electrical Power System

15. Valentin Mateev, Georgi Katsarov, Iliana Marinova. 133
3D Technologies for Visualisation of Electromagnetic and Thermal Fields

16. Vasil Agapiev, Valery Ivanov. 141
Measurement of Nonlinear Inductances in Steady-State

17. Vasil Dimitrov 147
Photovoltaic System for Power Supply of Laboratory Stands

18. Vasil Dimitrov. 155
Adaptive Control on Traction Drives - Laboratory Simulator

19. Velislava Raydovska 163
Setting a Voltage Signal in a tanδ On-Line Monitoring System of Bushings

20. Velichka Boteva, George Todorov. 173
Regulating and Stabilizing the Voltage of the Local Consumers

21. Viktor Manov 181
Contemporary Tendencies About Increasing of Efficiency of Lighting Systems

22. Galina Cherneva, Georgi Pavlov, Lubomir Sekulov, Javor Isaev, Todor Lalev 187
Investigation and Analysis of Transition Processes by Arc-Stilling in Different Gas Environment

23. Gantcho Bojilov 195
Mechanical Durability of Induction Motors by Periodical Duty Cycles

24. Georgi Pavlov, Radka Vaseva, Radoslav Katsov, Martina Tomcheva 205
Design of an Active Compensator of Reactive Power of Thyristor Electric Vehicles of Alternating Current

25. Georgi Pavlov, Yavor Isaev, Elena Dimkina. 215
Study of Electrostatic Generators

26. George Todorov, Bojidar Stoev. 223
Increasing the Efficiency of Asynchronous Motors

27. George Todorov, Dimitar Jetchev 231
Electromagnetical Modeling and Design of Cone Asynchronous Motors

28. George Todorov, Gantcho Bojilov. 241
Monitoring and Analysis of the Stator Current of an Induction Motor for Detecting the Internal Non-Symmetry or Short Circuit

29. Daniel Dobrilov. 249
Means of Reactive Power Compensation - part 1

30. Dimitar Bogdanov. 257
Comparison of Approaches for Redundant Design in Protection Schemes

31. Dimitar Matev, Valentin Gyurov, Nikola Makedonski. 263
Study on Lighting Parameters and Energetic Indexes for Electromagnetic Compatibility of LED Luminaires for Indoor Lighting

32. Dimitar Matev, Valentin Gyurov, Rumen Kirov, Nikola Makedonski. 271
Pilot Project "Intelligent Street Lighting of Varna"- Energetic Parameters

33. Dimitar Nikolov, Gergana Kardzheva 281
Investigation of the Load and Asymmetry at Local Transformers Supplying Residential Consumers in Small Villages

34. Dimitar Pavlov, Angel Pachamanov. 289
Development of Filters for Correction of Spectral CCD - Camera Measurement of Different Categories of Streets

35. Emil Iontchev, Iliya Mryankov. 297
About the Method of Calibration of Strain Gauge Measuring System

36. Emil Sokolov, Dilo Dilov. 305
AC Motors for Battery Powered Vehicles

37. Emiliya Dimitrova 313
Simulator of SCADA System for Remote Control on Electrical Equipment

38. Zahari Zarkov, Valentin Milenov, Yana Nenova, Simeon Rafailov 321
Comparative Study of Thin Film Photovoltaic Modules

39. Zahari Ivanov 331
Study of Luminous Efficiency of the Light Channels Depending of the Geometric and Photometric Characteristics

40. Zahari Ivanov 341
Application of Hollow Pipe Light Guide to Input of Natural Light in Buildings

41. Zahari Ivanov, Yasen Dinkov. 351
Development of Illuminated Sign A18 with LEDs and Autonomous Power Supply for Walkway

42. Iva Draganova 361
How to Determine the Effectiveness of LED Street Luminaire

43.. Ivan Angelov. 369
Impedance Relay RIS-2 for Section Pile of Traction Networks 25kV

44. Ivan Angelov, Ivan Petrov. 377
Application of Microcontrollers for Thyristor Rectifiers Management

45. Ivan Angelov, Nikolay Matanov. 383
Research Work of Impedance Relay RIS-2 in Traction Networks and Short Circuits

46. Ivan Kostov, Ilona Iatcheva, Stefcho Guninski. 389
Optimization of angular displacement sensor design

47. Ivan Petrov, Ivan Lalov. 395
Influence of Locomotive Drivers Skills for Improvement of the Energy Efficiency of the Electrical Rolling Stock

48. Ivan Yatchev, Dian Malamov, Ivan Hadzhiev 399
Simplified Thermal Model of an Automatic Circuit Breaker

49. Yordan Botev. 409
Electromagnetic, Thermal and Mechanical Loads in Power Transformers - Methods for Analysis

50. Yordan Shopov. 419
Technology for Production of Electromagnetic Chokes

51. Yordan Shopov, Simona Petrakieva. 423
Application of Light Emitting Diods in AC Sweep

Author's Index Volume 63 Issue 5

№		author	page
1.	Adrian	Ivanov	47
2.	Aneliya	Terzova	85
3.	Angel	Pachamanov	53 ; 61 ; 67 ; 289
4.	Angel	Tzolov	77
5.	Bojidar	Stoev	223
6.	Borislav	Boichev	117 ; 95
7.	Cvetelina	Bogoeva	125
8.	Danica	Rosinová	17
9.	Daniel	Dobrilov	77 ; 249
10.	Dian	Malamov	399
11.	Dilo	Dilov	305
12.	Dilyan	Ivanov	67
13.	Dimitar	Bogdanov	257
14.	Dimitar	Jetchev	231
15.	Dimitar	Matev	263 ; 271
16.	Dimitar	Nikolov	281
17.	Dimitar	Pavlov	289
18.	Elena	Dimkina	215
19.	Emil	Iontchev	297
20.	Emil	Sokolov	305
21.	Emiliya	Dimitrova	313
22.	Galina	Cherneva	187
23.	Gantcho	Bojilov	195 ; 241
24.	Georgi	Katsarov	133
25.	Georgi	Pavlov	187 ; 205; 215
26.	George	Todorov	173 ; 223 ; 231 ; 241
27.	Gergana	Kardzheva	281
28.	Iliana	Marinova	85 ; 133
29.	Iliya	Mryankov	297
30.	Ilona	Iatcheva	389
31.	Iva	Draganova	361
32.	Ivan	Angelov	53 ; 369 ; 377 ; 383
33.	Ivan	Hadzhiev	399
34.	Ivan	Kostov	389
35.	Ivan	Lalov	395

№	author		page
36.	Ivan	Petrov	377 ; 395
37.	Ivan	Yatchev	399
38.	Jakub	Osusky	37
39.	Javor	Isaev	187
40.	Lubomir	Sekulov	187
41.	Mária	Hypiusová	27
42.	Martina	Tomcheva	205
43.	Nikola	Makedonski	263 ; 271
44.	Nikolay	Matanov	53 ; 61 ; 383
45.	Petar	Stoev	53 ; 61
46.	Peter	Valach	17
47.	Radka	Vaseva	205
48.	Radoslav	Katsov	205
49.	Rumen	Kirov	271
50.	Simeon	Rafailov	321
51.	Simona	Petrakieva	423
52.	Stanislav	Stevo	37
53.	Stefcho	Guninski	389
54.	Tibor	Bekeš	27
55.	Todor	Lalev	187
56.	Valentin	Gyurov	263 ; 271
57.	Valentin	Kolev	105 ; 111 ; 117 ; 125
58.	Valentin	Mateev	85 ; 133
59.	Valentin	Milenov	321
60.	Valery	Ivanov	141
61.	Vasil	Agapiev	141
62.	Vasil	Dimitrov	147 ; 155
63.	Velichka	Boteva	173
64.	Velislava	Raydovska	163
65.	Viktor	Manov	181
66.	Vulchan	Gueorgiev	95
67.	Yana	Nenova	321
68.	Yasen	Dinkov	351
69.	Yavor	Isaev	215
70.	Yordan	Botev	409
71.	Yordan	Shopov	419 ; 423
72.	Zahari	Ivanov	331 ; 341 ; 351
73.	Zahari	Zarkov	321

Volume 63 Issue 5

pages	articles	authors
412	51	73

TWO TANK ENERGY STORAGE SYSTEM: ROBUST SWITCHED SYSTEM CONTROL WITH INPUT CONSTRAINTS

Danica Rosinová, Peter Valach

Abstract: *The aim of this paper is robust control design for two-tank system modelled as a switched system with two operating modes. The proposed approach is based on sufficient robust stability conditions using a parameter-dependent Lyapunov function. Control input constraints are considered in control design as well. The developed robust control law is in LMI form in discrete-time domain and guarantees both robust stability and input constraints for an uncertain switched system. The proposed approach is verified on simulation model of switched two-tank system.*

Keywords: *robust control, switched system, input constraints*

1. Introduction

Coupled tank system is a frequent one to be controlled both in chemical and in power engineering plants. Various configurations of coupled tank system appear in industrial plants, control aim depends on the respective application: controlled variables can be flow, liquid level, liquid temperature. In solar power plants, coupled tanks are used as energy storage mean [1] with varying liquid temperature. In other cases, the flows and water levels are controlled in coupled tank storage. All referred cases require the liquid level control in tanks as a basic control aim, while typically the system dynamics can be described by a switched system model.

Switched systems are an important class of hybrid dynamical systems, where a system dynamics is described by several continuous time models - modes of the modelled system, among which the real system dynamics switches according to known rules. Recent literature has shown a growing attention in control of switched systems. A survey of basic problems in stability and design of switched systems has been presented in [3]. The main control issue is to keep closed-loop stability and performance considering individual system modes and switching between them. Model uncertainty belongs to other important aspects which must be considered in real plant control design. In such cases a robust controller is required, guaranteeing stability and performance for all working conditions within uncertainty domain.

This paper focuses on robust control design for two-tank storage system with autonomous switching, the main aim is to control water level which provides for keeping efficient storage operation. Model uncertainties appear due to linearization, the respective polytopic uncertainty domain is considered for linear model parameters. Robust stability analysis and the respective robust control design for switched systems under arbitrary switching sequences is proposed. The applied approach is based on a switched quadratic Lyapunov function to keep asymptotic stability of a considered

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

ISSN 1311-0829

switched system. Robust control design is based on robust stability conditions formulated for uncertain polytopic system in LMI form [2]. Asymptotic stability of polytopic system is guaranteed by polyquadratic stability, using so called polytopic quadratic Lyapunov functions. Control input constraints which always must be considered in real application are included in controller design as well. To include the input constraints on control variable into robust controller design, additional LMI condition is developed using S-procedure [5].

The paper is organized as follows. In Section 2, model of switched two-tank system is described. Section 3 presents robust stability conditions, stabilization of switched system and conditions respective to control input constraints. In Section 4, simulation results are provided.

2. Model of Switched Two-Tank Storage System

We consider a two-tank storage system with autonomous switching. The system consists of two coupled cylindrical tanks connected by a pipe, [3]. This pipe is connected at the bottom of tank 1 and at the height h above the bottom of the tank 2. The tanks have different cross-sectional areas S_i. Liquid is filled into the tank 1 by the pump, it flows through the input q_0. q_1 is flow of liquid through a connecting pipe and q_2 is output flow of liquid from the tank 2. State variables are liquid levels in tanks h_1, h_2, the latter is also a controlled output variable. This system is shown in Fig.1. System parameters are: $S_1 = 4m^2, S_2 = 3.72m^2, h = 1m, k_{11} = 4, k_{22} = 3.56$ (k_{ii} are the respective flow constants).

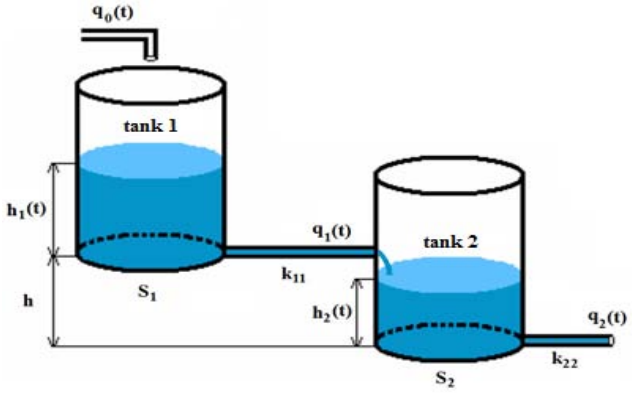


Fig. 1 Two-tank system

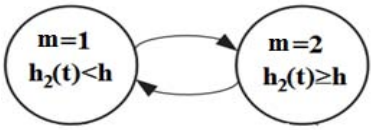


Fig.2. Possible modes of two-tank system

The two-tank system has one input variable q_0 (respective to the control input), two continuous state variables $x(t) \in [h_1(t), h_2(t)]^T, h_i \in R$ and one output variable h_2 Dynamics properties of the system depends on relation between level h_2 and tanks relative height h. In the case $h_2 < h$, the liquid flows from tank 1 into tank 2 without in-

teraction (the respective flow is q_1). In the case $h_2 > h$, interaction appears between both tanks. The respective system model modes are shown in Fig.1. System dynamics in both modes is then described by the following nonlinear differential equations:
In the mode 1 (m=1, without interaction):

$$S_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = q_0(t) - k_{11}\sqrt{h_1(t)} \quad (1)$$

$$S_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = k_{11}\sqrt{h_1(t)} - k_{22}\sqrt{h_2(t)} \quad (2)$$

In the mode 2 (m=2, with interaction):

$$S_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = q_0(t) - k_{11}\sqrt{|h_1(t) - h_3(t)|}, \quad (3)$$

$$S_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = k_{11}\sqrt{|h_1(t) - h_3(t)|} - k_{22}\sqrt{h_2(t)}, \quad (4)$$

where $h_3(t) = h_2(t) - h$.

3. Stability and Stabilization of Switched System

In this section, several recent results on robust stability of switched system are re-called in 3.1 and 3.2, which are then used for two-tank robust controller design in Section 4. In section 3.3 input constraint reformulation into LMI form is introduced.

3.1 Stability analysis

We consider an uncertain autonomous switched system with N operation modes. In each operation mode, the polytopic uncertain model is considered with $M(.)$ vertices. This system is described by a state space model:

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^{N} \xi_i(k) \sum_{l(i)=1}^{M(i)} \alpha_{l(i)} A_{l(i),i} x(k), \quad (5)$$

where $x(k)$ is the state vector; i is the operation mode, N is number of operation modes; $M(i)$ is the number of uncertainty polytope vertices in ith mode; $\xi_i(k)$ is the logic parameter and it has value 1, when the state matrix belongs into Ω_i domain; Ω_i is the uncertainty domain for ith mode, represented by a subsystem i defined by:

$$\Omega_i = \left\{ \begin{array}{c} A_i : A_i = \sum_{l(i)=1}^{M(i)} \alpha_{l(i)} A_{l(i),i},\ \alpha_{l(i)} > 0 \\ \sum_{l(i)=1}^{M(i)} \alpha_{l(i)}(k) = 1 \end{array} \right\}, \quad (6)$$

$A_{l(i),i}$ are known matrices, scalars $\alpha_{l(i)}$ represent uncertainty parameters, $M(i)$ is the number of the vertices of the polytope Ω_i,

$$\xi_i(k) \geq 0,\ \sum_{i=1}^{M(i)} \xi_i(k) = 1. \quad (7)$$

Theorem 1 ([4])

System (5) is locally polyquadratically stable if and only if there exist N symmetric positive definite matrices $S_1, S_2, \ldots S_N$, and N matrices $G_1, G_2, \ldots G_N$ of appropriate dimensions such that the following LMIs hold for $i, j = 1, \ldots, N$

$$\begin{bmatrix} G_i + G_i^T - S_i & (A_{l(i),i} G_i)^T \\ * & S_j \end{bmatrix} > 0 \quad (8)$$

Note, that polyquadratic stability considers quadratic stability in each operation mode, i.e. in i-th mode a quadratic Lyapunov function of the form $x(t)^T S_i x(k)$ is considered with the same S_i for the whole polytopic uncertainty domain Ω_i respective to this mode.

3.2 Stabilization of switched system

Consider the uncertain controlled switched system described by linear discrete-time state space model:

$$x(k+1) = \sum_{i=1}^{N} \xi_i(k)(A_i x(k) + B_i u(k)), \quad (9)$$

where analogically to (5), (6), $\xi_i(k)$ is the logic parameter and it has value 1, when the state matrix belongs into Ω_i domain

$$[A_i, B_i] \in \Omega_i = \left\{ \begin{array}{c} (A_i, B_i) = \sum_{l(i)=1}^{M(i)} \alpha_{l(i)} [A_{l(i),i},\ B_{l(i),i}] \\ \\ \alpha_{l(i)} \geq 0,\ \sum_{l(i)=1}^{M(i)} \alpha_{l(i)}(k) = 1 \end{array} \right\}, \quad (10)$$

where $A_{l(i),i}$, $B_{l(i),i}$ are known matrices. Parameters $\alpha_{l(i)}$ are uncertain but invariant in time. $M(i)$ is the number of the vertices of the polytope Ω_i.

Consider state feedback $u(k) = K_i x(k)$, then the closed loop system matrix in mode i is $A_i + B_i K_i$. Substituting the closed loop system matrix $A_i + B_i K_i$ into the stability condition (8), after linearizing using substitution, $R_i = K_i G_i$, Theorem 1 provides the following result in terms of LMI.

Theorem 2 ([4])

System (9) can be stabilized by a state feedback if there exist N symmetric positive definite matrices $S_1, S_2, \ldots S_N$, N matrices $G_1, G_2, \ldots G_N$ and N matrices $R_1, R_2, \ldots R_N$ of appropriate dimensions such that the following LMIs hold for $i, j = 1, \ldots, N$:

$$\begin{bmatrix} G_i + G_i^T - S_i & (A_{l(i),i} G_i + B_{l(i),i} R_i)^T \\ * & S_j \end{bmatrix} > 0, \quad (11)$$

where $i, j \in \{1, 2, 3, \ldots, N\}$ represent discrete state of system. The state feedback gains are then given by:

$$K_i = R_i G_i^{-1}. \quad (12)$$

3.3 Control input constraints

The LMI conditions respective to guaranteeing the control input constraints of the controlled system can be developed using S-procedure, [5]. Let us consider the invariant set $\Phi = \{x(k) : x(k)^T P x(k) < \rho\}$. We can write the respective condition for elements of Φ:

$$\rho - x(k)^T P x(k) > 0, \quad (13)$$

where ρ is some design parameter to be chosen. If the condition (13) is valid, then next step is to constrain the input (control variable). The respective constraint can be written by condition:

$$u(k)^T u(k) < \mu^2 \quad (14)$$

where μ is given parameter respective to input constraint.

From the above, constraint inequality (14) can be rewritten as

$$\mu^2 - x(k)^T G^{-1} R^T R G^{-1} x(k) > 0. \quad (15)$$

Using S-procedure [5], inequality (13) implies (15) if and only if there exist a $\lambda > 0$ such that

$$\mu^2 - \lambda\rho + x(k)^T (\lambda G^{-1} - G^{-1} R^T R G^{-1}) x(k) > 0. \quad (16)$$

By splitting inequality (16) we obtain the following two inequalities

$$\mu^2 - \lambda\rho > 0 \quad (17)$$

$$\lambda G^{-1} - G^{-1} R^T R G^{-1} > 0 \quad (18)$$

The latter can be rewritten into LMI form

$$\begin{bmatrix} G & R^T \\ R & \lambda \end{bmatrix} > 0. \quad (19)$$

Inequality (19) is used to find matrices *G* and *R*. Adding this condition to the static state feedback LMI conditions, we can keep the control variable constraint. It is important to say that this approach corresponds to symmetric constraints on control variable from operating point.

4. Simulation Results

In this section we apply stabilization method from Section 3 both without and with considering the control input constraints. We consider the model of two-tank switched system presented in Section 2.

For a design of robust static-state feedback controller we need to have a system described by a model in the form of (5). Therefore the nonlinear equations (1)-(4) were discretized and linearized. Steady states were chosen as $h_{20}^S = 0.6312m$ for mode without interaction and $h_{20}^S = 1.2625m$ for second mode with interaction.

We consider uncertainty domain respective to linearization of state model (1)-(4) within the operating range of $\pm 5\%$. That represents two uncertainties for each operation mode. The vertex matrices for polytopic model of this uncertain system are in the

following form:
Mode 1 - without interaction:

$$A_{11}=\begin{bmatrix}0.8726 & 0.0935\\ -0.0418 & 0.9979\end{bmatrix} \qquad B_{11}=\begin{bmatrix}0.0009\\ 0.0190\end{bmatrix}$$

$$A_{21}=\begin{bmatrix}0.8781 & 0.0938\\ -0.0379 & 0.9981\end{bmatrix} \qquad B_{21}=\begin{bmatrix}0.0009\\ 0.0190\end{bmatrix}$$

$$A_{31}=\begin{bmatrix}0.8785 & 0.0938\\ -0.0380 & 0.9981\end{bmatrix} \qquad B_{31}=\begin{bmatrix}0.0009\\ 0.0180\end{bmatrix}$$

$$A_{41}=\begin{bmatrix}0.8721 & 0.0935\\ -0.0418 & 0.9979\end{bmatrix} \qquad B_{41}=\begin{bmatrix}0.0009\\ 0.0199\end{bmatrix}$$

Mode 2 - with interaction:

$$A_{12}=\begin{bmatrix}0.8618 & 0.0929\\ -0.0218 & 0.9989\end{bmatrix} \qquad B_{12}=\begin{bmatrix}0.0007\\ 0.0141\end{bmatrix}$$

$$A_{22}=\begin{bmatrix}0.8698 & 0.0934\\ -0.0198 & 0.9990\end{bmatrix} \qquad B_{22}=\begin{bmatrix}0.0007\\ 0.0141\end{bmatrix}$$

$$A_{32}=\begin{bmatrix}0.8663 & 0.0932\\ -0.0198 & 0.9990\end{bmatrix} \qquad B_{32}=\begin{bmatrix}0.0006\\ 0.0128\end{bmatrix}$$

$$A_{42}=\begin{bmatrix}0.8742 & 0.0936\\ -0.0180 & 0.9991\end{bmatrix} \qquad B_{42}=\begin{bmatrix}0.0006\\ 0.0128\end{bmatrix}$$

Matrix C is in both subsystems given by $C=[0 \quad 1]$.
For tracking reference trajectory $r(k)$, it is necessary to include integral part in the controller, integrating control error defined as $e(k)=y(k)-r(k)$.
Integral action for set-point tracking is then described as

$$q(k+1)=q(k)+y(k)-r(k). \quad (20)$$

Augmenting system (9) by equation (20):

$$\begin{bmatrix}x(k+1)\\ q(k+1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A_i & 0\\ C_i & I\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x(k)\\ q(k)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B_i\\ 0\end{bmatrix}u(k)+\begin{bmatrix}0\\ -I\end{bmatrix}r(k)$$

$$y(k)=[C_i \quad 0]\begin{bmatrix}x(k)\\ q(k)\end{bmatrix}$$

Static-state feedback controller (i.e. state PI controller) for previous augmented system is:

$$u(k)=K_i\begin{bmatrix}x(k)\\ q(k)\end{bmatrix}. \quad (21)$$

Now the output and reference trajectory will be asymptotically identical in stable control loop.

4.1 Static state feedback design without input constraint

Solving LMIs (11) and equation (12) we obtain the value of the feedback gain matrices for both modes:

- without interaction

$$K_1=[-123.64 \quad -57.60 \quad -27.73]$$

- with interaction

$$K_2 = [-175.49 \quad -81.41 \quad -39.19]$$

Simulation results of static-state feedback controller without input constraints are shown in Fig.3 and Fig.4: reference trajectory tracking (Fig.3); behaviour of control variable (Fig.4). Depending on the system mode, the feedback gain is switched.

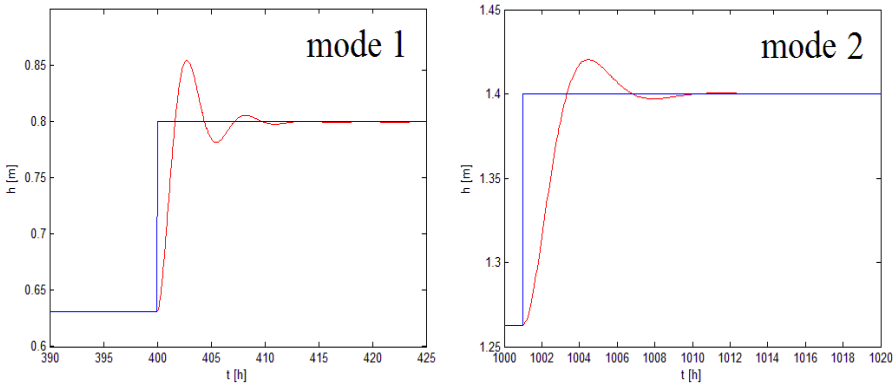


Fig.3. Simulation of tracking reference trajectory

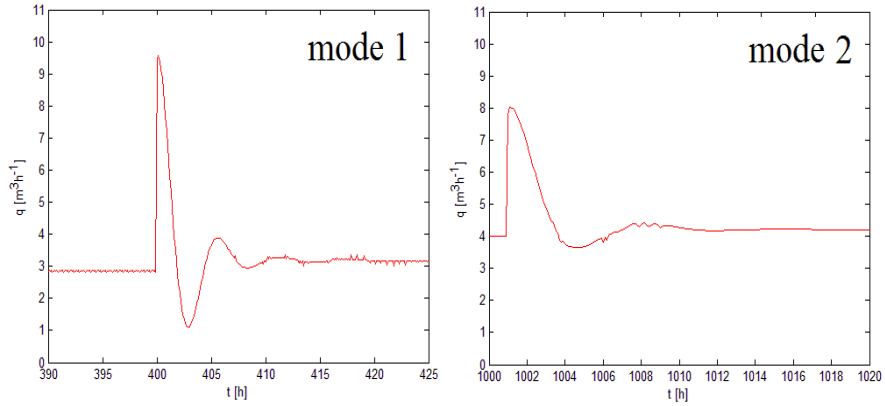


Fig.4. Behaviour of actuating variable without constraints

Behaviour of the system near operating modes is shown in the above figures. Maximum value of control variable in this case is 9.57 m^3h^{-1} in mode 1 (that means 6.72 with respect to operating point) and 8 m^3h^{-1} in mode 2 (that means 4 with respect to operating point).

4.2 Static state feedback design with constrained input

In this case, the control gain is obtained solving LMIs (11), (17), (19) and equation (12). The values of the feedback gain matrices for both modes are:

- without interaction

$$K_1 = [-12.98 \quad -11.68 \quad -2.13]$$

- with interaction

$$K_2 = [-5.35 \quad -4.81 \quad -0.85]$$

Simulation results of static-state feedback controller with constrained input are shown

in Fig.5 and Fig.6: reference trajectory tracking (Fig.5); behaviour of control variable (Fig.6). Depending on the system mode, the feedback gain is switched.

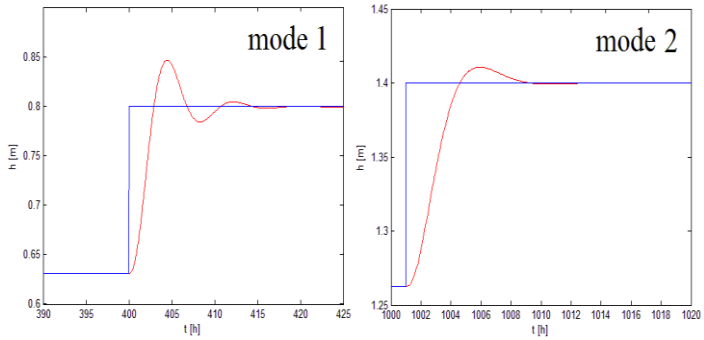


Fig.5. Tracking reference trajectory with constrained input

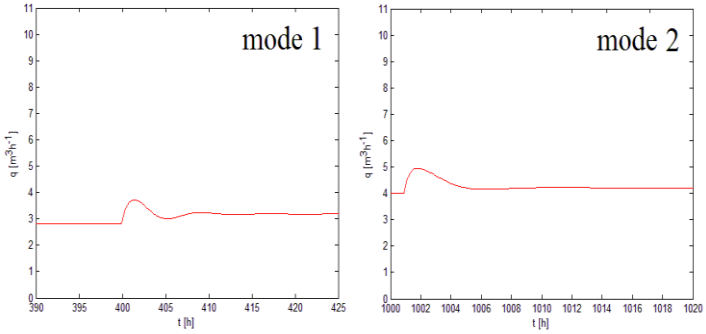


Fig.6. Behaviour of control variable with constraints

Note the difference both in control input (Fig.4 and Fig.6) and output response (Fig.3 and Fig.5). Control input constraints can be included into robust controller design not only to keep real plant input constraints but saving energy demanded for control as well.

5. Conclusion

In this paper robust state feedback switched controller has been designed for switched two-tank system. The proposed approach is based on polytopic quadratic stability conditions and conditions for input constraints which yields LMI formulation of controller design task. Since LMIs belongs to numerically tractable problems, the control design is computationally convenient. Thus all three design aspects: - robust stability within polytopic uncertainty domain, - stable operation with respect to switching, - control input constraints; have been treated in unified matrix inequalities form. Simulation results verify the proposed design method. In future work, output constraints will be considered in control design.

Acknowledgment

This work has been supported by Grant N SK-BG-0035-10 of Slovak Research and Development Agency and Grant N 1/1241/12 of the Slovak Scientific Grant Agency.

References

[1] Kopp J.E. (2009), *Two-tank indirect thermal storage designs for solar parabolic trough power plants*, University of Nevada Las Vegas, free and open access by Digital Scholarship@UNLV, *http://digitalscholarship.unlv.edu/thesesdissertations*

[2] de Oliveira M. C., Bernussou J., Geromel J. C. (1999), *A new discrete-time robust stability condition*, System & Control Letters, Vol. 37, pp 261-265

[3] Lunze J., Lagarrigue F. L. (2009), *Handbook of hybrid systems control theory, tools, applications*. Cambridge University Press

[4] Maherzi E., Bernussou J., Mhiri R. (2007), *Stability and Stabilization for uncertain switched systems, a polyquadratic Lyapunov approach*, Int. Journal on Sciences and Techniques of Automatic control, Vol.1, pp 61-74

[5] Poznyak A. S. (2008), *Advanced mathematical tools for automatic control engineers: Deterministic Techniques*. Elsevier Ltd.

Authors: Danica Rosinová, associate professor, PhD; Institute of Control and Industrial Informatics, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia, E-mail address: *danica.rosinova@stuba.sk;* Peter Valach, PhD. student; both are with the Institute of Control and Industrial Informatics, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia

Received 02 September 2013 **Reviewer**: Associate professor, PhD Teofana Puleva

ROBUST CONTROLLER DESIGN FOR MODULAR SERVO SYSTEM WITH SAVING POWER

Mária Hypiusová, Tibor Bekeš

Abstract: *The paper deals with robust state-feedback controller design methods for SISO systems in which consider parametric uncertainties. The LMI approach is used to design a controller with guaranteed quadratic stability, H_2 and H_∞ performance specification for linear continuous time systems. The methods using YALMIP toolbox with LMI and SeDuMi solver are applied. The practical application is illustrated by the robust controller design for a Modular Servo System.*

Keywords: *Robust control, Linear matrix inequality, Quadratic stability, H_2 and H_∞ norm*

1. Introduction

For many real processes a controller design has to cope with the effect of uncertainties, which very often cause a poor performance or even instability of closed-loop systems. The reason for that is a perpetual time change of parameters (due to aging, influence of environment, working point changes *etc.*), as well as unmodelled dynamics. The former uncertainty type is denoted as the parametric uncertainty and the latter one the dynamic uncertainty. A controller ensuring closed-loop stability under both of these uncertainty types is called a robust controller. A lot of robust controller design methods are known from the literature [1], [2] in the time - as well as in the frequency domains.

In this paper three approaches to robust controller design have been applied to control angular velocity of a Modular Servo System with varying parameters in the interval model. The first method is based on the theory of linear matrix inequalities [3] with guaranteed quadratic stability with minimization of the matrix P trace. The second approach uses the H_2 design by LMIs [5]. The last controller design method is based on the H_∞ design by LMIs [5]. Solution of LMIs represents a convex optimization problem that has been solved in the MATLAB environment by the YALMIP toolbox [7] with solver LMI [4] and SeDuMi [6].

2. Modular Servo System

The Modular Servo System (MSS) consists of the Inteco digital servomechanism and open-architecture software environment for real-time control experiments [7]. The measurement system is based on the RTDAC4/USB acquisition board equipped with a D/A and A/D converters. I/O board communicates with the power interface unit. The whole logic necessary to activate and read the encoder signals and to generate the appropriate sequence of the PWM pulses to control the DC motor is configured in the

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

ISSN 1311-0829

Xilinx® chip of the RT-DAC/USB board. All functions of the board are accessed from the Modular Servo Toolbox, which operates directly in the MATLAB Simulink environment.

The MSS consists of the following modules arranged in the chain: the DC motor with the generator, inertia load, encoder, magnetic brake and the gearbox with the output disk depicted in Fig. 1. The system has no got an inner feedback for dead zone compensation. The accuracy of the measured velocity is 5% while the accuracy of the angle is 0.1%. The armature voltage of the DC motor is controlled by a PWM signal v(t) excited by a dimensionless control signal in the form $u(t)=v(t)/v_{max}$.

In our experiment backlash module was not applied. The servomechanism is connected to a computer where a control algorithm is realised based on measurements of the angle and angular velocity. In our paper only the angular velocity was controlled.

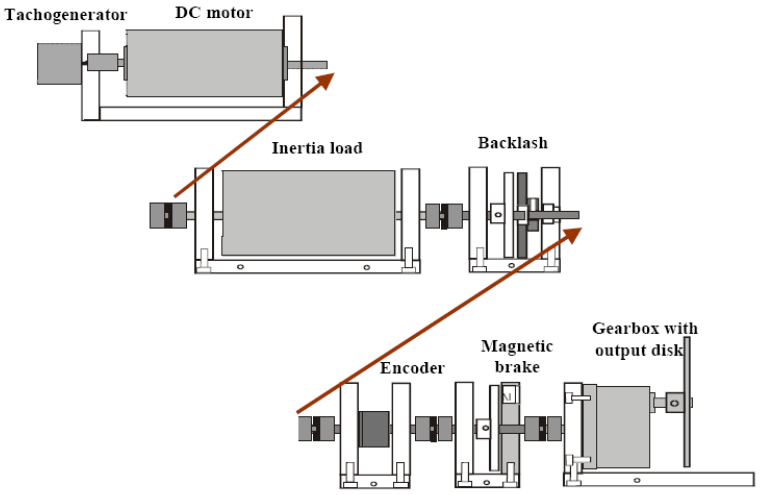


Fig.1. MSS mechanical construction

3. Robust controller design

Consider the linear continuous time-invariant SISO system in the form

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t), \qquad x(0) = x_0 \end{aligned} \tag{1}$$

where $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R$ and $y(t) \in R$ are the state, control and output vectors, respectively. The matrices A, B and C are known fixed matrices. Consider the state-feedback controller in the form

$$u(t) = -Kx(t) \tag{2}$$

Then closed loop system with (1) and (2) is

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) = A_c x(t) \tag{3}$$

According to Lyapunov stability theory, the system (3) is stable if and only if there exists a symmetric matrix $P = P^T > 0$ such that

$$A_c^T P + P A_c < 0 \tag{4}$$

Inequality (4) is special form of linear matrix inequality. Lyapunov theory is appropriate also for uncertain systems.

Consider the interval model of controlled system in the form

$$\mathbf{G}(s)=\left\{\frac{B(s)}{A(s)}:(B(s),A(s))\in(\mathbf{N}(s),\mathbf{D}(s))\right\} \quad (5)$$

where

$$\begin{aligned}\mathbf{N}(s)&=\left\{B(s):b_0+\ldots+b_m s^m, b_i\in\langle\underline{b}_i,\overline{b}_i\rangle, i=0,1,\ldots,m\right\}\\ \mathbf{D}(s)&=\left\{A(s):a_0+\ldots+a_n s^n, a_i\in\langle\underline{a}_i,\overline{a}_i\rangle, i=0,1,\ldots,n\right\}\end{aligned} \quad (6)$$

and a parameter box is

$$\Pi=\left\{a,b:a\in R^{n+1}, b\in R^{m+1}, a_i\in\langle\underline{a}_i,\overline{a}_i\rangle, i=1,\ldots,n; b_j\in\langle\underline{b}_j,\overline{b}_j\rangle, j=1,\ldots,m\right\} \quad (7)$$

The interval model (5) can be rewritten to uncertain model in the state space using one of canonical forms. For example, using controllable canonical form, matrix B is invariable. Then the interval system in the state space can be described by a polytope of linear interval systems, which is obtained by a list of its vertices:

$$\{(A_1,B,C_1),\ldots,(A_N,B,C_N)\} \quad (8)$$

where $N=2^r$ is number of parameter box vertices (7). In general, a polytope description of uncertainties results in a less conservative controller design than other characterizations of uncertainty [3].

3.1. Robust state-feedback controller design using quadratic stability

In this section, the polytope description of uncertainties with quadratic stability has been used for the design of state-feedback robust controllers.

Theorem 1. The polytope system

$$\dot{x}(t)=\sum_{i=1}^{N}\alpha_i A_i x(t), \quad \sum_{i=1}^{N}\alpha_i=1, \quad \alpha_i\in\langle 0,1\rangle \quad i=1,\ldots,N \quad (9)$$

is quadratically stable if and only if there exists a symmetric positive definite matrix $P=P^T>0$ such that

$$A_i^T P+PA_i<0, \quad i=1,2,\ldots,N \quad (10)$$

The closed loop system with state feedback control (2) is described by N vertices of parameter box

$$\dot{x}(t)=(A_i-BK)x(t)=A_{c_i}x(t) \quad i=1,\ldots,N \quad (11)$$

Theorem 2. The polytope system (11) is quadratically stabilizable if there exist a matrix $K\in R^{1\times n}$ and a symmetric positive definite matrix $P\in R^{n\times n}$ satisfying

$$(A_i-BK)^T P+P(A_i-BK)<0, \quad i=1,2,\ldots,N. \quad (12)$$

Inequalities (12) can be modified, and by adding minimization of matrix P trace (equivalent to minimization of matrix ($-Q$) trace) we obtain Algorithm 1 in the following form

$$\begin{aligned}
&\min\left(-trace\,Q\right)\\
&A_iQ+QA_i^T-BY-Y^TB^T<0,\quad i=1,2,\ldots,N\\
&Q>0\\
&Q=P^{-1}\\
&Y=KP^{-1}
\end{aligned}\quad . \quad (13)$$

In the system of inequalities (13) there are following unknowns:

- the symmetric positive definite matrix $Q\in R^{n\times n}$ (if exists),
- the full matrix $Y\in R^{1\times n}$ (if exists).

The final state-feedback controller from Algorithm 1 (13) is

$$K=YQ^{-1}. \quad (14)$$

Solution of LMIs (13) represents a convex optimization problem that can be solved in the MATLAB environment by the YALMIP toolbox with solver LMI and solver SeDuMi.

3.2. Robust state-feedback H_2 controller design

Consider the continuous linear time invariant open-loop system

$$\begin{aligned}
\dot{x}&=Ax+Bu+B_ww\\
y&=Cx+Du+D_ww
\end{aligned}, \quad (15)$$

where $x(t)\in R^n$, $u(t)\in R$, $w(t)\in R$ and $y(t)\in R$ are the state, control, exogenous and output vectors, respectively. Suppose system (15) is strictly proper i.e. $D=0$ and consider finite gain, i.e. $D_w=0$.

The system (15) with state-feedback controller (2) yields closed-loop system

$$\begin{aligned}
\dot{x}&=(A-BK)x+B_ww\\
y&=Cx
\end{aligned} \quad (16)$$

The transfer function of closed-loop system is

$$G(s)=C(sI-A-BK)^{-1}B_w \quad (17)$$

Consider the H_2 performance specification in the form

$$\|G(s)\|_2\le\gamma \quad (18)$$

The H_2 norm is the energy of the impulse response $h(t)$ of a system G

$$\|G\|_2=\left(\int_0^\infty h^T(t)h(t)dt\right)^{\frac{1}{2}}=\left(\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}G(j\omega)G^T(j\omega)d\omega\right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Alternatively, the H_2 norm can be computed using Lyapunov equation

$$A^TP_o+P_oA+C^TC=0, \quad (20)$$

where $P_o=\int_0^\infty e^{A^Tt}C^TCe^{At}dt$ is the observability Grammian and hence

$$\|G\|_2^2=trace\left(B^TP_oB\right) \quad (21)$$

Defining the controllability Grammian

$$P_c = \int_0^\infty e^{At} B B^T e^{A^T t} dt, \quad (22)$$

which can be alternatively computed as a solution to the Lyapunov equation

$$AP_c + P_c A^T + BB^T = 0 \quad (23)$$

we can obtain dual expression of the H_2 norm

$$\|G\|_2^2 = trace\left(CP_c C^T\right). \quad (24)$$

Now consider the polytopic uncertainties in the form:

$$(A, C) \in conv\{(A_1, C_1), \ldots, (A_N, C_N)\} \quad (25)$$

and start with condition (18) analysis. Inequality (18) holds if and only if there exists a K such that

$$\begin{aligned} &trace\left(C_i Q C_i^T\right) < \gamma \\ &(A_i - BK)Q + Q(A_i - BK)^T + BB^T < 0 \end{aligned} \quad (26)$$

The trace inequality can be written as

$$trace\left(C_i Q C_i^T\right) < traceW < \gamma \quad (27)$$

for some matrix W such that

$$\begin{bmatrix} W & C_i Q \\ Q C_i^T & Q \end{bmatrix} > 0. \quad (28)$$

We obtain the overall LMI formulation for Algorithm 2 for robust state-feedback H_2 controller design:

$$\begin{aligned} &traceW < \gamma \\ &\begin{bmatrix} W & C_i Q \\ Q C_i^T & Q \end{bmatrix} > 0, \quad i = 1,2,\ldots,N \\ &A_i Q + Q A_i^T - BY - Y^T B^T < 0 \\ &Q > 0 \\ &Q = P^{-1} \\ &Y = KP^{-1} \end{aligned} \quad (29)$$

There are the following unknowns in the system of inequalities (29):

- the symmetric positive definite matrix $Q \in R^{n \times n}$ (if exists),
- the full matrix $Y \in R^{1 \times n}$ (if exists).

The final H_2 suboptimal state-feedback controller from (29) is expressed in (14). Solution of LMIs (29) represents a convex optimization problem that has been solved in the MATLAB environment by the YALMIP toolbox with solver LMI and solver SeDuMi.

3.3. Robust state-feedback H_∞ controller design

Consider the continuous linear time invariant open-loop system (15) for state-feedback controller (2). Then the closed-loop system is

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A - BK)x + B_w w \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (30)$$

Let the H_∞ performance specification is

$$\|G(s)\|_\infty < \gamma \quad (31)$$

The H_∞ norm is the worst case gain

$$\|G\|_\infty = \sup_{\|x\|_2 = 1} \|Gx\|_2 = \sup_{\omega} \|G(j\omega)\| \quad (32)$$

In contrast with the H_2 norm, computation of the H_∞ norm is iterative. For $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$, the inequality (31) is equivalent to the existence of a symmetric positive definite matrix P satisfying

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + C^T C & PB + C^T D \\ B^T P + D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (33)$$

$$P > 0$$

Using the Schur complement inequalities (33) can be extended and modified to the form

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA & PB & C^T \\ B^T P & -\lambda I & D^T \\ C & D & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad (34)$$

$$P > 0$$

Consider the polytopic uncertainties

$$(A, C) \in conv\{(A_1, C_1), \ldots, (A_N, C_N)\} \quad (35)$$

By means of the H_∞ performance specification (31) for the transfer function between performance signals w and y in the system (30) and polytopic uncertainties (35), the design LMI (Algorithm 3) can be obtained:

$$\min \gamma$$

$$\begin{bmatrix} A_i Q + Q A_i^T - BY - Y^T B^T + B_w B_w^T & 0 & QC_i^T \\ 0 & -\gamma I & 0 \\ C_i Q & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0$$

$$Q > 0 \quad (36)$$

$$Q = P^{-1}$$

$$Y = KP^{-1}$$

There are the following unknowns in the system of inequalities (36):

- the symmetric positive definite matrix $Q \in R^{n \times n}$ (if exists),
- the full matrix $Y \in R^{1 \times n}$ (if exists),
- the number $\gamma \in R$.

The final optimal H_∞ state-feedback controller from (36) is expressed in (14). Similar solution of LMIs (36) represents a convex optimization problem that has been solved

in the MATLAB environment by the YALMIP toolbox with solvers LMI and SeDuMi.

4. Design of robust controller for Modular Servo System

Consider the transfer functions of an angular velocity of the Modular Servo System obtained by identification in three working points:

WP1: manipulated variable $u = 0.4$ [V]; regulated variable $y = 47$ [rad/s];

$$G_{p_1}(s) = \frac{298.9195}{s + 1.7089} \quad (37)$$

WP2: manipulated variable $u = 0.6$ [V]; regulated variable $y = 80$ [rad/s];

$$G_{p_2}(s) = \frac{318.6094}{s + 1.8255} \quad (38)$$

WP3: manipulated variable $u = 0.8$ [V]; regulated variable $y = 120$ [rad/s];

$$G_{p_3}(s) = \frac{259.6302}{s + 1.4091} \quad (39)$$

The obtained interval model in the state space is

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) = \left[-\frac{1}{a_1}\right] x_1(t) + [1] u(t) \\ y(t) &= Cx(t) = \left[\frac{b_0}{a_1}\right] x_1(t) \end{aligned} \quad (40)$$

where $b_0 \in \langle 174.5342, 184.2466 \rangle$, $a_1 \in \langle 0.5478, 0.7097 \rangle$.

In the case of a PI controller design the extended state space model is used. This extension is

$$A_I = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \; B_I = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \; C_I = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (41)$$

Then the state-feedback yields the matrix K in the following form

$$K = [K_P \quad K_I] \quad (42)$$

where K_P is the proportional part of state-feedback controller and K_I is integral part of controller.

Table 1. Robust controller parameters for angular velocity control

Method	Solver	K_P	K_I
QS	LMI	4.9575	0.0768
H_2	SeDuMi	2.6326	0.0332
H_∞	LMI	2.8547	0.031

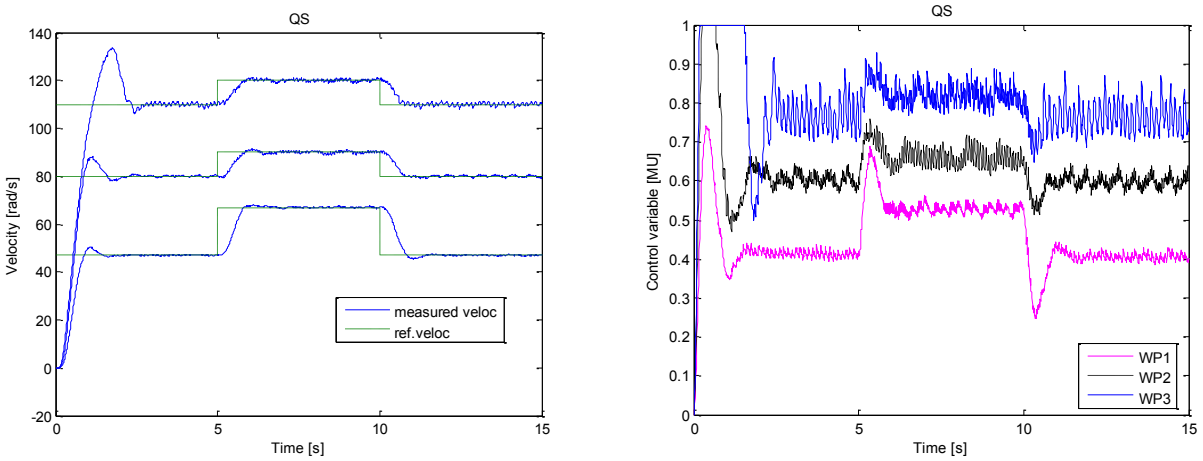


Fig.2. Step responses (left) and graphic representation of control variable (right) for the controller designed using quadratic stability for three working points

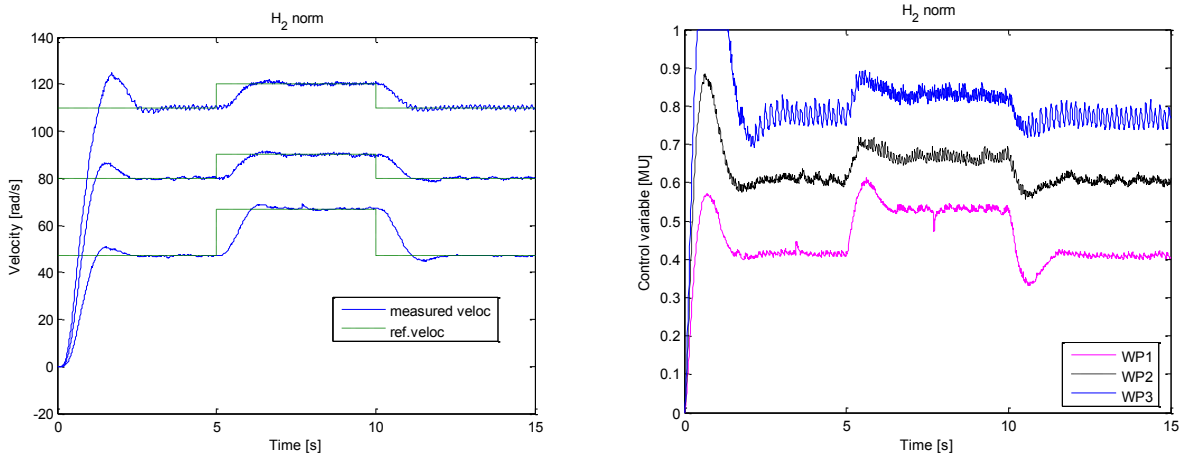


Fig.3. Step responses (left) and graphic representation of control variable for the controller designed using H_2 design for three working points

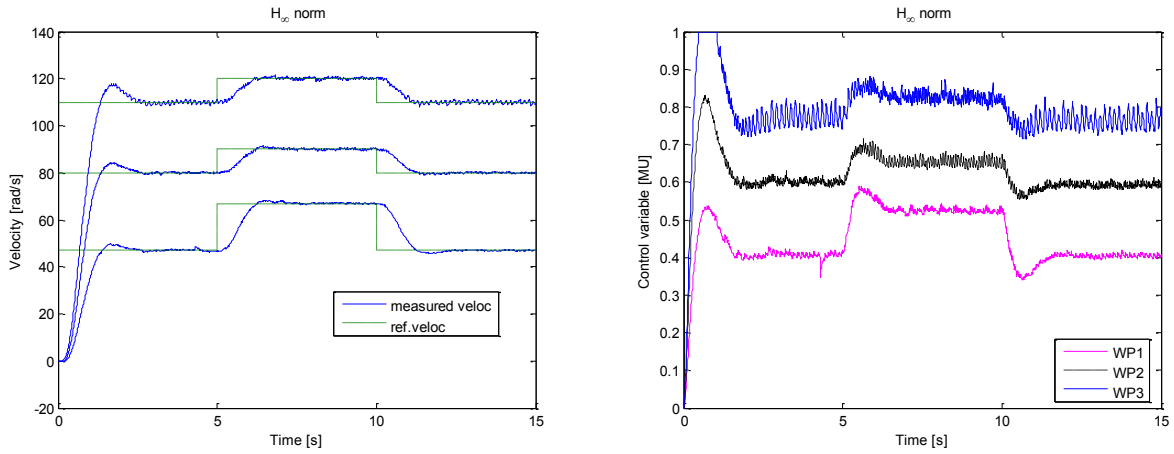


Fig.4. Step responses (left) and graphic representation of control variable for the controller designed using H_∞ design for three working points

The best values of the calculated controller parameters using quadratic stability for various solvers with minimization of matrix P trace, for H_2 and H_∞ performance specification are listed in the Table 1.
Fig.2, Fig.3 and Fig.4 show the step responses for designed robust controller (left) in three working points and graphic representation of control variable (right) in three working points.

5. Conclusion

The main aim of this paper has been to design the robust state-feedback controllers by LMI approach. The quadratic stability with minimization of trace of matrix P, H_2 and H_∞ performance specification have been used. Each method uses both LMI and SeDuMi solver. The upper constraint on matrix Y can be included into each of proposed methods and so it is possible to modify the closed-loop performance according to the specified requirements. Because the control goal is also saving power, the minimal maximum overshoot has been allowed. The results obtained by verification on MSS show the effectiveness of the proposed methods.

Acknowledgments

This work has been supported by Grant N SK-BG-0035-10 of Slovak Research and Development Agency and Grant N 1/1241/12 of the Slovak Scientific Grant Agency.

References

[1] J. Ackerman. *Robust Control - Systems with Uncertain Physical Parameters.* Springer-Verlag London Limited, 1997.
[2] S.P. Bhattacharyya, H. Chapellat, L.H.Keel. *Robust Control: The parametric Approach*. Prentice Hall, 1995.
[3] Boyd, S., L. El Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnam (1994). Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. *SIAM*, 15.
[4] Gahinet, P., Nemirovski, A., Laub, A.K., Chilali, M. (1995). LMI Control Toolbox User's Guide. *The Math Works Inc*.
[5] Henrion, D. (2009). Course on LMI optimization with applications in control. Prague, Czech Republic.
[6] Henrion, D and Lasserre, J. (2003). Globtipoly: Global optimization over polynomials with matlab and SeDuMi. *ACM Transactions on Mathematical Software,* Vol. 29, No. 2, 165-194.
[7] INTECO. *Modular Servo System, user manual*, 2007
[8] Löfberg, J. (2004). Yalmip: A toolbox for modelling and optimization in matlab. In: *Proc. Of the CACSD Conference, Taipei, Taiwan.* Available from *http://users.isy.liu.se/johanl/yalmip/pmwiki.php*

Autors: Mária Hypiusová, Tibor Bekeš, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovak Republic, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, E-mail address: *maria.hypiusova@stuba.sk*

Received 02 September 2013 **Reviewer**: Associate professor, PhD Teofana Puleva

SMALL PHOTOVOLTAIC POWER PLANT - MODEL, SIMULATION AND CONSUMPTION OPTIMIZATION

Stanislav Stevo, Jakub Osusky

Abstract: *The article deals with the possibilities of modeling and simulation of small photovoltaic power plant for off-grid houses. The article describes the optimizing methodology of photovoltaic system in terms of its design and power control appliances during the reference periods of the year. Described optimization methods - genetic algorithm - has been applied to a case study - finding an optimal control of appliance most affecting battery load of off-grid house. Optimization could reduce the required battery capacity up to 15%.*

Keywords: *photovotaic effectivness, optimization, off-grid houses*

1. Introduction

Life without electricity in "civilized" countries is almost unimaginable. In addition to the conventional energy sources are various alternative methods of electricity generation quickly developing. They often replace and reduce the use of fossil fuels (non-renewable) and they are in terms of ecology and the environment a huge step forward. Among one of the most significant alternative energy sources belong the energy production from the Sun, because the Sun is essential for the world and the most important source of all energy.

The consequences of maximizing profits and excessive efforts of increasing of living comfort as a creed and meaning of human existence are transferred to irrational wasting of energy. Wasting of energy and resources are biggest in places where are the resources are not so limited. In the case of off-grid house (house powered only by own sources) is energy wasting quickly revealed and eliminated, because is possible to spend just as much energy as we have available (this limitation does not exist in classic houses connected to the electric grid, which can provide “unlimited amount of energy”). In case when the photovoltaic power plant is main (or sole) energy source, the "intelligent" use of energy plays a very important role.

2. Photovoltaic power plant in off-grid houses

"Photovoltaic off-grid house" thus uses electricity gained only from system photovoltaic power plant – photovoltaic system (PVS) (including photovoltaic panels, batteries, controllers, etc.). Electricity is either directly spending or storing in batteries. Common sense says that if you move, as many activities associated with the spending power to the time when the sun is shining (PVS produces electricity) the less energy we have to save in batteries. This “consumption transfer” can reduce the required bat-

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

ISSN 1311-0829

tery capacity and subsequently the cost of investment. [1]
The model and simulation of photovoltaic system (photovoltaic panels, battery, etc.) is very helpful in order of consumption, charging progress optimization and in proposal process of important energy consumption scenarios – "intelligent consumption transfers of appliances". Calibrated model can predict various boundary situations (fully discharge, excess of energy etc.), which results can be used in proposal task of PVS.

3. Model of photovoltaic system

For the purposes of off-grid house is necessary to create a model of complete photovoltaic system. This model is created in Simulink (Matlab) and contains three basic elements: model of photovoltaic panel, model of battery and charge controller.

3.1. Model of photovoltaic cell

The simulation model of photovoltaic cell (PVC) is composed of several subsystems. We based PVC on the model of parallel connections diode and resistor (for model simplification), whereas PVC is also a semiconductor element and its current characteristics and behavior based on the same theory [2].

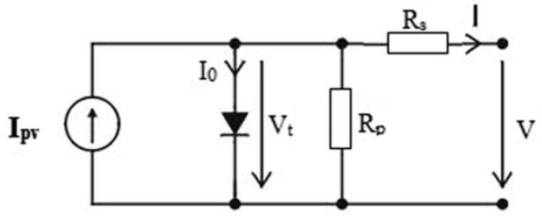


Fig.1. Schematic representation of the photovoltaic cell element

Model is based on equations for semiconductor transition adjusted for the photovoltaic element. Output current corresponds to:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t A} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{1}$$

Where I_{pv} the photoelectric current [A], I_0 is the saturation current [A], V_t is the voltage PN junction [V], V is the output voltage of cell [V], R_s is the internal (serial) cell resistance [Ω], R_p is shunt resistor resistance [Ω], A is diode quality factor $A \in (1,2)$.
Voltage of PN junctions can be determined from the equation:

$$V_t = kT / q, \tag{2}$$

where k is the Boltzmann constant [J/K], T is the temperature [K], q is the electron charge [C].
Saturation current is defined by the equation:

$$I_0 = \frac{I_{scn} + K_i (T - T_n)}{\exp(V_{ocn} + K_i (T - T_n) / A V_t) - 1}, \tag{3}$$

where V_{ocn} is nominal circuit voltage (no load) [V], I_{scn} the nominal short-circuit current [A], K_i is the temperature coefficient [A/K], T is the temperature [°C], T_n is the nominal temperature [°C] ($T_n = 25$).

The photovoltaic current is based on the equation:

$$I_{pv} = \frac{G}{G_n}\left[I_{scn} + K_i(T - T_n)\right], \tag{4}$$

where G is the intensity of solar radiation [W/m2] G ∈ (10 ; 1000), G_n is the nominal intensity of solar radiation [W/m2] ($G_n = 1000$), I_{scn} is the nominal short-circuit current [A], K_i is the temperature coefficient [A/K], T is the temperature [°C], and T_n is the nominal temperature [°C]

From the previous equations a parametric model of photovoltaic cell was built (Fig.2). That is a separate block ("Solar Panel" - Fig.5) with three inputs (external temperature, radiation intensity, cell voltage) and one output (current).

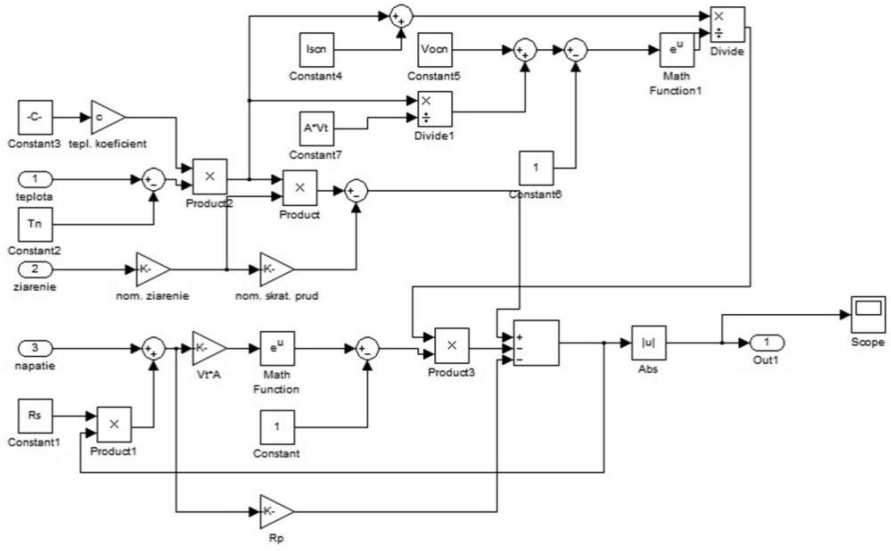


Fig.2. Model of photovoltaic cell (Simulink - Matlab)

3.2. Model of battery

Another building block of PV systems is the battery. Battery is charged during the day and it afford current when is needed. Energy is stored chemically in the form of electrical charge. For battery model can be used differential equation describing the electric current as a change of electric charge for time *t*:

$$I = \frac{dQ}{dt}, \tag{5}$$

where I is the current entering into the battery [A], Q is the el. charge which the battery is able to hold, that is, its capacity [Ah], t is the time [h]. Modifying equation (5) we obtain an equation for the model of battery.

$$Q = \int Idt \tag{6}$$

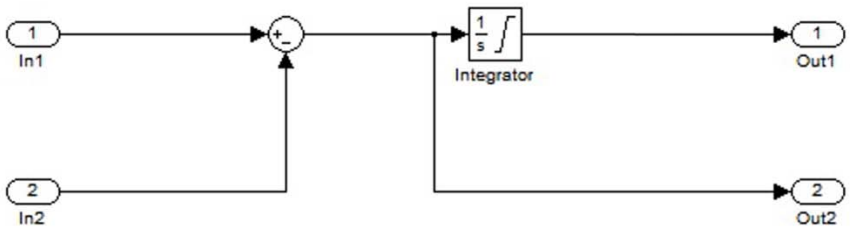


Fig.3. Model of Battery (Simulink - Matlab)

3.3. Charge controller

Charge controller was implemented as a simple PID controller, which maintains the desired charge current.

3.4. Input signals – solar radiations, temperature

PV panels are dependent on a various input signals simulating weather and climatic conditions. As we mentioned before, in a model are two inputs, which represent the intensity of sunlight and temperature. For the case study were chosen reference waveforms sun radiation intensity (Fig.4 left) and temperature (Fig.4 right) during the day for each season.

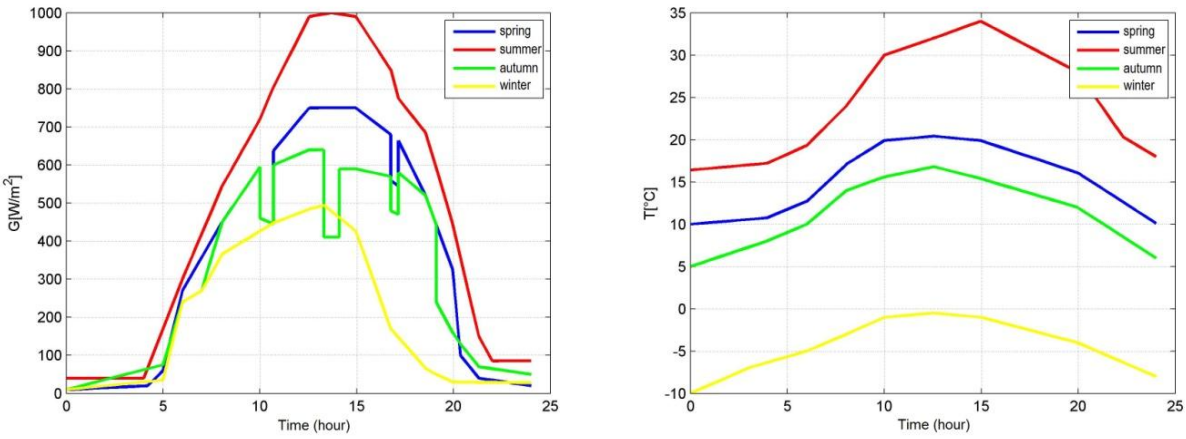


Fig.4. Left - intensity of solar radiation (during the day),
Right - temperature wave (during the day)

4. Simulation results

The final simulation model includes all described blocks and all significant inputs affecting the PVS (Fig.5).

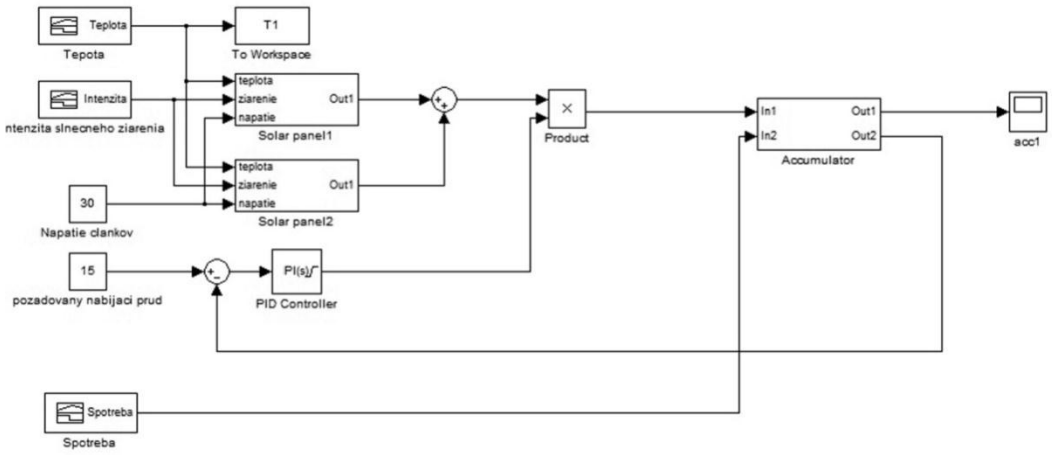


Fig.5. Simulation model of a photovoltaic system (with battery)

According to the established model and knowledge of the inputs we simulated the behavior of the PV system. Based on previous skills we set the size and type of battery and solar panels[1]. We assume the use of PVS in off-grid house firstly just for a lighting system with an estimated consumption Fig.6 left.

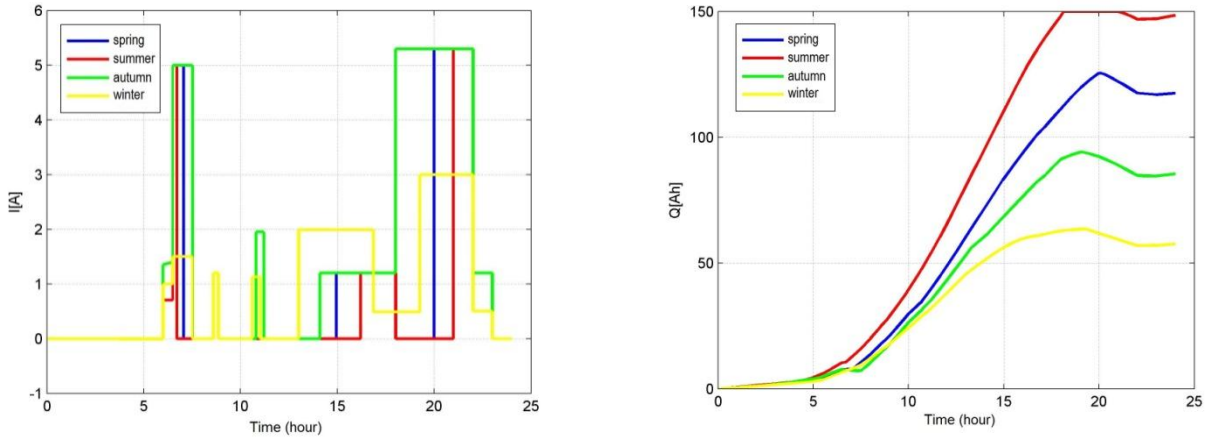


Fig. 6 Left - estimated power consumption energy (light),
Right - battery capacity (during the day)

The simulation results (Fig.6 right) shows battery charging (with capacity 150Ah) during the four reference days of the reference year periods. It is possible to determine applicability and effectiveness of the system directly from the simulation.
The simulation results show that from the state when is battery totally empty, the battery is charged enough during the day and covers the required energy for lighting (with sufficient reserve). The reserve could be used by other appliances. Due to the fact that this reserve is relatively small, its proper use is very important.

[1] 2x panel IBC polys 240 MS (rated voltage of 30V, capable provide current: 8A, power of panels is 240W . 150Ah Accumulator - Hoppecke 150Ah

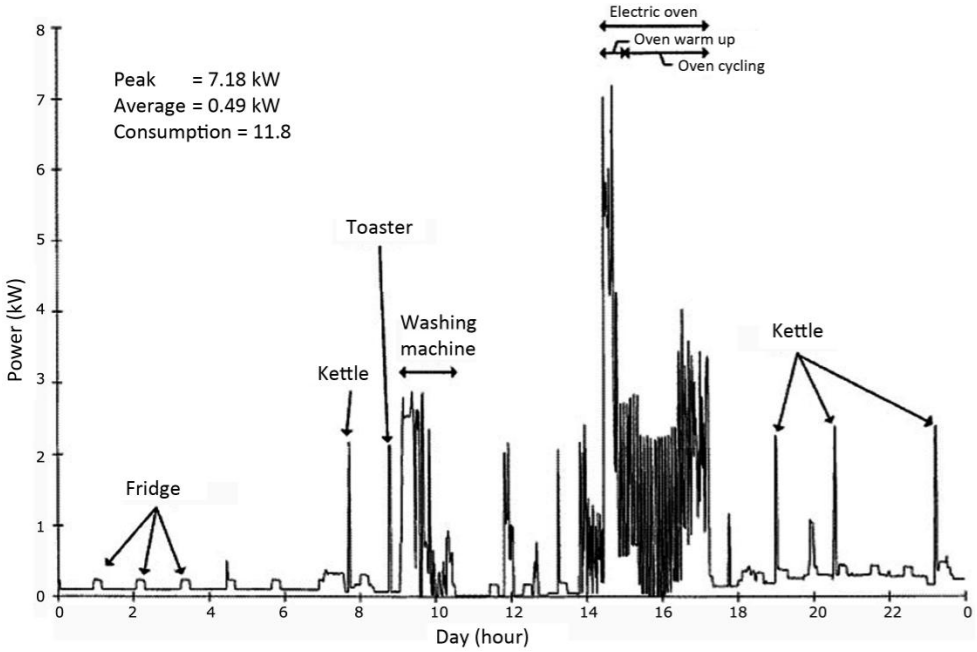


Fig.7. Measured electric consumption of a common household [3]

5. Consumption optimization

Appliances should be used especially at times when we have the largest supply of energy from the PV system, i.e. on a sunny day. Similarly, in the night, when we take energy from the battery, we should take the least. Here appears the question of transfer activities which consume energy to some "scenario" which optimally use energy from the PV system.

In many appliances (washing machine, grill, kettle, etc.) it is not a problem because we can influence on their activity, but some devices such as freezer, freezer run continuously. At first glance, it seems that we cannot influence on e.g. freezer consumption, but during the sunny part of the day can be refrigerator / freezer chilled to the maximum, so that at night it spend at least energy).

Simulation of load in case of PVS is not deterministic. Therefore is convenient to optimize the scenario by some of evolutionary techniques, which should find basic framework of optimal control of individual appliances within each reference year's period.

We decided to use genetic algorithm to optimize the time control of refrigerator cooling system with scope of minimizing energy consumption during the night.

5.1. Genetic algorithm

Genetic algorithm (GA) is a heuristic method, which main objective is the effort to find the solution of complex problems (for which exact algorithm does not exist) by application of principles of evolution biology [4]. Genetic algorithms and all methods which belong to evolution algorithms use techniques which imitate the processes of evolution, well-known in biology – heredity, mutation, natural selection and crossing [5].

The GA is based on consecutive production of various solutions for a given problem. During the process run, so-called *population* is kept. This population consis*ts of

terms and each term is one solution of given problem. As the population goes through the evolution, the solutions get better. Usually, the solution is represented by binary numbers, but it can be also found in other form (tree, field, matrix, etc.). At the beginning of GA (in the first generation), a population comprised of completely random terms is created and moving to the new generation, so-called *fitness* for each term is calculated. This fitness represents the quality of solution expressed by the resulting terms. According to this quality, the individuals are selected (by stochastic, random or another type of the selection). Consequently, they are modified (by mutation and crossing), and new population is created. This procedure is repeated iteratively and terminated either obtaining desired quality of the solution or elapsing a given time.

5.2 Process of Genetic Algorithm creation

Main goal of the process is Genetic algorithm which is able to find the best scenario of freezer cooler system control, which represents the measured object. In general, the structure of cooling steps is not known in advance. The process of genetic programming algorithm (GP) creation is harder than that of genetic algorithm [6]. It is caused by the fact that for GP a specific toolbox for each task needs to be created; on the contrary, if we had toolbox for GA it should be easily used for many similar tasks. A mentioned fact has been solved (task for GP instead of GA) prescribing the structure of minimal cooling period to 10 minutes. By considering this assumption, the task has been transformed from GP to GA (if the result does not satisfy the prescribed quality, GA is easily modified to another cooling period).

Structure of string

As mentioned before, the length of a string depends on minimal cooling interval (CI). The genes represent the sequence of CI. If CI is set to 10 minutes, it is obvious that amount of searched parameters is 144 (for 24 hours scenario) (The values of each genes can be only 0 or 1, 0-non cooling, 1- cooling)

Size of population

The size of population depends on the amount of searched Parameters and gene's structure. The population was set to 100, due to the simple gene's structure.

Mutation

Proposed GA uses two types of mutations. The first is the mutation on random value from given interval (with ratio 0.25) and the second is additive mutation (with the same rate). The rate – amount of mutations in one generation is normalized to interval <0, 1> bigger number stands for frequent mutation occurrence.

Crossing

In the algorithm, on point crossing was used and crossed strings were selected randomly.

Fitness

Fitness (quality of solution) consists of two parts. The first represents maintain temperature criteria, the second part represents the energy consumption of the solution (sum of cooling power)

Conditions of termination

GA can work in two modes; it means that we defined two conditions of GA termination:

- after reaching prescribed amount of generations
- if the value of fitness is stable for prescribed amount of generations

Syntax of GA

Mentioned GA was created in MATLAB, due to many advantages (matrix counting, etc.) of this program. The most important reason for using this tool is the existence of toolbox which involves basic functions needed for GA. This toolbox was created at our department.

6. Calculated results

Genetic algorithm found best solution of control cooling system. Fig.8 shows the gap between two cooling cycles, represents the nighttime. The temperature into freezer doesn't exceed -15 °C (temperature condition) and the cooling cycles per day consume minimum energy from battery (energy condition). This solution in comparison with common cooling scenario saves about 14% of energy.

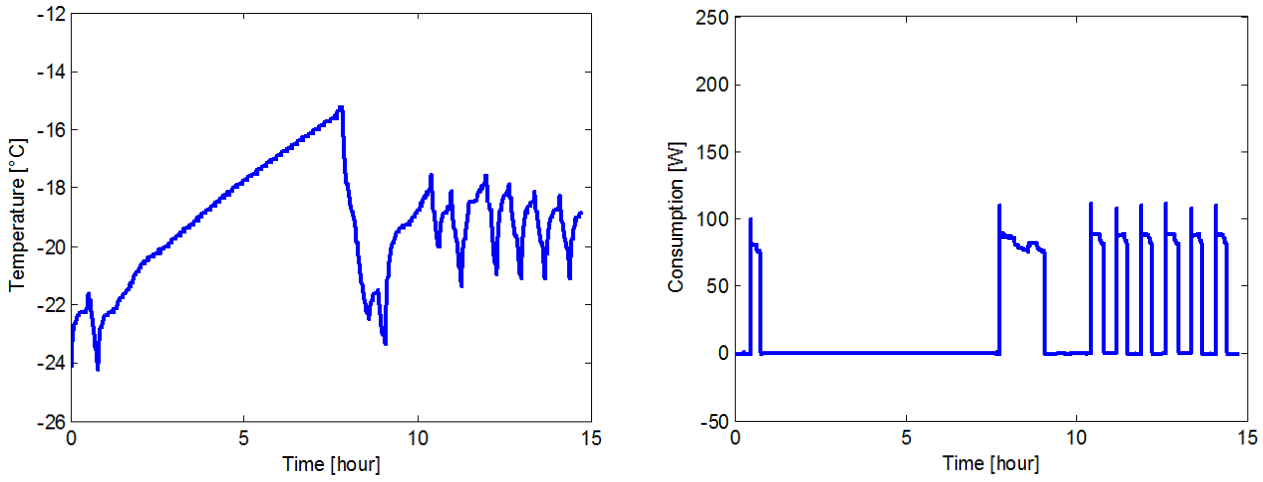


Fig.8. Left - course of temperature in the freezer,
Right - energy consumption

7. Conclusion

In this paper simulation of PV System (charging, consumption and border states) was used. It allows us to choose the optimal PV system (number of panels, batteries - the loading cycles, lifetime, etc.) which considerably reduce price of PVS. Simulation results confirmed that required capacity for lighting requirement was fulfilled and proposed system offer considerable power excess.

Power excess was used for freezer, which optimal cooling control was found by genetic algorithm. Freezing scenario proposed by genetic algorithm proved 14 % energy savings in comparison with normal cooling scenario saves. This fact is very important for off-grid houses, due to its limited energy capacity.
Off-grid homes with photovoltaic systems represent one possible realization of the idea of local energy production. Concept of energy production directly at the place of consumption forces us to think of its efficient production and necessity of its consumption. We spend energy without the consideration whether we really need it to spend. In fact we could live from 40% of the energy which we spend now, without losing anything valuable [7, 8].

Acknowledgments

This work was supported by the Slovak Republic Grants VEGA No. 1/1105/11 and bilateral project SK-BG 0035-10.

References

[1] Chovanec M., Jaras M., (2012). *Geografické aspekty rozvoja fotovoltického priemyslu na Slovensku so zameraním na priestorové rozmiestnenie*. In idb journal [online]. 2012, [cit. 22.5.2013] *http://www.idbjournal.sk/rubriky/prehladove-clanky/geograficke-aspekty-rozvoja-fotovoltickeho-priemyslu-na-slovensku-so-zameranim-napriestorove-rozmiestnenie.html?page_id=15842*

[2] Yrd. Doç. Dr. Hayrettin Can, (2013). *Model of a photovoltaic panel emulatorin* Matlab-Simulink [online]. Manuscript available on internet *http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-13-21-2/elk-21-2-1-1105-29.pdf*

[3] Stevo, S.; Petrik, M. (2013) *Smart Meter - najlepšie zarobené peniaze sú ušetrené peniaze***,** In: iDB Journal. - ISSN 1338-3337. - Roč. 3, č. 1, str. 22-25.

[4] Vose D. Michael, (1999), *The Simple Genetic Algorithm*, MIT Press Cambrigde.

[5] Sekaj, I., (2005), *Evolucné výpocty a ich využitie v praxi*, IRIS Bratislava, (in Slovak)

[6] Kvasnicka, V., Pospichal, J., Tino, P., (2000), *Evolucné algoritmy*, STU publisher, Bratislava, (in Slovak)

[7] B. Mollison, R. M. Slay, (2012), *Úvod do Permakultúry*, Alter Nativa, ISBN: 978-80-9697548-8

[8] Jasminska, N., Azariova, K., (2012), *Proposal for the environmentally friendly technologies to supply energy for the objects without standard energetic media connection*, Transfer inovácií. Roč. 4, č. 23(2012), s. 265-271. - ISSN 1337-7094

Authors: Stanislav Števo was born in 1983. Since 2007 he works at the Institute of Control and Industrial Informatics at the Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology in Bratislava. He finished PhD study in 2011 and continues working as researcher. His research interests include the areas of soft computing, intelligent buildings and sustainable living, E-mail address: *stanislav.stevo@stuba.sk ;* **Jakub Osuský** was born in 1983. Since 2007 he works at the Institute of Control and Industrial Informatics at the Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology in Bratislava. He finished PhD study in 2011 and continues working as researcher. His research interests include the areas of decentralized control of large-scale systems, process control and robust control, E-mail address: *jakub.osusky @ stuba.sk*

Received 02 September 2013 **Reviewer**: Associate professor, PhD Teofana Puleva

МИКРОДВИГАТЕЛ С НОКТООБРАЗЕН МАГНИТОПРОВОД

Адриан Иванов

Резюме: *В тази разработка се прави анализ на двуфазен стъпков електродвигател с 12 двойки ноктообразни полюси на статорите и постоянни магнити в ротора. Електродвигателят се използва като актуатор чрез винтов* (*червячен*) *ротор. Актуаторът намира приложение при задвижване на клапани и други устройства с възвратно-постъпателно движение.*

Ключови думи: *микродвигатели, ноктообразен магнитопровод, стъпкови електродвигатели.*

SMALL ELECTRIC MOTOR WITH CLAWS CORE

Adrian Ivanov

Abstract: *This article analyzes the two-phase stepping motor with 12 pairs claws poles of the stator and permanent magnets in the rotor. An electric motor is used as an actuator via a screw* (*worm*) *rotor. An actuator is used for driving the valves and other devices with reciprocating motion.*

Keywords: *small electric motor, claws core, stepping motors, DC motors*.

1. Въведение

Стъпковите електродвигатели с постоянен магнит намират широко приложение в съвременната индустрия. Те имат относително ниска себестойност и много добри механични показатели (висок въртящ момент).

Определянето на конструктивните параметри на тези двигатели може да стане емпирично, с известни приближения. Двумерен инженерен анализ не може да бъде извършен поради надлъжното разположение на полюсите на статора. Това налага използването на 3D симулационни модели, които позволяват относително точно възпроизвеждане на магнитното поле и определяне на характеристиките (индукция и напрегнатост на магнитното поле, въртящ момент) на изследвания двигател.

Електромагнитният анализ се основава на решаване на уравненията на Максуел, съставени за моделираната нехомогенна и нелинейна област.

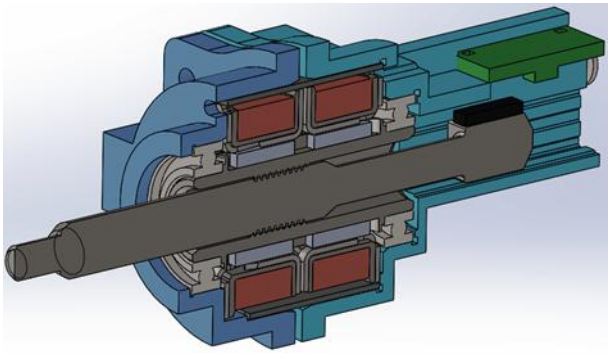
2. Конструктивни особености

Конструкцията на електродвигателя се различава от класическата поради наличието на вал тип „гайка“, чрез който въртеливото движение се превръща дирек-

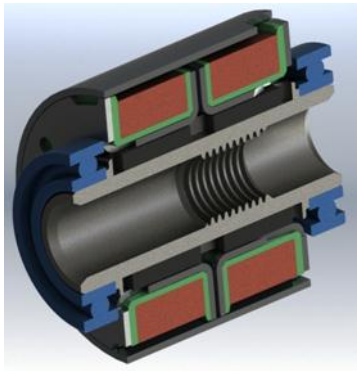
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

тно в праволинейно чрез дългостеблен болт, навиващ се в гайката - фиг.1. На разреза показан на фиг.2 е показано разположението на постоянните магнити залепени по повърхността на ротора.

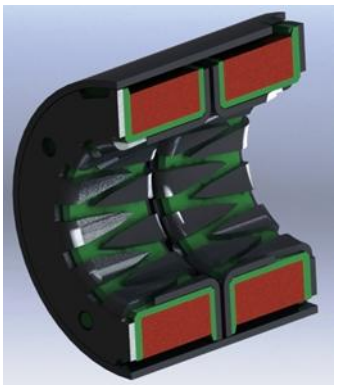


Фиг.1. Актуатор

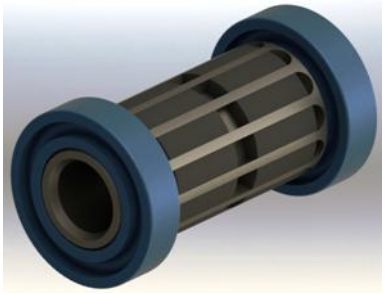


Фиг.2. Двигател без корпус

Двете намотки на статора са навити върху изолационни макари. Около тях са затворени ноктообразните полюси на статора, както е показано на фиг.3. Разположените в каналите на ротора предварително намагнитени в тангенциална посока призматични редкоземни магнити образуват 24-те полюса на двигателя - фиг.4.



Фиг.3. Статор



Фиг.4. Ротор

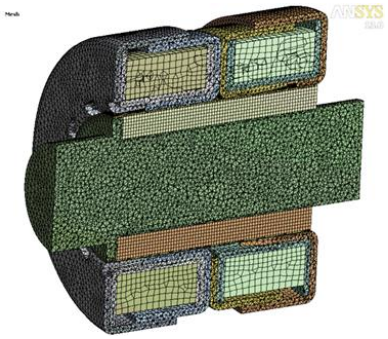
3. Моделиране чрез МКЕ

Основните етапи при моделирането на изследвания електродвигател са следните:

- Генериране на 3D геометрия, която включва: съставяне на опростен геометричен модел на двигателя съдържащ активните му части и изграждане на околната среда, обхващаща пълният 3D модел - фиг.5 и фиг.6;
- Съставяне на изчислителен модел: създаване на мрежата от крайни елементи, задаване свойствата на материалите и дефиниране на гранични условия: включващи източници на електрически ток, условия за непрекъснатост на средата и условия за симетрия или цикличност;

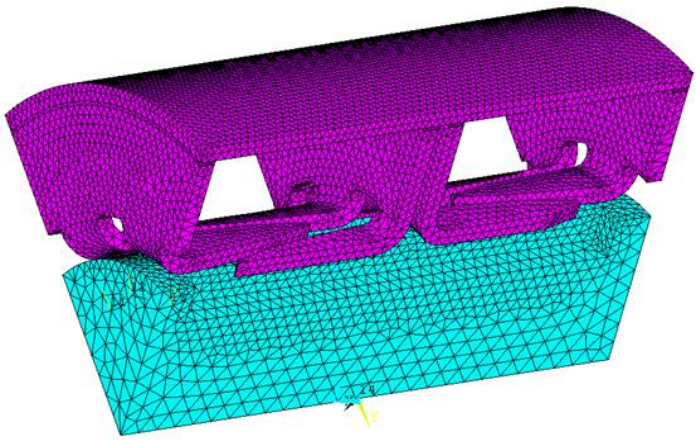
- Обработка на резултатите: освен определяне на магнитните показатели (индукция, напрегнатост), се извършват някои допълнителни частни решения за определяне на механичните показатели - сила и въртящ момент.

Фиг.5. Пълен 3D модел



Фиг.6. 3D модел на активните части

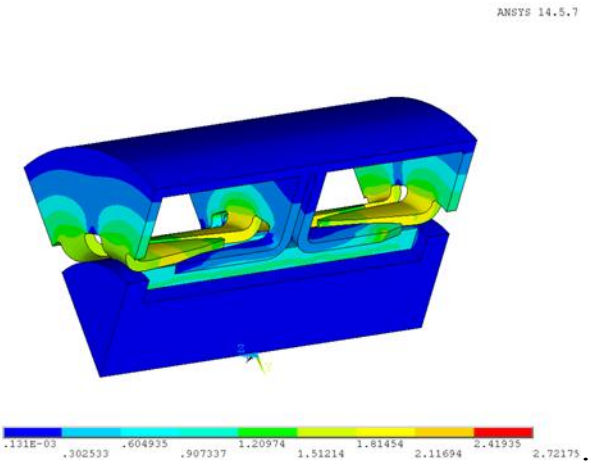
Предвид наличието на симетричност на конструкцията изчислителният анализ може да се проведе върху 1/12 от обема му. За избягване на неточности, свързани с нарушена цикличност, изследванията се провеждат за 1/6 от обема на двигателя, както е показано на фиг.6.



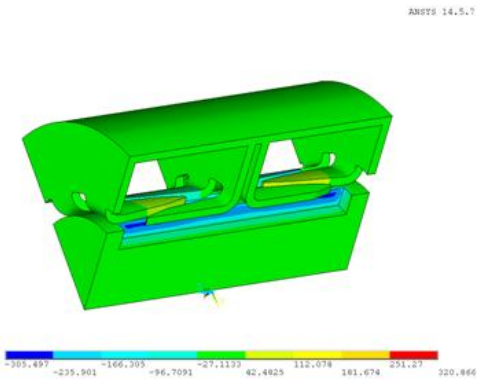
Фиг.6. Частична 3D мрежа от крайни елементи, обхващаща 1/6 от двигателя

4. Резултати от анализа с ANSYS

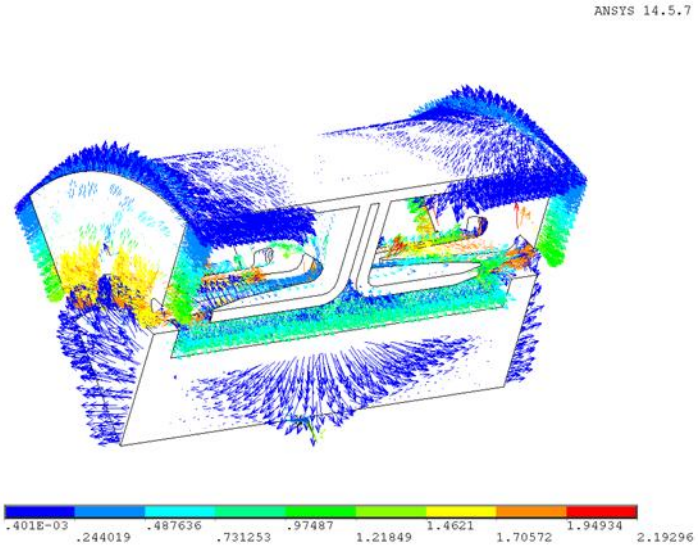
След приключване на числения анализ посредством програмния продукт ANSYS се получават резултатите показани на фиг.7, фиг.8 и фиг.9. Посредством вариране на стойността на пълния ток и промяна на параметрите на постоянните магнити се постигат желаните резултати. Тези резултати дават основание да се направи заключението, че избраните геометрични размери и намотъчни данни са определени правилно. Изборът на редкоземен постоянен магнит се базира именно на тези резултати.



Фиг.7. Магнитна индукция



Фиг.8. Напрегнатост на магнитното поле



Фиг.9. Магнитен вектор потенциал

5. Избор на постоянен магнит

Аналитичните методи за определяне на магнитната верига и работната точка на постоянния магнит са трудно приложими за този тип конструкции поради сложната им конфигурация. Тези класически методи се използват само за предварителни пресмятания на началното магнитно състояние. Всички останали изчисления се извършват в програмната среда на ANSYS.

От резултатите се направи избор на постоянен магнит VMM8SH.

Основни показатели: Br = 1.32 - 1.38 T; Hcb = 876 - 969 kA/m;

Hcj >=1592 kA/m; (B.H)max = 334-358 kJ/m3, μr = 1.048; Tw до 150°C

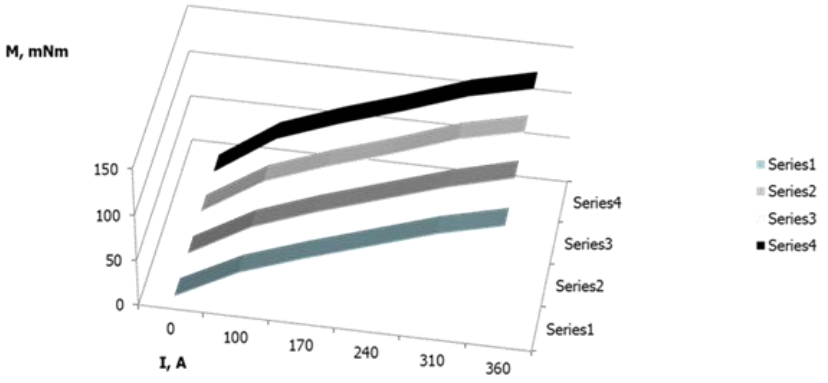
6. Електромагнитен въртящ момент

Определянето на електромагнитен момент чрез МКЕ се осъществява или по метода на виртуалната работа или чрез тензора на напреженията на Максуел. Предвид различният подход за решаване на задачата резултатите от двата метода се отклоняват с няколко процента. В табл.1 са дадени резултати при различни стойности на тока в статорните намотки и различни магнити.

Табл.1

Големина на пълния ток, А	VMM5SH M, mNm	VMM6SH M, mNm	VMM7SH M, mNm	VMM8SH M, mNm
360	120	125	129	132
310	103	107	113	116
240	81	85	89	92
170	59	63	67	70
100	35	38	42	45

Както се очакваше редкоземният постоянен магнит с най-голяма магнитна енергия (Series4 на фиг.10) при равни други условия създава най-голям електромагнитен момент – фиг.10.



Фиг.10. Електромагнитен момент за различни магнити

7. Заключение

Изборът на дебелината на магнитопровода, материалът от който да се изработи, силата и размерите на постоянния магнит, както и тока през намотката и броя на навивките й може да се определи с достатъчно висока точност чрез решаването на задачата с МКЕ.

Увеличаването на електромагнитния въртящ момент е реципрочно експоненциално нарастващо, както на тока в намотките, така и на силата (енергията) на постоянните магнити.

Литература

[1] Kuo, Benjamin C., Singh, G., Yackel, R. ***Modeling and simulation of a stepping motor,*** Energy Conversion, IEEE Transactions 2003 (Volume:14, Issue: 6, pp:745 - 747)

[2] Stiebler, M., ***Model representation of claw-pole stepping motors*****,** Energy Conversion, IEEE Transactions 2005 (Volume:20, Issue: 4, pp: 802 - 808)

[3] Suyeon Cho, Woongchan Chae, Hyunjong Park, Hyunseok Hong, Ingun Kim, Ju Lee, ***Characteristics Analysis of Claw-Pole PM Stepping Motor Considering Magnetic Saturation and Leakage Flux,*** Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), 2012 Sixth International Conference, pp: 1-4

[4] Лазаров, В., З. Ж. Зарков, ***Определяне на електромагнитния момент на хибриден стъпков двигател при токово управление в динамични режим,*** Списание E+E, 7-8, 1995, стр. 33-36.

[5] Борис Илиев, Катинка Илиева, ***Приложение на стъпкови електродвигатели за задвижване на мехатронни системи*****,** XVIII ННТК с международно участие „АДП-2009”

[6] Stepper Motor System Basics. *http://www.ams2000/stepping101.html*

Автор: Адриан Петров Иванов, гл. ас. д-р, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *apiv@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** проф. д-р инж. П. Ризов

КОНТРОЛНО-ИНФОРМАЦИОННА И УПРАВЛЯВАЩА СИСТЕМА ЗА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ И ОСВЕТЛЕНИЕ НА ПЪТНИ ТУНЕЛИ

Ангел Пачаманов, Николай Матанов, Петър Стоев, Иван Ангелов

Резюме: *Изисквания към системата за управление и контрол. Архитектура и отговорности на различните нива. Отдалечен контрол. Възможности и реализация. Програмно осигуряване.*

Ключови думи: *системи за мониторинг и контрол, тунелно осветление*

MONITORING AND CONTROL OF ELECTRICAL AND LIGHTING SYSTEM OF ROAD TUNNELS

Angel Pachamanov, Nikolai Matanov, Petar Stoev, Ivan Angelov

Abstract*: Requirements for the management and control systems of road tunnels. Architecture and responsibilities at different levels. Remote control. Opportunities and development. Software.*

Keywords: *control systems of road tunnels, tunnel lighting, remote control*

1. Въведение

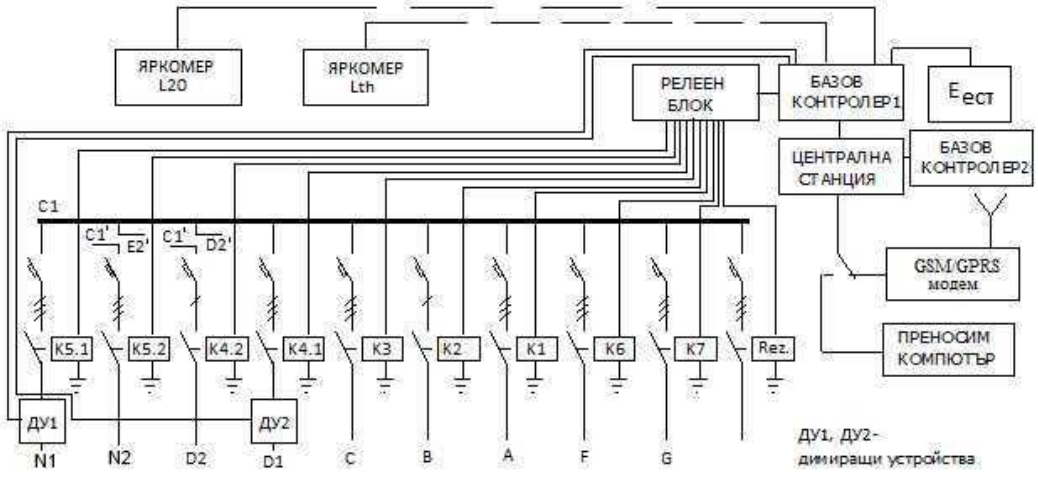
Основна задача на тунелното осветление е да гарантира добра видимост на обектите върху пътното платно в рамките на безопасното разстояние за спиране на моторните превозни средства (МПС). Зрителното възприятие на водача е пропорционално на яркостта на обектите, проектирани на ретината на зрителния анализатор. За най-тежка зрителна задача се приема различаването на обект след входа на тунела. Определяща за това е яркостната адаптация на водача при наближаване на тунела, за която основно значение имат яркостите в поле с ъглов размер 20° от разстояние, равно на спирачния път. Яркостната адаптация се изразява с яркостта L_{20}, често наричана адаптационна, която е комбинация от яркости на обкръжението на тунелния вход (склон и небе), пътна настилка и отвор на тунелната тръба. Тези яркости зависят от часа на деня, сезона, метеорологичните условия и ориентацията на тунела. Яркостта L_{20} се променя от 100 cd/m^2 до 5000 cd/m^2 и за този диапазон е установена линейна зависимост между изискваната яркост на платното L_{th} във входната зона и адаптационната яркост L_{20}, а именно $L_{th}=k.L_{20}$. Задача на управляващата система е поддържане на това съотношение, като коефициентът k се променя в зависимост от интензивността на трафика.

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

ISSN 1311-0829

2. Описание на проектното решение

В статията се разглеждат особеностите на информационно-управляващата система за електроснабдяването и осветителната уредба на автомагистрален пътен тунел с дължина 380 m, изграждащ се в участък „Дупница-Благоевград". Тунелът е с две тръби и еднопосочно движение във всяка от тях, с по две ленти за движение. През него е предвидено да преминават само моторни превозни средства с допустима скорост 80 km/h. Проектната интензивност на трафика е над 25000 МПС за денонощие, при часова интензивност в "пиков" час около 2500 МПС/h в едната посока. Дневното и денонощното дежурно осветление е проектирано с тунелни осветители с натриеви лампи с високо налягане с конвенционална пусково-регулираща апаратура, разположени едноредово. Предпорталното осветление е с дясно разположение на стълбовете и осигурява оптично водене на участниците в движението, за което спомагат и постоянно-светещите LED осветители за евакуационното осветление.



Фиг.1. Обща структурна схема на ИУС

Информационно-управляващата система (ИУС) осигурява енерго-икономично управление на осветлението в тунелната тръба при промяна на интензивността на трафика през тунела и промяна на естествената осветеност навън. Едновременно с това тя освобождава експлоатационният персонал от непривлекателен труд, свързан с периодични проверки и изготвяне на отчети.

Структурата на ИУС е показана на фиг.1 и включва три йерархични нива:

а) базов контролер, получаващ информация от два яркомера с токов изход (4-20 mA), чиито сигнали са пропорционални на измерената яркост L_{20} на 20-градусовото поле за адаптация пред тунелния вход и на яркостта на платното L_{th} във входната зона на тунела. Първият е монтиран на 100 м пред тунелния вход, на височина около 4 м (на последния стълб за предпорталното осветление), а вторият – на стената на същата височина. Обикновено той има и втора функция – тукущо измерване на интензивността на трафика през тунелната тръба. Базовият контролер се монтира в разпределителното табло НН и управлява дневното осветление по стойността на яркостта L_{20} и интензивността на трафика, при контрол на яркостта на платното L_{th} [9]. Управлението на осветлението за двата

входа на тунела е независимо и автономно. Вместо текущо измерване на интензивността на трафика може да се работи и със сезонни 168-часови графици, записани в паметта на контролера;

б) централна станция (CS) от тип SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Тя получава информация от двата базови контролера за работата на осветлението и периодично я предава по интернет (напр. *i*.LON 100 Internet Server) до произволен компютър с достъп до глобалната мрежа (служба за експлоатация на група тунели или компютър на ремонтния персонал).

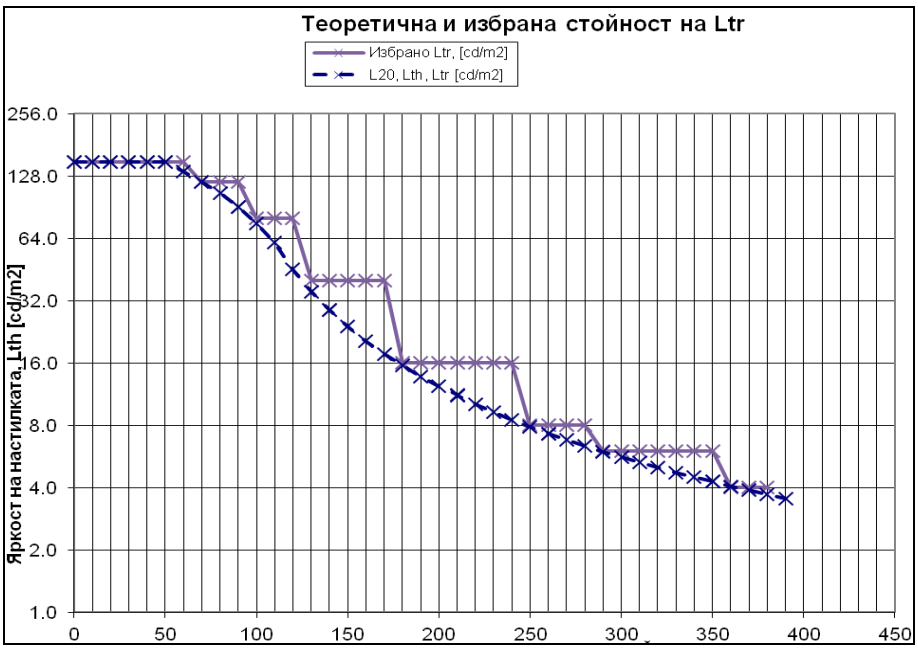
в) високо ниво - лаптоп за наблюдение и диспечерско телеуправление при тестване и ремонти на място или стационарен компютър за контрол на уредбата от разстояние.

3. Степени за управление на тунелното осветление

За удовлетворяване на заданието за проектиране и нормативните изисквания [3] в тунелните тръби са предвидени следните типове осветление:

- Адаптационно осветление за входната и преходната зони;
- Дежурно осветление по протежение на цялата тунелна тръба;
- Предпортално осветление, осигуряващо една трета от нормираната стойност на дежурното осветление на тунела;
- Евакуационно осветлените, работещо непрекъснато.

Осветлението на входната и преходната зони е с осветители с натриеви лампи с високо налягане с мощности 400, 250 и 100 W по система “насрещно излъчване” (counterbeam lighting system). При разрешената скорост на движение 80 km/h входната зона е с дължина 100 m и е разделена на две части. В първата половина се реализира най-високата стойност яркостта на платното L_{th}, определена като функция на L_{20} (L_{th}=k.L_{20}) - 150 cd/m^2 за страна „София“ и 210 cd/m^2 за страна „Благоевград“. Във втората половина на входната зона яркостта на платното спада линейно до 0,4 от началната стойност. В преходната зона тя намалява по зависимостта $L_{tr} = L_{th}.(1,9 + s / v)^{-1,4}$, където s е разстоянието в метри от края на входната зона до точката, в която се определя яркостта, а v – разрешената скорост на движение в m/s (фиг.3). Избрано е 6 степенно стъпално заместване на кривата L_{th}_L_{tr}_L_{in} (яркост входна-преходна-вътрешна зони). Дължините на участъците са определени чрез решаване на оптимизационна задача по критерий минимален преразход на електроенергия спрямо плавната крива. Критерий за търсене на екстремум е сумата от площите на получените триъгълници. Тя трябва да е минимална като по-горните триъгълници „тежат“ повече, тъй като разходът на електроенергия за осветление е пропорционален на ординатите, съответстващи на инсталираните мощности за осветление. Ограничения в задачата са отношенията между две съседни яркости (под 3 за частта L_{th}_L_{tr} и под 1,5 за частта L_{tr}_L_{in}). При така полученото стъпаловидно заместване на плавната крива осветителите са разпределени по групи от 4-2-1 броя, като разстоянието между групите е еднакво.



Фиг.3. Яркост на пътя по протежение на тунела

Системата за управление осигурява следните режими:

За дежурното осветление:

а) ръчен режим за двете линии на дежурното осветление - чрез превключвател с две положения “Авт.”/”Ръчно”. Преминаването към режим 50% се осъществява чрез ръчно включване на димиращото устройство;

б) автоматичен режим – осъществява се от базисния контролер, като режим 50% се реализира по сигнал за групово димиране на осветителите.

За дневното адаптационно и предпорталното осветление:

а) ръчен режим - от секцията на разпределителното табло за съответната тунелна тръба чрез превкючвател с две положения “Авт.”/”Ръчно” (дори при отсъствие на базовия контролер);

б) автоматичен режим – предпорталното и първата степен на дневното осветление се управлява по естествена осветеност, на база сензор за осветеност към базисния контролер. Останалите степени за дневно осветление - чрез яркомери за L_{20} преди навлизане в тунела;

в) диспечерско телеуправление - чрез преносим компютър от диспечерски пункт или по интернет с произволен компътър, с гарантирано право на достъп до системата за управление и криптиране на управляващите сигнали.

За осигуряване на достатъчно степени на работа на осветлението осветителите са групирани в линии. Всяка тунелна тръба има:

а) пет линии за дневно осветление (D1, D2, C, B, A - в съотношение на мощностите 0,5:0,5:1:1:1);

б) две линии за дежурното осветление (N1, N2), взаимно резервищи се на база два независими захранващи източника;

в) една захранваща линия за предпортално осветление (F);

г) една захранваща линия за евакуационно осветление (G).

Чрез избор на различни комбинации от наличните линии контролерът осигурява

необходимата яркост на платното, като функция на яркостта L_{20} и трафика през тунелната тръба. Диапазоните за превключване на осветлението са определени на база честотното разпределение на адаптационната яркост L_{20} за тунелния вход [9]. Алгоритъмът за е на база приетите решения в проекта за тунелно осветление, именно:

$k= L_{th}/L_{20}=0,06$	Северен вход (София)	Южен вход (Благоевград)
$L_{20\text{-}max}$, cd/m^2	2500	3500
$L_{th\text{-}max}=k.L_{20\text{-}max}$, cd/m^2	150	210

Табл.1.

Тежест на линиите за дневно осветление и осигурявани яркости на платното

Тежест	Линия	Дял в %
0,5	D1	12,50
0,5	D2	12,50
1	C	25,00
1	B	25,00
1	A	25,00
4	25	100,00

Линия	Lth, cd/m2
D1	18,75
D2	18,75
C	37,5
B	37,5
A	37,5
Общо:	150

Табл.2.

Степени на работа по включвани линии за дневното осветление

Степен	Линии*	Нечетни месеци	Четни месеци	РЕЖИМ %
6	D1 (D2r)	D1 с К4.1	D2 с К4.2	12,50
5	D1+D2r	К4.1 + К4.2		25,00
4	C+D2r	К3+К4.2		37,50
3	C+ D1+D2r	К3+ К4.1+К4.2		50,00
2	B+C+ D1+D2r	К2+ К3+ К4.1+К4.2	К1+ К3+ К4.1+К4.2	75,00
1	A+B+C+D1+D2r	К1+ К2+ К3+ К4.1+К4.2		100,00

*Отчитат се часовете работа на всяка група. Линия D2r е захранена от независим източник и участва във всички степени заради резервиране на дневните степени на осветлението.

Табл.3.

Светлинни програми за страна "София"

Светлинна програма	Степен	РЕЖИМ %	Lth, cd/m2	k=Lth/L20	L20, cd/m2	$Ro_{20rp.av}$	Eest, lx
50% дежурно (нощно)	8	1,33%	2	0,06	33,3	0,3	349
100% дежурно	7	2,67%	4	0,06	66,7	0,3	698
Разсъмване-свечер.	6	12,5	18,8	0,06	312,5	0,3	3271
Мрачно	5	25	37,5	0,06	625,0	0,3	6542
Плътна облачност	4	37,5	56,3	0,06	937,5	0,3	9813
Променливо облачно	3	50	75,0	0,06	1250,0	0,3	13083
Почти слънчево	2	75	112,5	0,06	1875,0	0,3	19625
Слънчево	1	100	150,0	0,06	2500,0	0,3	26167

4. Алгоритъм за осигуряване на светлинните програми

Базовият контролер за управление на тунелното осветление е с вграден часовник за реално време и записани в паметта му календари за естествена осветеност – това са минути спрямо полунощ на настъпване на праговите стойности 5, 10, 20, 40, 60, 80 lx сутрин (от 240 до 540 минута) и вечер (от 960 до 1260 минута). Така се реализира комбинирано управление по осветеност и по време, което прави възможно регистриране на отклонения в работата на сензора за осветеност, например замърсяване на приемната му повърхност.

Превключването на останалите степени на осветлението се извършва по метод за адаптивно управление [9], осигуряващ текущо определяне на диапазоните за L_{20}, съответстващи на конкретното експлоатационно състояние на уредбата (стареене на лампите, замърсеност на оптичната система на осветителите). Тези диапазони периодично се актуализират на база измерваната от яркомер яркост на платното L_{th}. Така управлението се реализира без преразход на електроенергия, вследствие на приетия при проектирането експлоатационен фактор, тъй като на по-високата яркост L_{th} (докато уредбата е нова) текущо се определят по-високи стойности на L_{20}, при които ще се включва по-силната степен за дневно осветление. Този алгоритъм е равностоен на много по-скъпото димиране в началните часове на работа на уредбата, заради по-големия светлинен поток на светлинните източници.

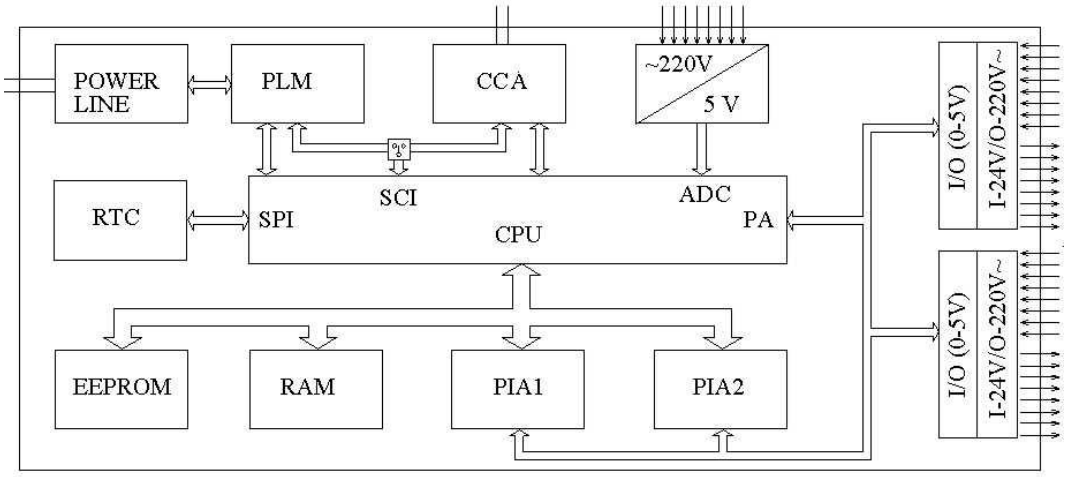
Втората особеност на метода е по отношение на промяната на константата $k=L_{th}/L_{20}$. По текущо измерена интензивност на трафика или предварително въведени сезонни 168-часови графици за интензивността на движение класът на тунела се актуализира текущо, а намаляването на константата $k=L_{th}/L_{20}$ позволява редуциране на мощността на осветлението.

5. Хардуерно и софтуерно обезпечаване

Като централна станция се използва стандартен интернет i.LON 100 сървър, с който е възможно да се организира генериране на алармени сигнали за възникнали събития, режим за съхраняване на данни и др.

Базовият контролер е разработен специално за управление на тунелно осветление и връзките му с останалите устройства са показани на фиг.1. Релейният блок е така изпълнен, че контакторите могат да се включват и изключват ръчно, дори при демонтиран базов контролер.

Блоковата схема на контролера е показана на фиг.4. Към входно-изходния блок принадлежат оптично развързани входове за аналогово-цифров преобразувател (ADC) за контрол на захранващото и две контролни напрежения, оптично развързани двоични входове от обратни връзки за състоянието на контакти на управлявани и контролирани устройства, оптично развързани двоични изходи за задаване на степен на работа на димиращите устройства. Релейният блок включва до 10 контактора чрез релета с нормално отворени контакти 4A/220V~. Към контролерите има свободни цифрови входове за свързване на сигнали от допълнителни сензори (например сигнал от контакт за отворена врата при неоторизиран достъп до съоръженията).



Фиг.4. Функционална блокова схема на базовия контролер

Управляващата програма на компютъра в диспечерския пункт работи в среда Windows'7 и осигурява следните възможности:

а) при работа в автоматичен режим се визуализира състоянието на осветлението (екран "Осветление") и всички важни величини, отразяващи функционирането на системата;

б) при преминаване на диспечерски режим е възможно подаване на желана комбинация за включване или изключване на групи осветители.

6. Заключение

Разработената информационно-управляващата система за осветителната уредба и електроснабдяването на пътен тунел с дължина до 400 m е подходяща за всички градски тунели, които обикновено са с по-малка или съизмерима дължина. При по-дълги пътни тунели и наличие на два трансформаторни поста от двете страни на тунела системата е с подобно изпълнение с изключение на средата за пренасяне на информация – тук връзката между централната станция и базовите контролери обикновено е с оптични кабели.

Литература

[1] БДС 16103-85. ***Осветление на тунели. Технически изисквания***

[2] CIE Publication No 26/2(1988). ***Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses***

[3] CEN CR 14380:2003 ***Lighting application – Tunnel Lighting***

[4] BD 78/99, Volume 2, Section 2, Part 9, Chapter 10. ***Plant Monitoring and Control***

[5] prEN CEN/TC 169/WG6 – N136. ***Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses***

[6] *http://www.tunnellighting.com* ***(Tunnel Lighting – Design and Control)***

[7] Пачаманов А., Б. Прегьов. ***Управление на осветлението на пътни тунели с отчитане на особеностите на трафика.*** XI национална конференция по осветление 13-15 юни 2001 г. “ОСВЕТЛЕНИЕ-2001”, МДУ - Варна

[8] Технически университет - София, ***Метод и устройство за управление на осветлението на пътен тунел.*** Рег.No 104687/11.08.2000, България. Патент за изобретение No 64404B1/07.01.2005

[9] Технически университет-София, ***Метод за адаптивно управление на осветлението на пътни тунели.*** Рег. №105872/03.09.2001; Патент за изобретение № 64452/28.02.2005

Автори: инж. Ангел Саракинов Пачаманов, проф. д-р, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, р-л НИИКЛ “Осветителна техника”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pach@tu-sofia.bg, www.onilot.com*; д-р инж. Николай Стефанов Матанов, гл. ас. д-р, катедра “ЕСЕОЕТ”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*; маг. инж. Петър Иванов Стоев, докторант, катедра “ЕСЕОЕТ”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pstoev@tu-sofia.bg*; маг. инж. Иван Колев Ангелов, гл. ас., катедра “ЕСЕОЕТ”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivanang@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р А. Цолов

ОПТИМАЛЕН ИЗБОР НА НИВАТА НА ЯРКОСТ НА ПЪТНОТО ПЛАТНО В ПРЕХОДНАТА ЗОНА НА ПЪТНИ ТУНЕЛИ

Ангел Пачаманов, Петър Стоев, Николай Матанов

Резюме: *Яркостта на платното L_{tr} в преходната зона на пътни тунели се реализира така, че да се съобразят адаптационните способности на дневното човешко зрение по израза $L_{tr} = L_{th}.(1{,}9 + s/v)^{-1,4}$. Тук L_{th} е яркостта на пътя след входа на тунела, s - изминатото разстояние, v - скоростта на движение. При заместване на кривата за L_{tr} с 4-6 постоянни нива, дължината на участъците се получава като решение на оптимизационна задача с целева функция минимален разход на електроенергия за осветление в зоната.*

Ключови думи: *проектиране, системи за тунелно осветление*

OPTIMIZING OF LUMINANCE LEVELS IN THE TRANSITION ZONE OF ROAD TUNNELS

Angel Pachamanov, Petar Stoev, Nikolai Matanov

Abstract*: The luminance L_{tr} in the transition zone of the road tunnels is implemented so as to comply adaptation abilities of the daily human vision $L_{tr} = L_{th}.(1{,}9 + s/v)^{-1,4}$. Here L_{th} e luminance of the road surface at the beginning of the threshold zone, s is the distance traveled, v – permitted movement speed. Substitution curve L_{tr} with a 4-6 constant levels, the length of the sections is obtained as a solution to an optimization problem with objective minimum power consumption for lighting in the area.*

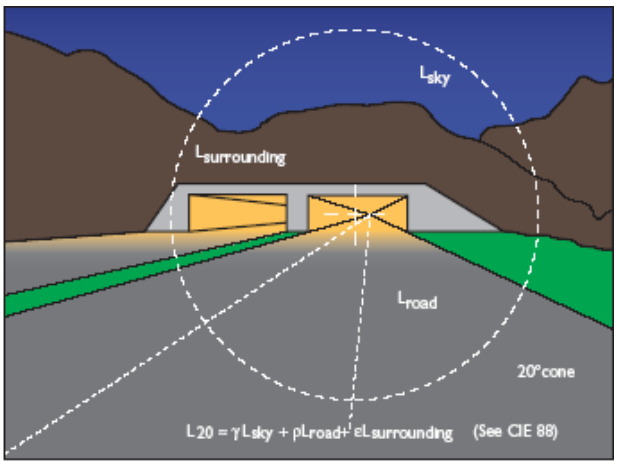
Keywords: *design, tunnel lighting*

1. Въведение

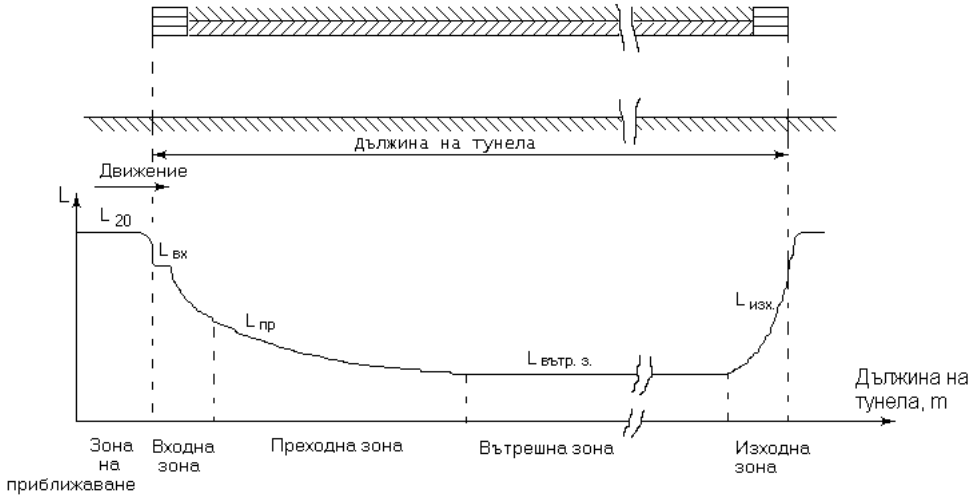
Предназначението на дневното осветление в пътните тунели е да се осигури преминаването им при комфорт, равностоен на този при движение по открит път. Денем, преди навлизане в тунела, зрението на водачите на моторни превозни средства (МПС) е адаптирано към високите яркости на пътя и обкръжаващата тунелния вход среда (фиг.1), което затруднява разпознаването на обекти след неговия вход. Това налага началото на тунелната тръба да е добре осветена, като избраното ниво е функция на разрешената скорост на движение, интензивността на трафика и яркостта на обкръжаващите тунелния вход повърности. Процесът на адаптация на зрението към по-ниските нива на яркост в тунела се извършва в първите три от условно приетите 5 зони на тунела (фиг.2) - зона на приближаване, входна зона, преходна зона, вътрешна зона и изходна зона.

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

ISSN 1311-0829



Фиг.1. Поле на адаптация на водача на МПС преди навлизане в тунел



Фиг.2. Характерни зони на пътен тунел

Международната комисия по осветление [1] обвързва възможността за забелязване на обект след входа на тунела с параметъра ***k***:

$$k=L_{th}/L_{20}, \qquad (1)$$

където L_{20} е резултантна адаптационна яркост в 20 градусово сечение на конична повърхност с връх стоящ на безопасното спирачно разстояние от входа за разрешената скорост на движение (фиг.1), а L_{th} – яркостта на платното от началото до средата на входната зона (дължината на входната зона също е равна на спирачния път на автомобила SD). В първата половина на входната зона интензивността на осветлението се определя по израза:

$$L_{th1}=k.L_{20}\ , \qquad (2)$$

където k зависи от интензивността на трафика и разрешената скорост на движение. При всяка разрешена скорост яркостта L_{th2} достига стойност $0{,}407.L_{th1}$ в края на входната зона по зависимостта:

$$L_{th2} = L_{th1}[1 - a.(s - SD/2)], \qquad (3)$$

където s е разстоянието в метри от началото на входната зона до точката, в която се определя L_{tr}, а коефициентът ***a*** е функция на спирачния път SD:

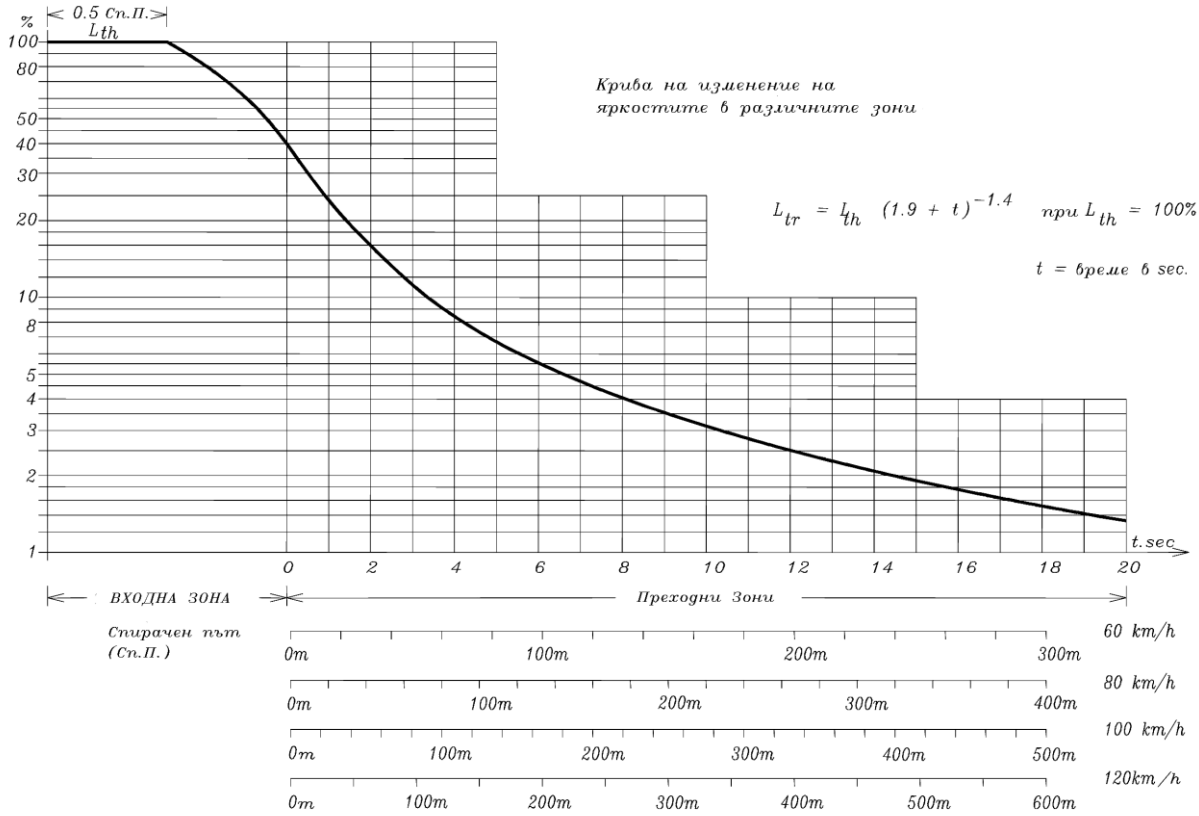
Табл.1.

v=60km/h=16,67 m/s	v=80km/h=22,22 m/s	v=100km/h=27,78 m/s
SD=60 m	SD=100 m	SD=160 m
*a=(1-0,407)*SD/2=0,019767*	*a=(1-0,407)*SD/2=0,01186*	*a=(1-0,407)*SD/2=0,007413*

В преходната зона яркостта намалява по зависимост, осигуряваща адаптиране на зрението към яркостта на платното във вътрешната зона. Дължината й също се определя по яркостта на входната зона L_{th1} , но по израза:

$$L_{tr} = L_{th1}(1.9 + (s - SD/2)/v)^{-1.4}, \quad (4)$$

където t=(s-SD/2)/v е времето (в секунди) за достигане на изчислителната точка за разрешената скорост на движение (при t=0, $L_{tr}=0,407.L_{th1}$). Във вътрешната зона яркостта на платното е с постоянна стойност L_{in}.



Фиг.3. Разпределение на яркостите на пътното платно във входната и преходната зона

2. Същинска част

За конкретно-разглеждания пътен тунел осветлението във входната и преходната зони е заложено да се изпълни с осветители с асиметрично насочено излъчване (counterbeam lighting system) с натриеви лампи с високо налягане с мощности 400, 250 и 100 W. Разрешената скорост е 80 km/h, което означава спирачно разстояние SD=100 m. За двата портала на тунела са определени следните изходни данни:

Табл.2.

$k= L_{th}/L_{20}=0,06$	Северен вход (София)	Южен вход (Благоевград)
$L_{20\text{-}max}$, cd/m^2	2500	3500
$L_{th\text{-}max}=k.L_{20\text{-}max}$, cd/m^2	150	210

2.1. Как обикновено се постъпва?

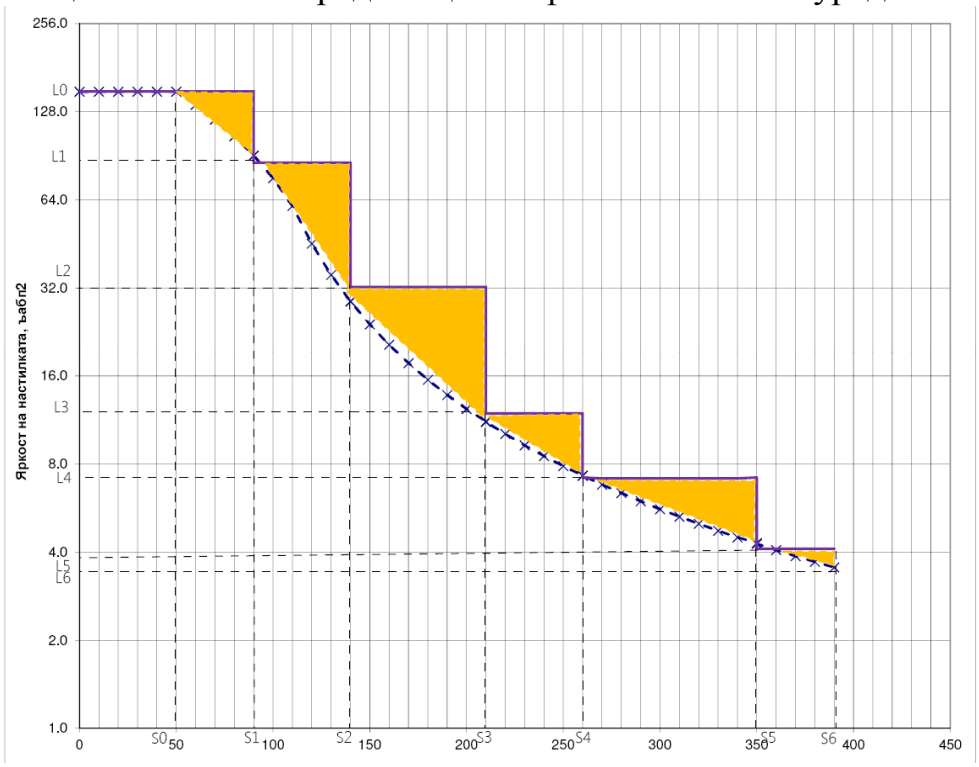
При зададени стъпки на намаляване на яркостта (обикновено 4-6 стойности), стремежът е "начупената линия" на реализираните яркости върху пътното платно „плътно" да следва линията $L_{th2} = L_{th1}[1 - a.(s - SD/2)]$ и кривата

$$L_{tr} = L_{th1}(1.9 + (s - SD/2)/v)^{-1.4}.$$

Плавното следване на тези стойности чрез промяна на разстоянието между осветителите не е удобно и обикновено не се прилага. Ако обаче стъпките се вземат равномерно, уредбата няма да работи достатъчно ефективно, тъй като площта на по-горните триъгълници „тежи" много повече от площта на „по-долните" (графиката от фиг.3 е в логаритмичен мащаб).

2.2. Формулиране на оптимизационната задача

При стъпалното заместване на показаната на фиг.3 плавна крива с начупена (фиг.4) дължината на участъците се определя по критерий минимален преразход на електроенергия, като се изхожда от постановката, че площта на „триъгълниците", получени между начупената и плавната крима, както и разстоянието им от абсцисната ос са определящи за ефективността на уредбата.



Фиг.4. Изходна постановка за формулиране на оптимизационната задача и ограничителните условия за северния портал на тунела

Разглеждат се площите, които над плавната крива с изчислените по (3) и (4) теоретични яркости по протежение на тунелната тръба. Търсят се такива стой-

ности на яркостите и дължините на участъците, че да се получи:

$$\frac{(L_{th1}-L_2)*(s_1-s_0)}{2}+\frac{(L_2-L_3)*(s_2-s_1)}{2}+....+\frac{(L_{n-1}-L_{in})*(s_n-s_{n-1})}{2}=\min, \quad (5)$$

Променливи в задачата са координатите s_1, s_2 …. s_n в метри и яркостите L_2, L_3 … L_{n-1} в cd/m^2. Параметри на задачата са яркостта в началото на входната зона L_{th1}=150 cd/m^2, яркостта на вътрешната зона L_{in}=4 cd/m^2, координатата s_0=SD/2=100/2=50 m на началото на втората половина на входната зона и координатата s_n=SD+180=280 m, където по теоретичната крива попада L_{in}, на началото на вътрешната зона на тунела. Ограничителните условия, които трябва се спазват са:

1) L_i/L_{i+1} <=3; L_{n-1}/L_{in} <=1,5

2) $L_2 >= L_{th1}(1-a.s)$ ако s<=SD и $L_2 >= L_{th1}(1.9+(s-SD/2)/v)^{-1.4}$ ако s>SD

…….

3) $L_{n-1} >= L_{th1}(1-a.s)$ ако s<=SD и $L_{n-1} >= L_{th1}(1.9+(s-SD/2)/v)^{-1.4}$ ако s>SD

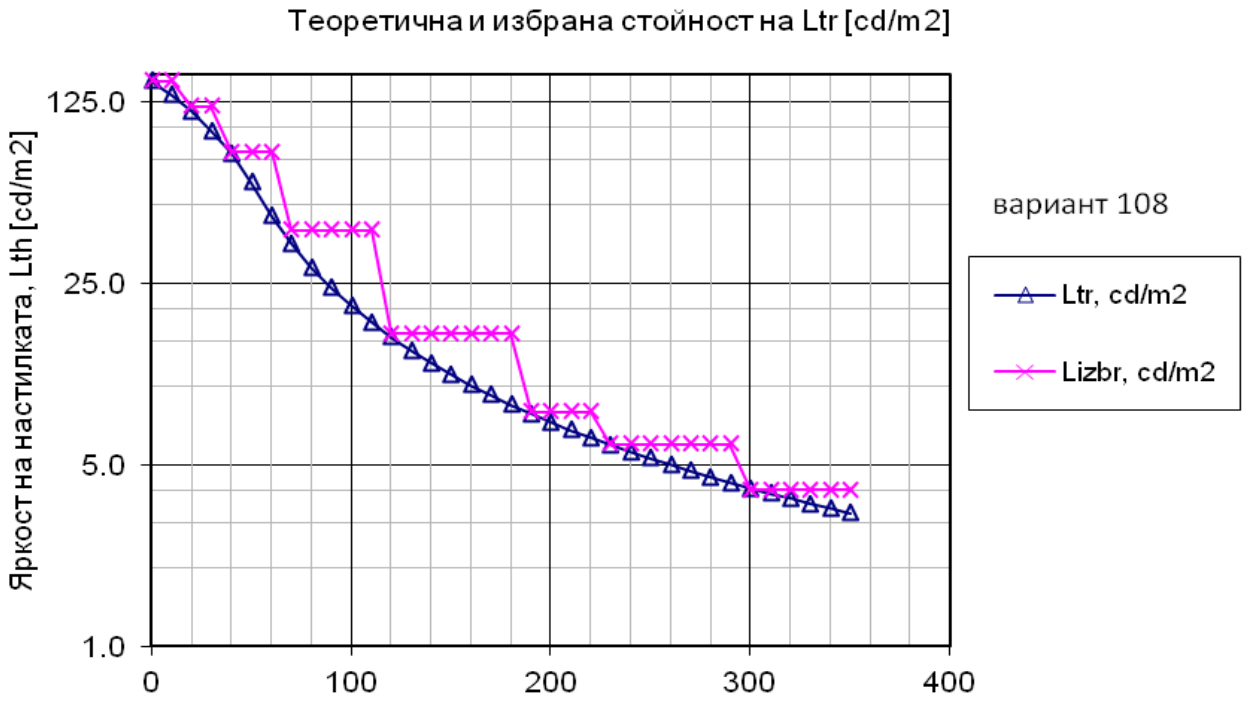
Задачата е решена по метода на изброяване на всички варианти за площите на „триъгълниците“, получени по условията: L_i/L_{i+1} <=1,25; 1,5; 2; 2,5; 3 за първите 5 участъка и L_{n-1}/L_{in}<=1,25;1,5 – за последния участък. Най-доброто решение е показано на фиг.5 и в табл.3.

Табл.3.

s, m	**$L_{tr\ teor}$, cd/m^2**	**$L_{izbrano}$, cd/m^2**	**L_i/L_{i+1}**
0	150,0	150,0	
10	132,2	150,0	
20	114,4	120,0	1,25
30	96,6	120,0	
40	78,8	80,0	1,50
50	61,1	80,0	
60	45,4	80,0	
70	35,5	40,0	2,0
80	28,8	40,0	
90	24,0	40,0	
100	20,5	40,0	
110	17,7	40,0	
120	15,5	16,0	2,5
130	13,8	16,0	
140	12,4	16,0	
150	11,2	16,0	
160	10,1	16,0	
170	9,3	16,0	
180	8,5	16,0	
190	7,9	8,0	2,0
200	7,3	8,0	
210	6,8	8,0	
220	6,4	8,0	
230	6,0	6,0	1,3
240	5,6	6,0	
250	5,3	6,0	

Табл.3. (продължение)

260	5,0	6,0	
270	4,7	6,0	
280	4,5	6,0	



Фиг.5. Най-добър резултат от решаването на задачата

3. Заключение

Задачата би могло да се реши и чрез по-подробно описание в AMPL, Matlab или като се използва Excel-solver. За нуждите на проектирането обаче, и методът на изброяването дава задоволителни резултати тъй като съотношението между яркостите е фиксирано.

Литература

[1] CIE Publication No 26/2(1988). ***Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses***

[2] CEN CK 14380:2003 ***Lighting application - Tunnel Lighting***

[3] БДС 16103-85. ***Осветление на тунели. Технически изисквания***

Автори: инж. Ангел Саракинов Пачаманов, проф. д-р, катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", р-л НИИКЛ "Осветителна техника", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pach@tu-sofia.bg, www.onilot.com*; маг. инж. Петър Иванов Стоев, докторант, катедра "ЕСЕОЕТ", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pstoev@tu-sofia.bg;* инж. Николай Стефанов Матанов, гл. ас. д-р, катедра "ЕСЕОЕТ", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*;

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р З. Иванов

СПЕКТРАЛНА КОРЕКЦИЯ НА ФОТОПРИЕМНИЦИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА АДАПТАЦИОННА ЯРКОСТ НА ПЪТНИ ТУНЕЛИ

Ангел Пачаманов, Дилян Иванов

Резюме: *Измерване на адаптационна яркост L_{20}. Изисквания към спектралната чувствителност на използвания фотоприемник. Относителната спектрална чувствителност на силициев фотоелемент, показатели на поглъщане на оптични цветни стъкла. Съгласуване по V(λ) на фотоприемници чрез филтриране на потока. Изследване съгласуваността по V(λ) на фотоприемник.*

Ключови думи: *съгласуване по V(λ), фотоприемници, фотоелементи*

PHOTOSENSORS SPECTRAL CORRECTION FOR MEASURING UNIT OF L20-LUMINANCE OF ROAD TUNNELS

Angel Pachamanov, Dilyan Ivanov

Abstract: *Measuring the adaptation luminance L20. Requirements for the spectral sensitivity of the photo receiver. Relative spectral sensitivity of silicon photocell, indicators absorption optical colored glasses. Alignment for V (λ) of photo sensors through-flow filtration. Research coordination on V (λ) of the photo receiver.*

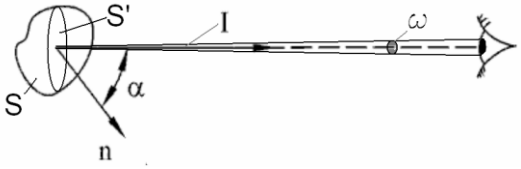
Keywords: *spectral sensitivity, photo sensor, silicon photocell*

1. Въведение

Яркостта е основна величина в осветителната техника, на която е пропорционално зрителното усещане. Дефинира се като повърхностна плътност на интензитета на светлината от светеща повърхност S в посока на наблюдател, разположен на достатъчно голямо разстояние, така че светещата повърхност да може да се приеме за точков излъчвател:

$$L = \frac{I}{S'} = \frac{\Phi/\omega}{S'} \quad , \tag{1}$$

където Φ е светлинният поток, попадащ в отвора на окото на наблюдателя; ω - пространственият ъгъл, под който се вижда отворът на окото от центъра на светещата повърхност S; S’ е площ на проекцията на светещата повърхност в равнина перпендикулярна на посоката на наблюдателя (фиг.1).



Фиг.1. Дефиниране на яркост на светеща повърхност

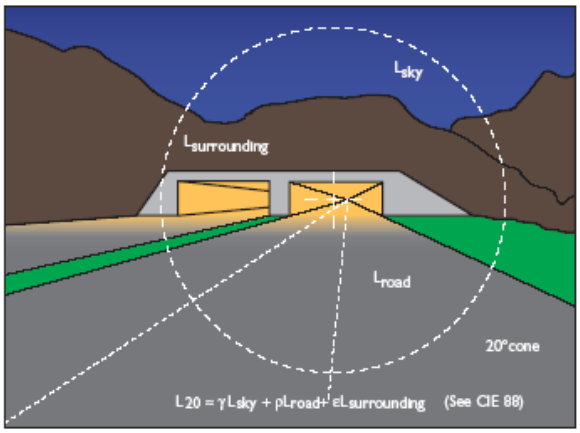
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Зрителното усещане е функция на т.н. фотопичен поток, определен по формулата:

$$\Phi = K_m \int_{380nm}^{780nm} \varphi(\lambda).V(\lambda).d\lambda \text{ [lm]}, \quad (2)$$

където K_m=683 [lm/W] е максималната спектрална светлинна ефективност на дневното човешко зрение, получена за монохроматично излъчване с дължина на вълната λ_m=555 nm (лъчист поток с мощност 1/683 W, излъчен с дължина на вълната λ_m=555 nm съответства на светлинен поток Φ=1 lm); φ(λ) [W/nm] - спектрална плътност на лъчистия поток Фе [W] в диапазона 380-780 nm; V(λ) - функция на относителна спектрална чувствителност на дневното човешко зрение, dλ -елементарен нарастък на дължината на вълната в диапазона 380-780nm. Международната комисия по осветление (CIE) дефинира възможността управлението на тунелното осветление да се извършва по адаптирането на човешкото зрение спрямо начална яркост L_{20} -средната яркост в 20 градусова зона, получена като сечение на конус с връх стоящ на безопасното спирачно разстояние от входа на тунела (фиг.2).



Фиг.2. Зона на приближаване и 20º адаптационно поле за водача на моторно превозно средство

За осъществяване на това управление е необходимо да се измерва яркостта L_{20}, като фотоприемникът на уреда трябва да бъде със спектрална чувствителност s(λ), близка до V(λ) – в противен случай изходният сигнал от уреда няма да е пропорционален на светлинния поток, попаднал върху него (уравнение 2). За целта спектралната чувствителност на фотоприемника се коригира до тази на дневното човешко зрение с филтри от цветни оптични стъкла, чиито коефициенти на пропускане се изчисляват по израза $\tau(\lambda_i) = V(\lambda_i)/(k.s(\lambda_i)$ [5]. Тази корекция винаги е с известно приближение, поради което се въвежда мярка за степен на съгласуване f_1, изчислявана по израза [1]:

$$f_1 = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left| Cs.s_{kor}(\lambda) - V(\lambda) \right| .d\lambda \Big/ \int_{380nm}^{780nm} V(\lambda).d\lambda \quad (3)$$

Тук Cs е константа, която се определя по известните спектрална плътност на излъчване $\varphi_A(\lambda)$ на стандартен източник тип „А“, относителната спектрална чувствителност $s_{kor}(\lambda)$ (от λ_{min} до λ_{max}) на коригирания фотоприемник и относителната спектрална чувствителност на дневното човешко зрение V(λ):

$$Cs = \int_{380nm}^{780nm} \varphi_A(\lambda).V(\lambda).d\lambda \Big/ \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi_A(\lambda).s_{kor}(\lambda).d\lambda \qquad (4)$$

Мярката f_1 е еднозначно определена от относителната спектрална чувствителност $s_{kor}(\lambda)$ на фотоприемника и дава в относителни единици колко близо до относителната спектрална чувствителност на човешкото око $V(\lambda)$ е относителната спектрална чувствителност $s_{kor}(\lambda)$ на коригирания фотоприемник. В зависимост от стойността на f_1 фотоприемниците се класифицират по степен на съгласуваност спрямо $V(\lambda)$ съгласно табл.1 [1].

Табл.1.

Степен на съгласуваност по Vmes(λ)

Клас	Степен на съгласуваност по Vmes(λ)	Мярка f1, %
1	Много фино съгласуване	<2
2	Добро съгласуване	2<f1≤6
3	Грубо съгласуване	6<f1≤12
4	Много грубо съгласуване	12<f1≤18

Поради недостатъчно точната корекция, показанията на уреда, с който се измерва яркостта, трябва да се разделят с коригираща константа "a", изчислена като отношение на интегралните чувствителност на фотоприемника за двете лъчения – $\varphi_Z(\lambda)$, за което се изчислява константата и $\varphi_A(\lambda)$ на стандартен източник "A", с който е калибриран фотоприемника. Константата се бележи с $a_{(Z)}$ и индексът в скобите показва за какъв светлинен източник се отнася [1]:

$$a(Z) = \frac{S_z}{S_A} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi_Z(\lambda).s_{rel}(\lambda).d\lambda \Big/ \int_{380nm}^{780nm} \varphi_Z(\lambda).V(\lambda).d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi_A(\lambda).s_{rel}(\lambda).d\lambda \Big/ \int_{380nm}^{780nm} \varphi_A(\lambda).V(\lambda).d\lambda} = Cs.\frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi_Z(\lambda).s_{rel}(\lambda).d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} \varphi_Z(\lambda).V(\lambda).d\lambda} \qquad (5)$$

Например, действителната осветеност $E_{(D65)}$ от дневна светлина с цветна температура 6500K е:

$$E_{(D65)} = X_{\text{отчетено}}/a_{(D65)} \qquad (6)$$

Тъй като дневната светлина се променя от 15000K до 4000K от изгрев до залез, очевидно е, че за коригирания фотоприемник ще са необходими няколко коригиращи константи, които ще се използват в различни части на деня.

2. Изчисляване на филтри за спектрална корекция

Методиката за съгласуване по $V(\lambda)$ на фотоприемници е подробно описана в [5]. Реализираните филтри са получени на две стъпки, за които са формулирани и решени две оптимизационни задачи :

1) пълно филтриране на потока: търси се набор от цветни стъкла с еднаква площ и различна дебелина, така че сумата от квадратите на разликите между изчислените стойности за филтъра $\tau_{et1}(\lambda_i)$ и коефициентите на пропускане на поставените едно зад друго цветни стъкла $\tau_{x1}(\lambda_i)$ да бъде минимална;

2) филтриране по части: търси се набор от поставени един до друг сегменти от цветни стъкла с различна площ и дебелина, така че сумата от квадратите на разликите между изчислените стойности $\tau_{et2}(\lambda_i)$ и получените коефициенти на пропускане $\tau_{x2}(\lambda_i)$ на набора стъкла да бъде минимална.
Получените набори от цветни оптични стъкла са дадени в табл.2.

Табл.2.

Резултати от решаване на оптимизационните задачи за съгласуване на фотоприемника чрез пълно и частично филтриране на потока

I. Пълно филтриране		**Частично по Dresler**		
Цвят стъкло	Слой в mm	Цвят стъкло	Площ в mm2	Слой в mm
dR =	0,0	A =	900	
dO =	0,9	R =	0	0,0
dY =	0,0	O =	210	1,8
dYG =	0,0	Y =	0	0,0
dG =	5,0	YG =	230	0,2
dB =	0,0	G =	460	1,7
		B =	0	0,0
Мярка f'1%= 15,80		Мярка f'1%= 8,23		

Стъпка I: пълно филтриране

Пълното филтриране представлява метод за корекция на спектралната чувствителност на фотоприемник [4], при който чрез един или няколко слоя цветни стъкла с дебелини, определени от ограничително условие за допустимо минимално пропускане $\tau_{x1}(k)$ на получения филтър се реализират коефициенти на пропускане $\tau_{x1}(i)$. Спектралната характеристика на стъклата се изразява с оптическата плътност $D(\lambda_i) = \lg[1/\tau(\lambda_I)] = -\lg\tau(\lambda_I)$, съответно с показателя на поглъщане $a(\lambda_i) = D(\lambda_i)/t$, където t е дебелината на слоя стъкло в mm, $\tau(\lambda_i)$ - коефициентът на пропускане за съответната дължина на вълната.

Стъпка II: филтриране по части

По-прецизно по-нататъшно филтриране е направено по модификация на принципа на Дреслер [3]. При голямото разнообразие на цветни стъкла и възможността те да се поръчват по зададени размери и дебелини, принципът на Дреслер е приложен по следния начин: приема се, че общата площ на фотоелемента A е покрита с до 6 типа цветни стъкла с известни десетични показатели на поглъщане $a_r(\lambda)$, $a_{or}(\lambda)$, $a_y(\lambda)$,$a_{yg}(\lambda)$, $a_{gr}(\lambda)$, $a_{bl}(\lambda)$, всяко с дебелина dx и площ A_x, така че $A=A_r+A_{or}+A_y+A_{yg}+A_{gr}+A_{bl}$. Дебелина dx=0, както и площ $A_x=0$ на някое от стъклата показва отсъствието му като компонент в търсения филтър. Вместо един фотоелемент с голяма площ и различни частични филтри се използват 3 фотоелемента с три цветни стъкла с различен цвят и дебелина.

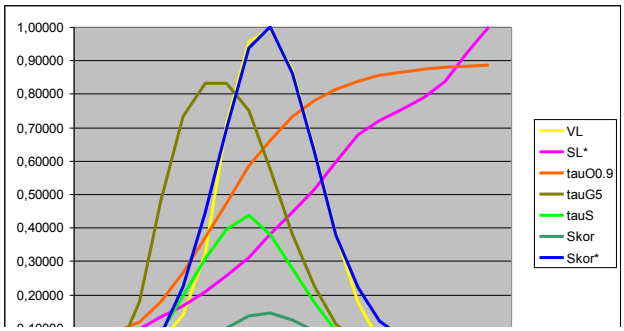
Табл.3.

Получаване на спектралната чувствителност $s_{kor1}(\lambda)$ на фотоприемника, окомплектован с филтър, резултат от пълното филтруване на потока

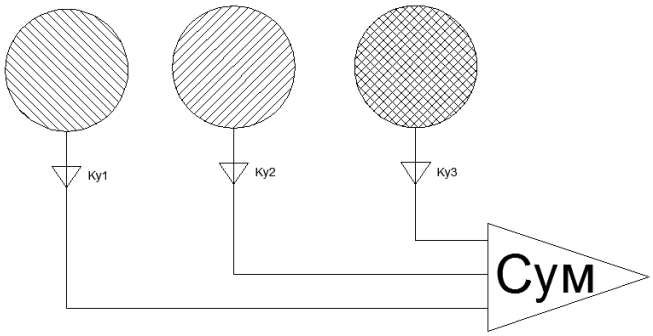
				1,0 mm	0,9mm		1,0mm	5 mm			
	VL	**SL***	**a_O**	**tauO1**	**tauO0.9**	**a_G**	**tauG1**	**tauG5**	**tauS1**	**Skor1**	**Skor1***
380	0,00004	0,049	1,150	0,0708	0,0923	2,000	0,0100	0,0000	0,00003	4,5E-13	3,1E-12
400	0,00040	0,057	1,160	0,0692	0,0904	0,640	0,2291	0,0006	0,00150	3,3E-06	0,00002

Табл.3. (продължение)

420	0,00400	0,079	1,160	0,0692	0,0904	0,320	0,4786	0,0251	0,00227	0,00018	0,00124
440	0,02300	0,097	1,030	0,0933	0,1183	0,150	0,7079	0,1778	0,02104	0,00204	0,01414
460	0,06000	0,131	0,830	0,1479	0,1791	0,064	0,8630	0,4786	0,08570	0,01125	0,07778
480	0,13900	0,166	0,640	0,2291	0,2655	0,027	0,9397	0,7328	0,19454	0,03238	0,22396
500	0,32300	0,209	0,480	0,3311	0,3698	0,016	0,9638	0,8318	0,30761	0,06429	0,44461
520	0,71000	0,255	0,360	0,4365	0,4742	0,016	0,9638	0,8318	0,39446	0,10065	0,69611
540	0,95400	0,310	0,260	0,5495	0,5834	0,025	0,9441	0,7499	0,43752	0,13556	0,93755
560	0,99500	0,380	0,200	0,6310	0,6607	0,048	0,8954	0,5754	0,38019	0,14459	1,00000
580	0,87000	0,447	0,150	0,7079	0,7328	0,084	0,8241	0,3802	0,27861	0,12458	0,86160
600	0,63100	0,516	0,120	0,7586	0,7798	0,130	0,7413	0,2239	0,17458	0,09015	0,62351
620	0,38100	0,595	0,100	0,7943	0,8128	0,190	0,6457	0,1122	0,09120	0,05430	0,37554
640	0,17500	0,678	0,085	0,8222	0,8385	0,250	0,5623	0,0562	0,04715	0,03197	0,22110
660	0,06100	0,721	0,075	0,8414	0,8561	0,310	0,4898	0,0282	0,02413	0,01738	0,12023
680	0,01700	0,753	0,070	0,8511	0,8650	0,360	0,4365	0,0158	0,01371	0,01033	0,07142
700	0,00410	0,790	0,066	0,8590	0,8722	0,400	0,3981	0,0100	0,00872	0,00689	0,04764
720	0,00105	0,838	0,062	0,8670	0,8794	0,450	0,3548	0,0056	0,00495	0,00415	0,02868
740	0,00025	0,923	0,060	0,8710	0,8831	0,500	0,3162	0,0032	0,00279	0,00258	0,01783
760	0,00001	1,000	0,058	0,8750	0,8867	0,550	0,2818	0,0018	0,00158	0,00158	0,01091



Фиг.3. Резултати от пълното филтриране: f'1%=100*sum (abs(Cs.SL-Vmes))/ sum (Vmes)=15,80 (Orange OC5 стр.105; Green ЗС8 стр.81 Каталог руски стъкла 1990)



Фиг.4. Метод за коригиране по V(λ) на уред чрез три фотоелемента и усилватели с коефициенти на усилване, съответстващи на изчислените площи на трите цветни стъкла

В случая отпада необходимостта от фотоелемент с голяма площ, тъй като сигналите от усилвателите на всеки фотоелемент се усилват пропорционално на площта на филтъра и след това се сумират (фиг.4).

Изчисляването и настройването на тази конструкция става по следния начин: първо се изчислява дебелината и площта на всеки от цветните филтри, така както се прави при един фотоелемент с голяма площ. След това се изчисляват коефициенти на усилване, съответстващи на получените площи.

Така се постига съотношение на сигналите, съответстващи на площите на отделните филтри при класическия метод на Дреслер.

След сумиране на трите сигнала се получава сигнал, пропорционален на сигнала, който би се получил от конструкцията на единичен фотоелемент. Предимството тук е, че пред всеки фотоелемент се поставя само едно стъкло с определена дебелина [5].

Табл.4.

Получаване на спектралната чувствителност $s_{kor2}(\lambda)$ на фотоприемника, чрез филтри, резултат от пълно и частично филтруване на потока

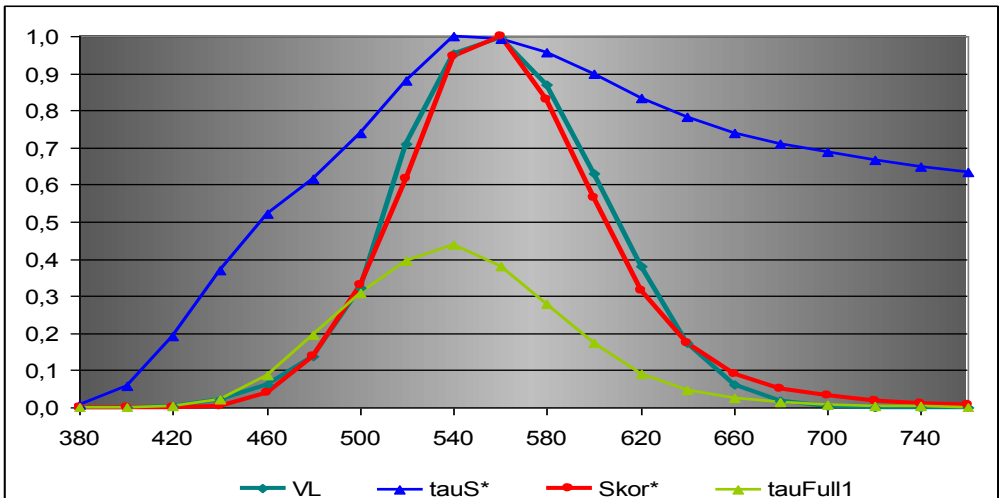
	Слой, mm	1,80 mm		0,20 mm		1,70 mm				
nm	**a_O**	**tauO**	**a_YG**	**tauYG**	**a_G**	**tauG**	**SL***	**tauS***	**Skor**	**Skor2***
380	1,150	0,0085	10,000	0,0100	2,000	0,0004	0,00001	0,00608	0,000	5,1E-08
400	1,160	0,0082	10,000	0,0100	0,640	0,0817	0,00059	0,05916	0,000	3,5E-05
420	1,160	0,0082	10,000	0,0100	0,320	0,2858	0,00124	0,19276	0,000	0,0002
440	1,030	0,0140	10,000	0,0100	0,150	0,5559	0,01414	0,37133	0,005	0,0053
460	0,830	0,0321	10,000	0,0100	0,064	0,7784	0,07778	0,52236	0,041	0,0409
480	0,640	0,0705	9,000	0,0158	0,027	0,8997	0,22396	0,61516	0,138	0,1388
500	0,480	0,1368	3,000	0,2512	0,016	0,9393	0,44461	0,73791	0,328	0,3305
520	0,360	0,2249	1,100	0,6026	0,016	0,9393	0,69611	0,87924	0,612	0,6165
540	0,260	0,3404	0,155	0,9311	0,025	0,9068	0,93755	1,00000	0,938	0,9444
560	0,200	0,4365	0,050	0,9772	0,048	0,8287	1,00000	0,99271	0,993	1,0000
580	0,150	0,5370	0,021	0,9904	0,084	0,7198	0,86160	0,95575	0,823	0,8295
600	0,120	0,6081	0,015	0,9931	0,130	0,6012	0,62351	0,90026	0,561	0,5654
620	0,100	0,6607	0,015	0,9931	0,190	0,4753	0,37554	0,83360	0,313	0,3153
640	0,085	0,7031	0,015	0,9931	0,250	0,3758	0,22110	0,78113	0,173	0,1740
660	0,075	0,7328	0,015	0,9931	0,310	0,2972	0,12023	0,73853	0,089	0,0894
680	0,070	0,7482	0,015	0,9931	0,360	0,2443	0,07142	0,70854	0,051	0,0510
700	0,066	0,7607	0,015	0,9931	0,400	0,2089	0,04764	0,68909	0,033	0,0331
720	0,062	0,7734	0,017	0,9922	0,450	0,1718	0,02868	0,66829	0,019	0,0193
740	0,060	0,7798	0,019	0,9913	0,500	0,1413	0,01783	0,64992	0,012	0,0117
760	0,058	0,7863	0,021	0,9904	0,550	0,1161	0,01091	0,63513	0,007	0,0070

Фотоелемент с площ 900 мм^2 = 210 мм^2 + 230 мм^2 + 460 мм^2 (Orange 1,8мм ОС5 стр.105; Yellow-Green 0,2мм ЖЗС18 стр.95; Green 1,7мм ЗС8 стр.81 Каталог руски стъкла 1990)

f'1%=100*sum (abs(Cs.SL-Vmes))/sum(Vmes) = 8,23

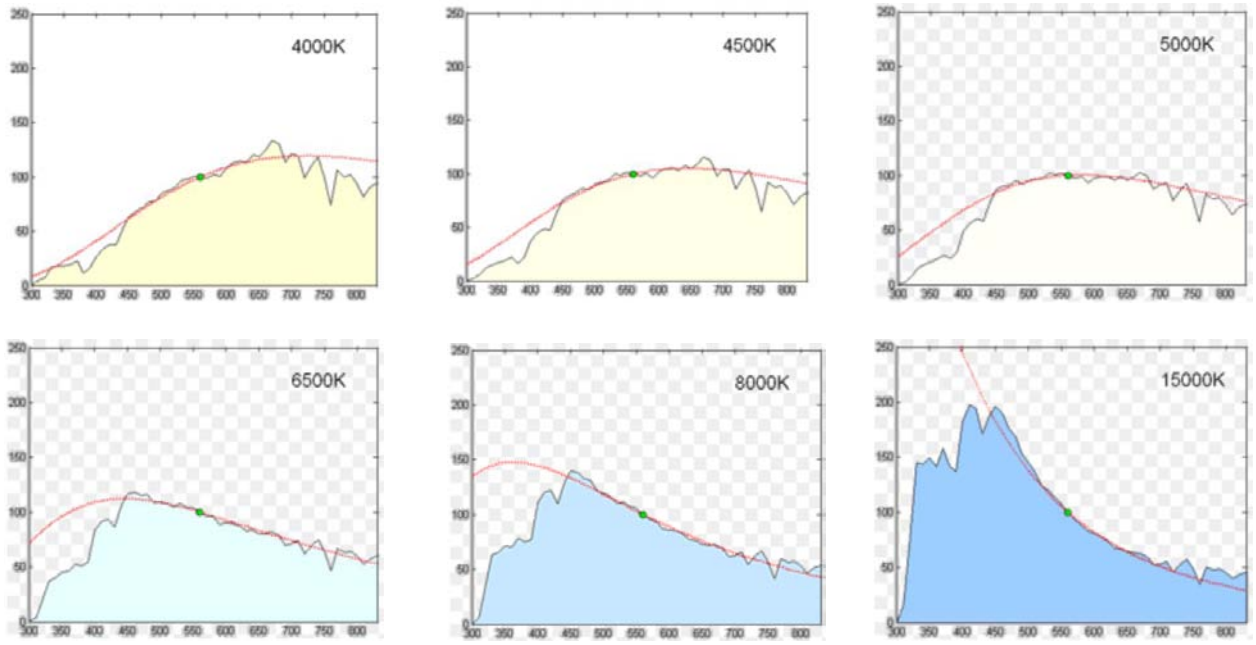
Съответстващи коефициенти на усилване на усилвателите към трите фотоелемента, заменящи фотоелемента с площ 900 мм^2:

За „оранжевия филтър с дебелина на стъклото 1,8 мм“ KU_O = 100*210/900 = 23
За „жълто-зеления филтър с дебелина на стъклото 0,2 мм“ KU_YG = 100*230/900 = 26
За „зеления филтър с дебелина на стъклото 1,7 мм“ KU_G = 100*460/900 = 51



Фиг.5. Частично филтриране по табл.4

3. Оценка на точността на спектралната корекция



Фиг.6. Спектри на дневна светлина с различна цветна температура по CIE [7], за които са изчислени коригиращи константи към уред, калибриран с източник А

Табл.5.

Спектрална плътност на излъчванията за 1 W лъчист поток

nm	D4000K	D4500K	D5000K	D6500K	D8000K	D15000K
380	0,007	0,010	0,015	0,029	0,041	0,066
400	0,015	0,022	0,029	0,047	0,059	0,082
420	0,022	0,029	0,036	0,054	0,066	0,089
440	0,030	0,037	0,043	0,060	0,073	0,091
460	0,039	0,047	0,054	0,068	0,074	0,088
480	0,044	0,051	0,057	0,067	0,071	0,078
500	0,049	0,054	0,057	0,063	0,065	0,067
520	0,052	0,056	0,058	0,060	0,060	0,058
540	0,056	0,059	0,060	0,060	0,059	0,052
560	0,058	0,059	0,060	0,057	0,054	0,046
580	0,058	0,060	0,059	0,055	0,051	0,041
600	0,062	0,060	0,058	0,052	0,047	0,037
620	0,066	0,063	0,059	0,051	0,045	0,034
640	0,069	0,064	0,059	0,048	0,042	0,031
660	0,072	0,065	0,059	0,046	0,039	0,029
680	0,075	0,066	0,059	0,045	0,038	0,028
700	0,069	0,061	0,055	0,041	0,034	0,025
720	0,058	0,051	0,047	0,036	0,030	0,022
740	0,053	0,047	0,041	0,033	0,027	0,020
760	0,044	0,040	0,036	0,028	0,023	0,017
SUM=….. W	**1,000**	**1,000**	**1,000**	**1,000**	**1,000**	**1,000**

Табл.6.

Числено решаване на израз (5) за D4000K

nm	Skor(VL)	fiA	V(L)	fiA*V(L)	fia*Scor	FI-D4000*Scor(L)	FI-D4000*V(L)
380	0,0000	9,79	0,00004	0,00039	0,00000	3,7E-10	2,9E-07
400	0,0000	14,71	0,00040	0,00588	0,00052	5,5E-07	6,2E-06
420	0,0002	21,00	0,00400	0,0840	0,0051	0,00001	0,00009
440	0,0053	28,70	0,02300	0,6601	0,1518	0,00016	0,00068
460	0,0409	37,81	0,06000	2,2686	1,5475	0,00161	0,00236

Табл.6. (продължение)

480	0,1388	48,25	0,13900	6,7068	6,6963	0,00614	0,00615
500	0,3305	59,86	0,32300	19,3348	19,7833	0,01605	0,01568
520	0,6165	72,50	0,71000	51,4750	44,6988	0,03218	0,03705
540	0,9444	85,95	0,95400	81,9963	81,1741	0,05324	0,05378
560	1,0000	100,00	0,99500	99,5000	100,0000	0,05797	0,05768
580	0,8295	114,40	0,87000	99,5280	94,8966	0,04851	0,05088
600	0,5654	129,00	0,63100	81,3990	72,9421	0,03516	0,03924
620	0,3153	143,60	0,38100	54,7116	45,2833	0,02079	0,02512
640	0,1740	158,00	0,17500	27,6500	27,4883	0,01200	0,01207
660	0,0894	172,00	0,06100	10,4920	15,3844	0,00644	0,00439
680	0,0510	185,40	0,01700	3,1518	9,4514	0,00381	0,00127
700	0,0331	198,30	0,00410	0,8130	6,5576	0,00229	0,00028
720	0,0193	210,40	0,00105	0,2209	4,0615	0,00112	0,00006
740	0,0117	221,70	0,00025	0,0554	2,5886	0,00062	0,00001
760	0,0070	232,10	0,00001	0,0023	1,6194	0,00031	0,00000
				540,0559	534,3309	0,29841	0,30681
					Cs= 1,0107	**a(D4000) =**	**0,9830**

Корекционни коефициенти при пълно филтриране

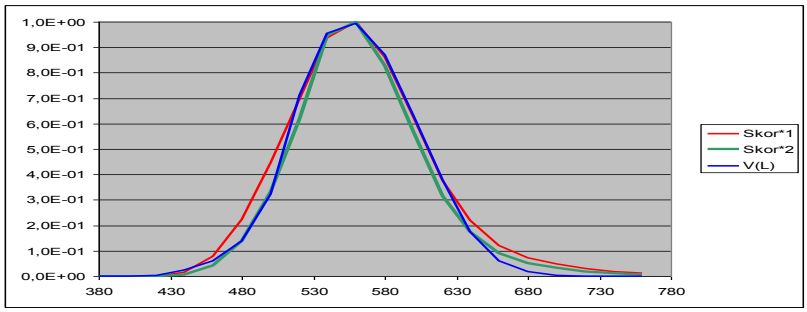
Cs=0,9067 f'1%=100*sum(abs(Cs'.SL-Vmes))/sum(Vmes)= 15,80

a(D4000) =	a(D5000) =	a(D6500) =	a(D8000) =	a(D15000) =
0,9804	0,9751	0,9730	0,9730	0,9774

Корекционни коефициенти при пълно + частично филтриране

Cs=1,0107 f'1%=100*sum(abs(Cs'.SL-Vmes))/sum(Vmes)=8,23

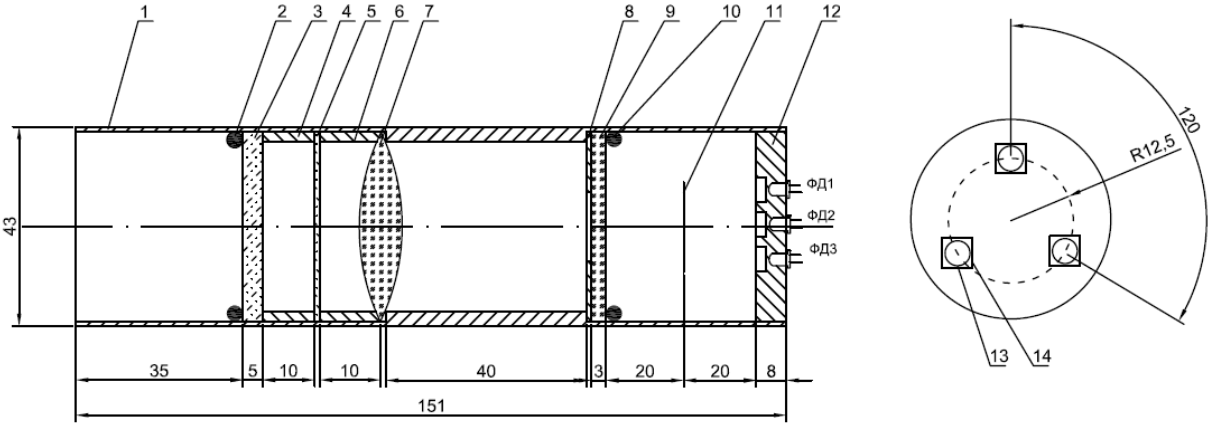
a(D4000) =	a(D5000) =	a(D6500) =	a(D8000) =	a(D15000) =
0,9830	0,9769	0,9716	0,9686	0,9635



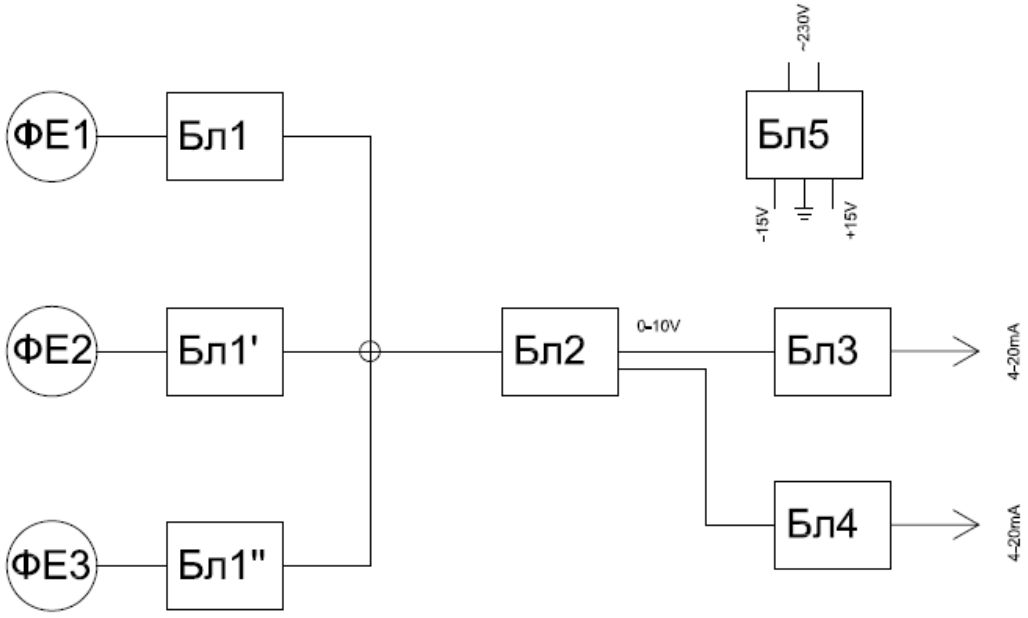
Фиг.7. Спектрална корекция при пълно и пълно+частично филтриране на потока към фотоприемника

Уредът (фиг.8, фиг.9) за измерване на адаптационна яркост се състои от тубус (1), в който посредством зегерка (2) е закрепен зеленият филтър тип ЗС8 (3). Последният, с дебелина 5 мм и оранжевият, с дебелина 1мм (5), са разделени посредством дистанционна втулка (4) - 10 мм. Подобна втулка е поставена и между оранжевия филтър и лещата (7). На фокусното разстояние 33-40 мм е монтирана бленда ф15мм с дебелина 0,5мм (8) за ограничаване на полето на измерване. Образът се проектира на матиран разсейващ материал (9) с дебелина 3 мм, закрепен неподвижно с зегерка (10). В задната камера, оцветена в бяло с

бариев сулфат, е поставен екран с диаметър 30 мм, за да предотврати директно попадане на поток от разсейвателя (9) към 3-те фотоелемента на задната стена (12). Фотоелементите тип BPV11 (13) са подредени на окръжност с диаметър 25мм на 120° един от друг. Пред всеки фотоелемент е поставен цветният филтър от частичното филтриране (14).



Фиг.8. Уред за измерване на адаптационна яркост (оптична част)



Фиг.9. Блок схема на уред за измерване на адаптационна яркост: Фе1, Фе2, Фе3 - фотоелементи тип BPV11; Бл1, Бл1‘, Бл1‘‘- преобразуватели фототок- напрежение; Бл2 - суматор на сигналите; Бл3- преобразувател напрежение-ток; Бл4- преобразувател напрежение-ток за корекция по температура на уреда; Бл5- захранващ блок ±15V

4. Заключение

Изчислени са филтри за спектрална корекция за уред за измерване на адаптационна яркост по методите на пълно и частично филтриране на лъчистия поток от обекта на измерване. Първият филтър се поставя пред оптичната система на уреда и се състои от две оптични стъкла (зелено ЗС8 и оранжево ОС5, съответно с дебелини 5мм и 0,9 мм). Частичното филтриране на трите фотоелемента се извършва с три стъкла: оранжево ОС5 с дебелина 1,8 мм; жълто-зелено

ЖЗС18 с дебелина 0,2 мм и зелено ЗС8 с дебелина 1,7 мм. Коефициентите на усилване на фотоусилвателите към трите фотоелемента са получени съответно 23/26/51. Мярката f_1 при пълно филтриране е 15,80%, а при комбинирано филтриране (пълно+частично) 8,23%.

Изчислените корекционни коефициенти за дневна светлина с различна цветна температура са близки до единица, което показва, че дори и без да се вземат предвид уредът остава в изисквания клас на неопределеност 3%. При подходящо пълно филтриране на потока може да се мине и без частичното филтриране, което е видно от получените коригиращи коефициенти.

Литература

[1] CIE 023/E:2012. ***Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters***

[2] Пачаманов А., ***Ръководство за лабораторни упражнения по фотометрия и осветителни уредби***, 2006, Авангард-Прима, София

[3] *http://www.freepatentsonline.com/2086791.html*, Albert Dresler, ***Composite filter for photoelectric cells.*** United States Patent No.2086791/13.07.1937; Germany Patent No.698359/16.11.1933

[4] Пачаманов А. ***Изчисляване на филтри за спектрална корекция на фотоприемници, използвани във физическата фотометрия.*** Известия на ВМЕИ „В.И. Ленин“, т.43, кн.9, 1988

[5] Пачаманов А., Д. Пачаманова. ***Оптимизационни модели за спектрална корекция на фотоприемници чрез пълно и частично филтриране на потока.*** IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, Созопол

[6] *http://optdesign.narod.ru/book/katalog_tsvetnyh_stekol.pdf*, ***Цветное оптическое стекло и особые стекла***. Каталог. Москва, 1990

[7] *http://en.wikipedia.org/wiki/File:CIE_illuminants_D_and_blackbody_small.gif*

Автори: инж. Ангел Саракинов Пачаманов, проф. д-р, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, р-л НИИКЛ “Осветителна техника”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pach@tu-sofia.bg, www.onilot.com*; маг. инж. Дилян Димитров Иванов, докторант, в катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *dilyanivanov@tu-sofia.bg*

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

БЪРЗА СИНХРОНИЗАЦИЯ НА ГЕНЕРАТОРИ В МАЛКИ ВЕЦ – ПРОЦЕСИ

Ангел Цолов, Даниел Добрилов

Резюме: *В настоящата разработка се предлага обосновка и изследване на един нетрадиционен подход за синхронизация на малки синхронни генератори. След определен момент от започване на процеса, регулирането на честотата на въртене на синхронния агрегат се осъществява, чрез регулатора на възбуждане, предвид голямата разлика във времеконстантите на турбинния регулатор от една страна и възбудителна система от друга. Целта е да се намали времето за влизане в паралел на синхронния генератор.*

Ключови думи: *синхронизация, честота на въртене, регулиране на възбуждане*

FAST GENERATORS SYNCHRONIZATION IN SMALL HYDRO POWER PLANTS – PROCESESS

Angel Tzolov, Daniel Dobrilov

Abstract: *The present paper explores an unconventional approach to synchronization, in which at some point before the end of the process, regulating the speed of the synchronous group occurs through excitation. The idea is based on a large difference in the time constant of the turbine governor and oil discharge system on the one hand and that of the excitation system, resulting in less time for entry of the parallel synchronous generator.*

Keywords*: synchronization, speed, adjusting the excitation*

1. Въведение

На този етап на технико-икономическо развитие у нас, водноелектрическите централи са единственият реален възобновяем, конкурентноспособен източник на електрическа енергия. Предвид факта, че по-голяма част от местата у нас, на които могат да бъдат изградени големи и средни ВЕЦ (при реални условия), са оползотворени, остава отворен въпроса за създаването на малки и мини ВЕЦ. Тези централи са изключително перспективни, защото инвестицията за тях се изплаща за няколко години, като имат изключително дълъг експлоатационен живот (в някой случай над един век). Може да се приеме, че нямат негативно влияние за околната среда. Строят се предимно в планински и полупланински райони (не заемат обработваеми земеделски земи). Участват при децентрализираното производство на електроенергия, като в зависимост от типа им спомагат

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

ISSN 1311-0829

и за регулиране на товаровия график (за разлика от ВяЕЦ и ФЕЦ). Цената на произведената от тях електроенергия е относително реална и конкурентно способна.

МВЕЦ са маневрени и понякога се включват в паралел по няколко пъти на ден. При използване на синхронни генератори, поради различни причини, влизането в паралел с ЕЕС не всеки път е успешно. Това изисква се повторение на пусковия процес, което е загуба на време и средства.

В настоящата статия ще бъде разгледан нетрадиционен метод за бърза синхронизация на малки синхронни генератори.

2. Процеси преди влизане в паралел

За да може да бъде извършена точна синхронизация трябва да бъдат спазени следните условия: напрежението на генератора и мрежата да са приблизително равни по модул; честотата на генератора и на мрежата също да са приблизително равни; в момента на включване на прекъсвача напрежението на генератора да е във фаза с това на мрежата мрежат; посоките на въртене на полето да са еднакви [3].

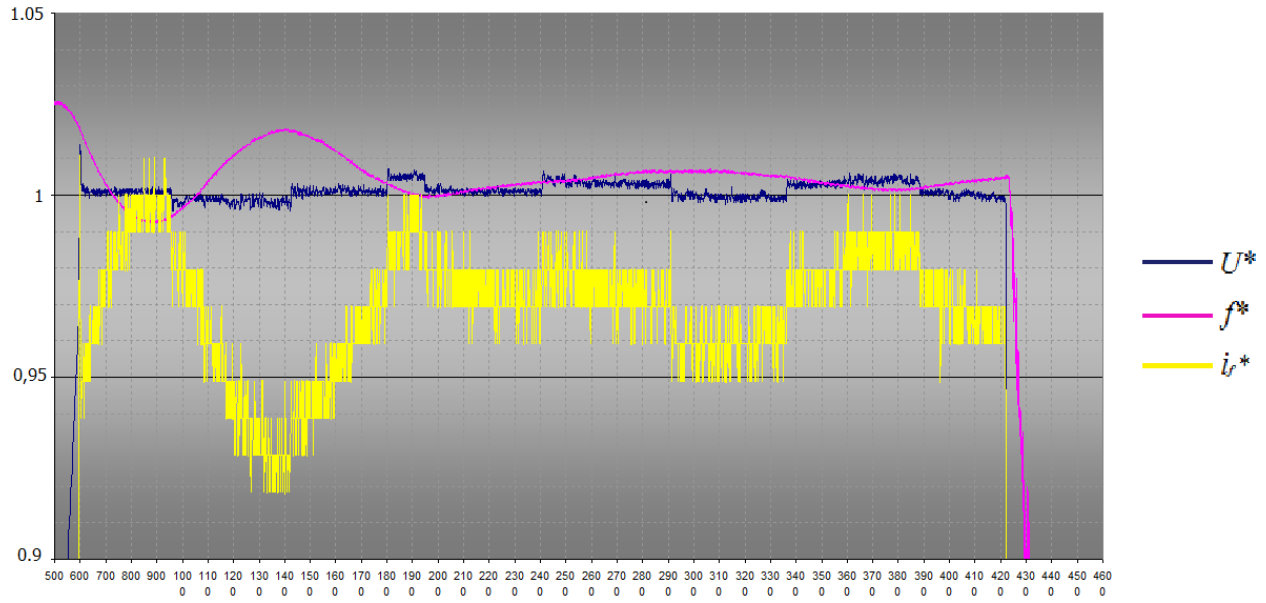
В процеса на развъртане и синхронизиране работят два регулатора:

- Система за възбуждане, с която се регулира напрежението на празен ход.
- Система за управление на подаваната механична мощност, с която се регулира честотата на въртене на синхронния агрегат.

В процеса на автоматична точна синхронизация възбудителната система трябва да изравни амплитудите на векторите в допустими граници, а регулатора на честота на въртене трябва да поддържа необходимата разлика в честотите на напрежението на системата и на генератора, т.е. необходимото „хлъзгане“.

Проблеми: За генератори с малка мощност (до 5MVA) при този процес независимото действие на двата регулатора води до известни проблеми. Реално има опасност процеса на синхронизация да се удължи и синхронният генератор да не влезе в паралел с ЕЕС за определеното от нормативните документи време.
В процеса на синхронизация действието на единия регулатор е смущаващо въздействие за другата система за регулиране. При астатично регулиране на честотата на въртене, увеличаването на оборотите води до леко покачване на напрежението. Това от своя страна ще доведе до реакция на регулатора на възбуждане с цел да се регулира напрежението. На фиг. 1.1 е разгледан запис на реален процес, който нагледно илюстрира ситуацията.

При повишаване механичната мощност при празен ход (в резултат от действието на регулатора на честота на въртене) се повишава и честотата на напрежението на синхронната машина, като се повишава и амплитудата на напрежението на изхода на генератора.



Фиг.1. Запис напрежението, честотата и възбудителния ток на СГ 1.3MVA, в процес на синхронизация

Регулаторът на генераторното напрежение от своя страна се стреми да компенсира това изменение, като намалява възбудителния ток на генератора. Като вторичен резултат се увеличават допълнително оборотите, а това води до ново действие в противоположна посока на регулатора на честота на въртене. Поради голямата разлика между механичната (T_J) и електрическата (T_{d0}) времеконстанти на агрегата се стига до колебателен процес, който затихва много бавно. В повечето случай се появяват и допълнителни смущаващи въздействия (различни начални условия за налягането (напора), работеща друга машина на общата шина или на същия напорен тръбопровод), които в общия случай също затрудняват синхронизацията.

Възможно решение на проблема: В режим на празен ход на СГ, за съпротивителния момент на турбината оказват влияние само механичните загуби при въртенето от една страна и от друга - напрегнатостта на магнитното поле във въздушната междина между статора и ротора, породена от възбудителния ток. Като цяло механичните загуби са пренебрежимо малко, а и влиянието върху тях е практически невъзможно. За сметка на това възбудителния ток е напълно управляем в относително широки граници. Можем да представим възбудителната намотка и протичащия в нея ток като един неподвижен постоянен магнит, който се стреми да се придвижи към стоманата на статора. В тази ситуация колкото е по-голям възбудителния ток, толкова по-голяма става силата на привличане. От тук следва и че по-големият възбудителния ток, изисква по-голям момент за въртенето на ротора и обратното.

Съгласно [1], изменението на въртящия момент на вала на синхронната машина, обусловено от възбудителния ток (респективно напрежение) е равен на:

$$\Delta M_f = Re\left(U.sin\theta_0 \frac{G_d(j\omega)}{x_d(j\omega)}.\Delta U_{fd} + U.sin\theta_0 \frac{G_q(j\omega)}{x_q(j\omega)}.\Delta U_{fq} \right), (1)$$

където:

$G_d\ (j\omega)$ – комплексна проводимост по надлъжната ос

$G_q\ (j\omega)$ – комплексна проводимост по напречната ос

Отчитайки големите разлики между времеконстантите T_J и T_{d0} в процеса на синхронизация може да бъде използван възбудителния ток като средство за изменение в малки граници на оборотите на синхронния агрегат (СА), респективно на хлъзгането между напреженията на генератора и мрежата. Да приемем, че СА се развърти чрез турбината до обороти близки до номиналните и управляващият сигнал на регулатора на честота от турбинния регулатор се задържи временно на постоянна стойност. В такъв случай с малки изменения на възбудителния ток може да се контролира дефазирането между векторите на напреженията (напрежението на биене). Малката времеконстанта T_{d0} и бързодействието на регулатора на възбуждане, особено при статични възбудителни системи, гарантират много по-лесно поддържане на постоянно хлъзгане с необходимата за конкретния режим стойност, а по този начин и по-бързо влизане в паралел.

3. Физическо моделиране и изследване

Предложението за решаване на проблема на синхронизацията може да се моделира с цифров симулатор с въведен софтуер, който дава нагледа представа за идеализирания процес.

За да бъде изследването пълно то се извършва и на физически стенд с вграден регистратор, който записва всички параметри на реалния процес.

Стендът представлява постояннотокова машина (ПТМ) в двигателен режим. Куплирана със синхронен генератор (СГ), ПТМ изпълнява ролята на турбина. Респективно въртящият момент на постоянно токовия двигател се интерпретира като въртящ момент на турбината $M_т$. Управлението на машините се извършва от цифрова система за автоматично управление (САУ). Регулирането във всички режими става чрез въздействие върху възбудителните системи на машините и върху котвения ток на ПТМ. Въртящият момент $M_т$ се контролира чрез възбудителния ток и тока на котвата на ПТМ. В модела са включени бутони и ключове за управление, както и многофункционална цифрова измервателна и визуализираща система.

Анализът на процесите показва, че при малки генератори при празен ход действието на възбудителната система има по-силно влияние върху скоростта на въртене. Точно това смущаващо въздействие би могло да се използва в процеса на синхронизация по следния начин [2]:

Стандартно цифровите изходи на синхронизатора се свързват към входовете за управление на регулатора честота на въртене в посока за увеличаване или намаляване.

Процесът на фино регулиране на хлъзгането може да се контролира по-добре чрез системата за възбуждане, като изходите на цифровия синхронизатор се свързват към цифровите входове на възбудителната система. Сигналът за увеличение на честотата на въртене се подава към входа за намаляване на възбуж-

дането, а за намаляване на оборотите - към входа за увеличаване на възбуждането.
Естествено в този случай трябва да се отчетат следните допълнителни ограничителни условия:

❖ Сигналът за управление на честотата на въртене остава на последното ниво след достигане на оптималната зона за синхронизация т.е. скоростния регулатор запазва последната стойност на регулиращото въздействие.

❖ Промяната на възбуждането в тази ситуация означава, че прекъсвачът ще затвори контактите си при напрежения, които в общия случай са с различна амплитуда. Ако тази разлика е в рамките на допустимия толеранс от 2,5% може да се приеме, че изравнителният ток в следствие на разликата в напреженията е просто една част от първоначалното натоварване с реактивен ток след включването в паралел. Това натоварване е следствие от лекото форсиране на възбуждането, за да остане генератора в синхронизъм.

❖ Напълно е възможно при този принцип на регулиране да се достигне ограничение по максимално генераторно напрежение. Тогава е необходимо изхода на скоростния регулатор да бъде позициониран на по-ниско ниво и алгоритъма да продължи по-същия начин.

❖ Ако възникне ограничение по минимално възбуждане скоростния регулатор се настройва едно ниво по-нагоре.

За да се избегнат ситуациите от последните две ограничения, както и да стане реално възможен този алгоритъм е необходимо предварително да бъдат коригирани алгоритмите на управлението. Действието на регулатора на възбуждане след активиране на устройството за синхронизация е следното:

✓ Целта вече не е изравняване на напреженията на двете страни на прекъсвача, а се работи по променящо се задание от входовете за увеличаване или намаляване на възбуждането. Задължително са активни защитите за максимално генераторно напрежение и минимално възбуждане, като при достигане на някое от ограниченията се подава сигнал към системата за управление.

✓ Разрешаването на действието на синхронизатора (задържане действието на скоростния регулатор) трябва да става след анализ на възможния регулируем диапазон на напрежението, т.е. оптималния вариант е скоростният регулатор да бъде „застопорен“ при генераторно напрежение близко до номиналното.

4. Анализ на резултатите

Анализират се записи от регистратора на физическия стенд [4]. Сравняват се резултатите при влизане в паралел преди и след въвеждането на промените в схемата и алгоритмите на управление.

Реално са изследвани процеси при синхронизация по методите:

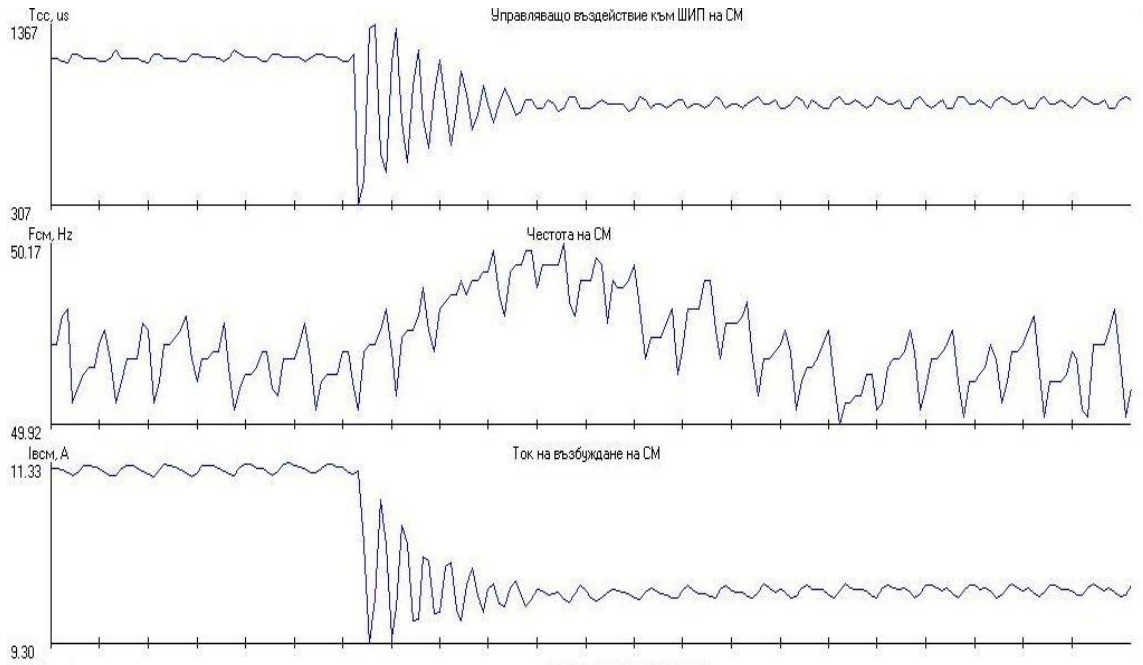
- ‚постоянен ъгъл на изпреварване‘: $\omega_S = \omega_0 \qquad \delta_{ВКЛ} = -\delta_И + \omega_S \tau_{YAC}$
- ‚постоянно време на изпреварване‘: $\omega_S = const \qquad t = -t_И = -\tau_И$
- комбиниран метод: ‚изследване интервала на дефазиране‘ [2].

След въвеждане на корекциите в алгоритмите на регулаторите с физическия стенд са проведени изследвания с алгоритъм на точна синхронизация с постоянно време на изпреварване, като вече са модифицирани алгоритмите.

Зададена е астатична характеристика на скоростния регулатор, „застопорен“ при достигане на разлика в честотите 0.05Hz (надсинхронна). Регулаторът на възбуждането поема функциите за контрол и на $f_г$ и на $U_г$. Заданието на регулатора вече е $\omega_S = const$, с ограничения спрямо амплитудата на генераторното напрежение ($max\ U_г$.) и минимално възбуждане. Разчита се на разлика между напреженията от двете страни на прекъсвача в допустим диапазон (например 500V при 20kV; 10V при 0.4kV [2]).

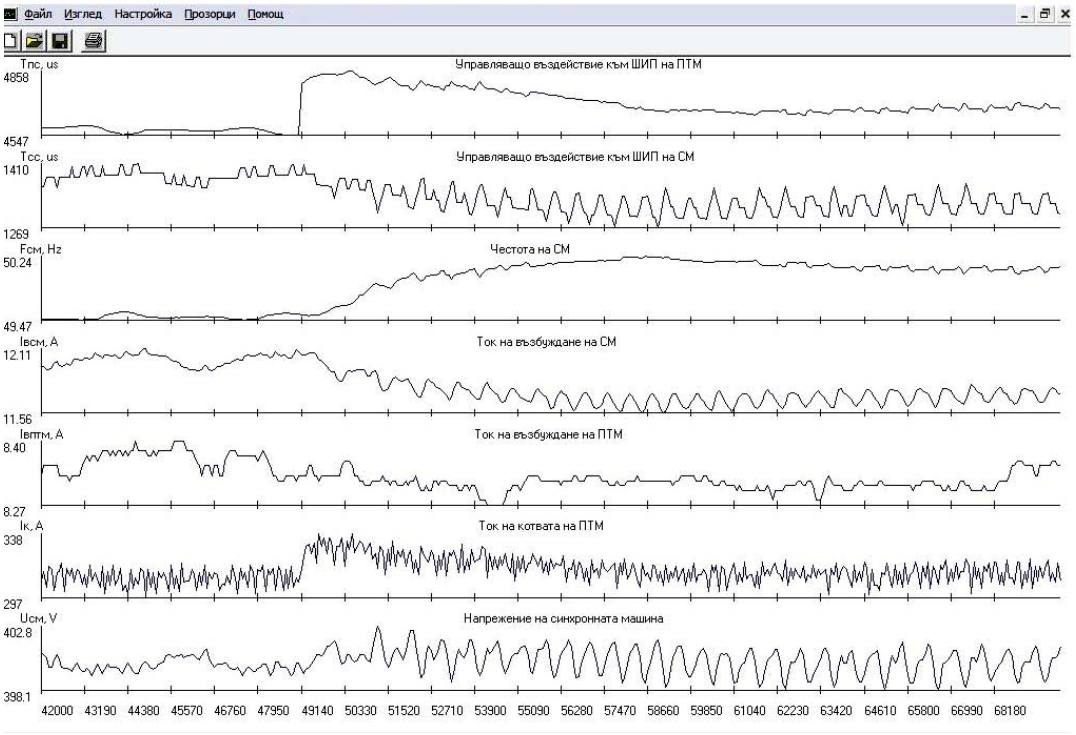
Разработения софтуер за дефинирания алгоритъм е програмиран в лабораторния физически стенд, с който могат да се изследват реално процесите.

На фиг.2 е показано силното влияние на възбудителния ток, спрямо честотата на напрежението на СГ при празен ход.

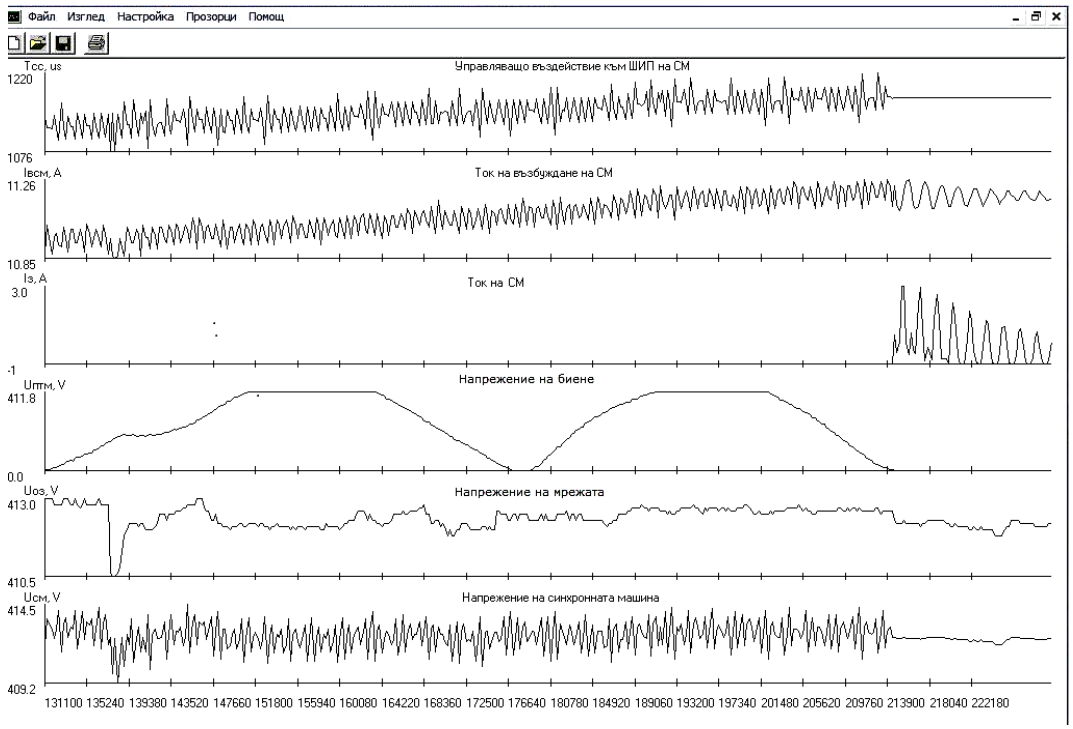


Фиг.2. Запис от регистратора на стенда:
Влияние на възбудителния ток,
спрямо честотата на СМ на празен ход
при астатичен скоростен регулатор.

На фиг.3 се вижда, че при изменение на честотата с 0.77Hz, чрез възбудителния ток, изменението на напрежението на клемите на машината е под 1.3% от номиналното в режим на празен ход.



Фиг.3. Запис на параметри на лабораторния стенд

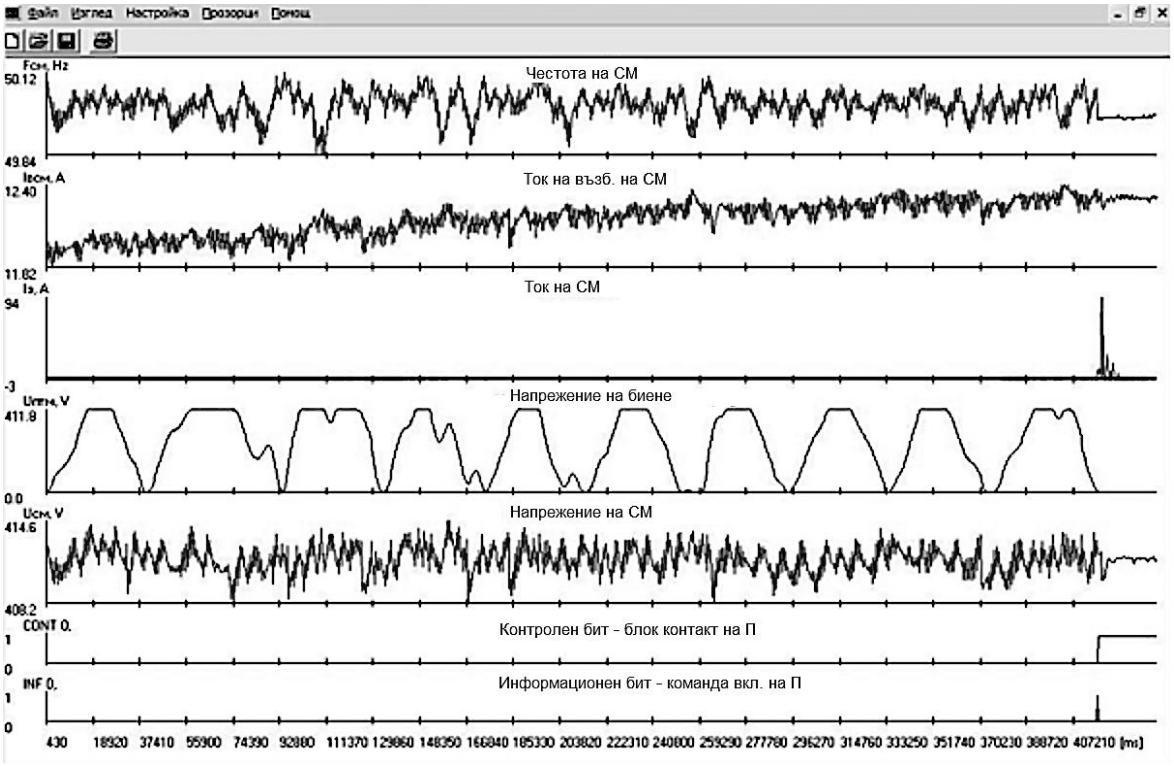


Фиг.4. Влизане в паралел на СГ

5. Заключение

На физическия стенд в лабораторни условия алгоритъма работи коректно. Резултатите от изследването на предложеният метод за бърза синхронизация на малки синхронни генератори са задоволителни (фиг.5). Това дава основание алгоритъма да бъде изпитан върху по-голям физически обект, при условие че има пълен достъп и контрол до алгоритмите на системата на възбуждане, до систе-

мата за регулиране на честотата на въртене, до цифровия синхронизатор и системата за общо-станционен контрол.



Фиг.5. Успешен процес с малък изравнителен ток и бързо затихване – след промяна на допустимата разлика в напреженията.

Изследванията представени в настоящата публикация са направени на база договор № 132ПД0054-01, с НИС на ТУ-София.

Литература

[1] Ахматов М. Г. - ***Синхронные машины***. Специальный курс, Высшая школа, Москва, 1984 г.

[2] Цолов А., ***Цикъл лекции по дисциплината АЕЧЕЦ*** – магистърски курс на ЕФ при ТУ – София, 2010г.

[3] Нанчев С., ***Основи на автоматизацията на електроенергийните системи***, „Техника", София, 1984.

[4] Цолов А., ***Регистрация на процеси в системите за АЕЕС'*** – ръководство за магистърски курс на ЕФ при ТУ – София, 2013г.

Автори: д-р инж. Ангел Цолов - доцент в катедра „Електроенергетика" (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *abc@tu-sofia.bg*; инж. Даниел Добрилов, докторант в катедра „Електроенергетика" (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *dobrilow@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. Кирил Захаринов

СТАТИЧНИ И ДИНАМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТ С ФЕРОФЛУИД

Анелия Терзова, Валентин Матеев, Илиана Маринова

Резюме: *В работата са изследвани статичните и динамичните характеристики на соленоиден електромагнит с ферофлуид. Разработен е тримерен модел, използващ метода с крайни елементи за изследване на разпределението на магнитното поле. Електромагнитната сила е определена посредством метода с тензор на напреженията на Максуел. Преходният режим на включване на електромагнита е моделиран чрез система обикновени диференциални уравнения. За решаването на системата е разработен и приложен едностъпков директен метод, при който интервалът на изменение на времето е разделен на подинтервали. Направено е сравнение между характеристиките на електромагнит с ферофлуид и електромагнит без ферофлуид. Разработените модели и направените изследвания могат да се използват при проектиране и оптимизация на нови по-ефективни електромагнитни устройства.*

Ключови думи: *статични електромагнитни характеристики, динамични характеристики, електромагнитни системи, ферофлуид, метод с крайни елементи, моделиране.*

STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ACTUATOR WITH FERROFLUID

Aneliya Terzova, Valentin Mateev, Iliana Marinova

Abstract: *In this work static and dynamic characteristics of solenoid type electromagnetic actuator with ferrofluid are investigated. 3D finite element method model is developed and magnetic field distribution is analyzed. Electromagnetic force is calculated by Maxwell stress tensor method. Transient mode of switching on the electromagnet is modeled by system of ordinary differential equations solved by Euler method where the time interval is divided into subintervals. The characteristics of an electromagnet with ferrofluid are compared with these of an electromagnet without ferrofluid. The developed models and electromagnet investigations could be used in design and optimization of new effective electromagnetic devices.*

Keywords: *static electromagnetic characteristics, dynamic characteristics, electromagnetic system, ferrofluid, finite element method, modeling.*

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

ISSN 1311-0829

1. Introduction

Electromagnetic actuators have many advantages including excellent performance, high reliability, long lifetime, minimal maintenance, etc. The electromagnetic actuators are widely used in industry [1-5]. They are part of various electromechanical devices, controlling different mechanisms and systems. An electromagnetic actuator with solenoid type electromagnet is utilized in electromagnetic valve actuation systems, fuel injection actuation, exhaust gas recirculation systems, refrigerators, washing machines, etc. [1-4].

The static characteristics are necessary for interoperability of electromagnet operation and counteractions, such as reaction of spring or mass of the armature, etc. The dynamic characteristics are very important because they describe completely performance of electromagnet. The static and dynamic characteristics of the electromagnetic actuator are very sensitive to core shape, electric elements, mechanical elements and magnetic elements. In order to obtain accurate dynamic characteristics of the electromagnetic actuator, it is necessary to perform a transient analysis. To take into account all physical phenomena, it is necessary to coupled electromagnetic field analysis, electric circuit analysis and mechanical movement [5, 6].

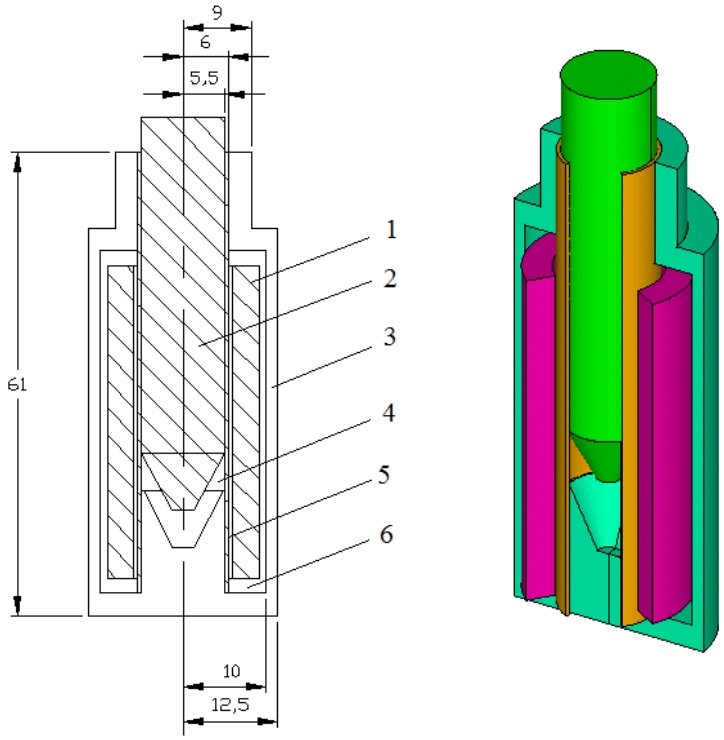
In recent years, growing interest elicit electromagnetic systems with ferrofluid nanoscale materials [7-11]. These systems have many advantages. Electromagnetic actuators with ferrofluid in the working gap are characterized with better operational characteristics compared with those with air gaps, such as reduced energy consumption, compact in size and etc.

Ferrofluid is a colloidal stable suspension of ferrite nanoparticles in liquid and surfactant. The surfactant molecules covered the solid particles and the fluid behaves as a homogeneous system even in the presence of external forces. The nanoparticles are usually iron oxides or different compounds as manganese-ferrite, zinc-ferrite, manganese-zinc-ferrite, cobalt-ferrite, copper-ferrite, and nickel-ferrite. The liquids are deionized water or a mixture of organic solvents or synthetic oils. The sizes of nanoparticles can vary from 1 nm to 100 nm and determine the properties of ferrofluid. In addition there are two other key parameters used to specify ferrofluids, namely the saturation magnetization and viscosity. By varying the constituents, a wide diversity of ferrofluids with different properties can be created [12, 13].

In this work, solenoid type electromagnetic actuator is investigated for determination of the static and dynamic characteristics. 3D finite element model is implemented to obtain the static electromagnetic force and the distribution of magnetic field in the actuator. Dynamic behavior of electromagnetic actuator is modeled by coupled approach includes magnetic field model, electric circuit model and mechanical movement.

2. Electromagnetic actuator

The electromagnetic actuator under consideration is solenoid type construction and consists of a stationary ferromagnetic core, a movable cylindrical ferromagnetic part (plunger) with cone end and magnetic gap filled with ferrofluid. In Fig.1.a are shown the cross-section with dimensions of electromagnetic actuator.



a) cross-section b) 3D model

Fig.1. Electromagnetic actuator

1 – coil; 2 - ferromagnetic plunger; 3 - ferromagnetic core; 4 – magnetic gap; 5 - brass tube; 6 - insulation of the coil.

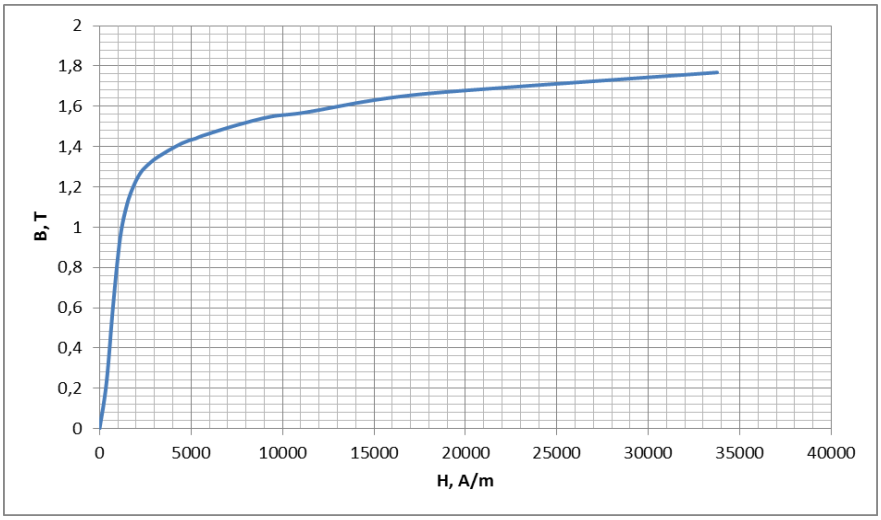


Fig.2. B-H curve of electrical steel

The material of core and plunger is electrical steel with B-H characteristic shown in Fig.2. The air gap is filled with ferrofluid and is considered as a magnetic gap. The coil consists of 600 turns, copper wire with diameter 1mm is used. Average current density at coil region is $J = 7\times10^6$ A/m^2. The mass of the plunger is m = 0.042 kg. The characteristic of the used spring is shown in Fig.3, its stiffness coefficient is k = 300 N/m. Ferrofluid, used in the model, is with relative magnetic permeability $\mu = 1.21$; saturation magnetization $B_s = 44$ mT (± 10%), viscosity < 6 mPa•s; density 1.1 g/cm^3;

boiling point 230 °C (± 10 %) [14]. The coil serves as a source of power to energize the magnetic circuit. Magnetomotive force (mmf), determined by the rated current I = 1.66 A and number of turns w, creates magnetic flux. Magnetic flux creates electromagnetic force attracting the plunger. Ferrofluid is used to reduce the dissipation of magnetic flux in the working gap of the electromagnet.

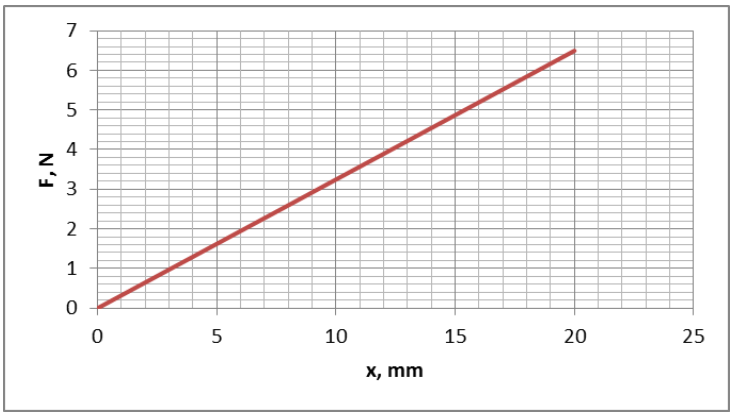


Fig.3. Spring characteristic

3. Magnetic field modeling

Magnetic field distribution in electromagnet actuator is described by Poison's equation

$$rot\left(\frac{1}{\mu} rot\mathbf{A}\right) = \mathbf{J} \ , \tag{1}$$

where **A**, **J** and μ are the magnetic vector potential, the source current density and the magnetic permeability, respectively.

Homogeneous Dirichlet's boundary conditions are imposed over the boundary of buffer zone surrounding the actuator.

Electromagnetic force acting on plunger is calculated by Maxwell stress tensor method

$$\mathbf{F} = \iint_s \left((\mathbf{n}\cdot\mathbf{B})\mathbf{H} - \frac{1}{2}(\mathbf{B}\cdot\mathbf{H})\mathbf{n} \right) ds \ , \tag{2}$$

where **B**, **H**, **n**, *s* are the vector of magnetic flux density, vector of magnetic field intensity, unit vector to normal and closed surface, respectively [15].

3. Dynamic characteristics

Dynamic characteristics are determined in switching - transient mode. The system of equations which describes the process of switching on the electromagnetic actuator is composed of the electric circuit equation of the coil and motion equation

$$\begin{cases} U = Ri + L\dfrac{di}{dt} + i\left(\dfrac{dL}{dx}\dfrac{dx}{dt} + \dfrac{dL}{di}\dfrac{di}{dt}\right) \\ F = m\dfrac{d^2x}{dt^2} + kx + F_{fr} + F_{ff} \end{cases}, \tag{3}$$

where in the electric circuit equation U, R, L, x are supply voltage, resistance of the coil, inductance of the coil and displacement of the plunger, respectively. In the motion equation m, k, F, F_{fr}, F_{ff} are mass of the plunger, stiffness coefficient of the spring, electromagnetic force, friction force with core and resistive force of ferrofluid, respectively [15, 18].

After introducing velocity v the system of equation becomes

$$\left|\begin{array}{l} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{U - Ri - iv\dfrac{dL}{dx}}{L + i\dfrac{dL}{di}} \\ \dfrac{dx}{dt} = v \\ \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{1}{m}\left(F - kx - F_{fr} - F_{ff}\right) \end{array}\right. \tag{4}$$

The system is solved by Euler method, which is first-order numerical procedure for solving ordinary differential equations. For each time step of the integration procedure the current values of electromagnetic force and coil inductance are acquired by the FEM magnetic field model.

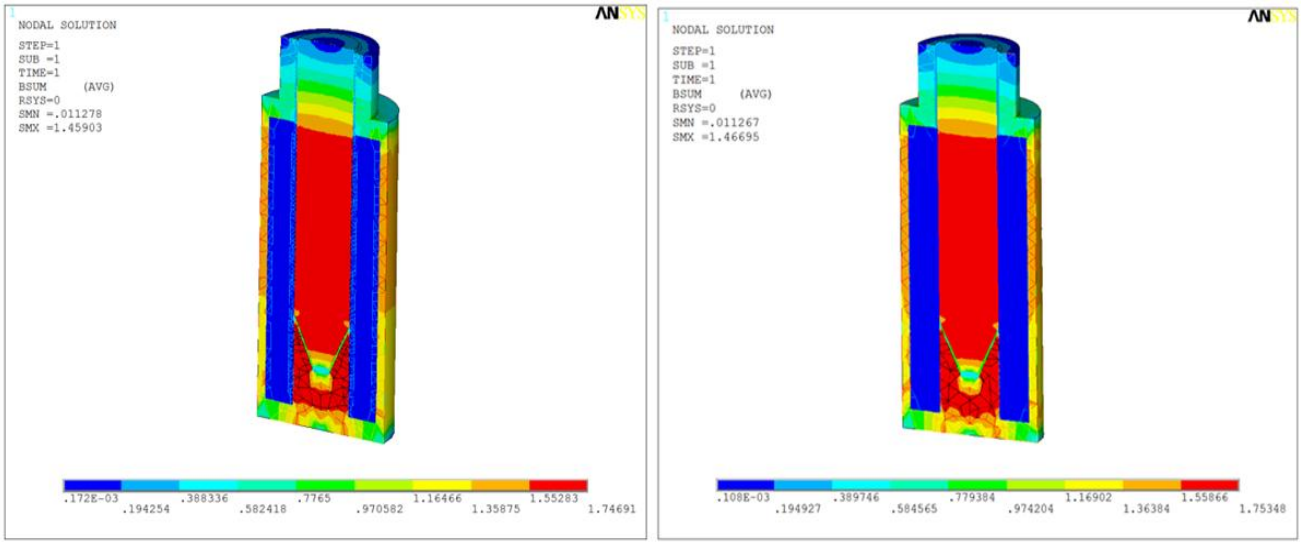
4. Implementation

For solving the electromagnetic problem finite element method by ANSYS 12.1 software is employed [16]. 3D geometrical model of electromagnetic actuator (Fig.1.b) is built and implemented for determination of static and dynamic characteristics. For determination of dynamic characteristics are coupled magnetic, electric and motion equations. Friction force F_{fr} and resistivity force of ferrofluid F_{ff} are ignored. Computational process uses iterative technique, the time is divided into subintervals equal to 0.001s. In each time step are calculated the current of the coil, velocity and displacement of the plunger. Values of electromagnetic force and inductance of the coil are obtained from magnetic problem by finite element method. The results from current step are used to obtain the solution in next time step. The initial conditions at $t_0=0$ are $\delta_0=\delta_{in}$, $x_0=0$, $i_0=0$, $U=6V$, $R=3.7\Omega$. The calculations are made for different initial working gaps δ_{in} = 6÷18 mm. Computations were automated using ANSYS Parametric Design Language (APDL).

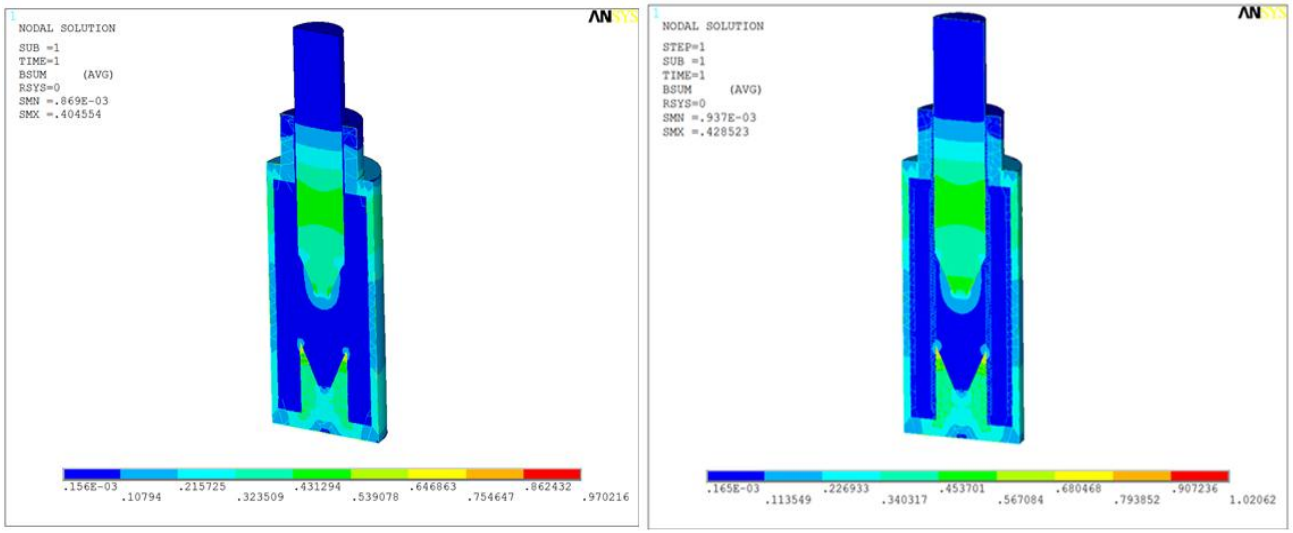
5. Results

Electromagnetic actuator is investigated in static and dynamic mode. Static electromagnetic force is calculated at working gap δ = 1÷18 mm. Dynamic characteristics are obtained at various working gaps. Distributions of magnetic flux density of the electromagnetic actuator at several values of the magnetic gap are determined.

In Fig.4.a, Fig.4.b, Fig.4.c, Fig.4.d are shown magnetic flux density distributions for electromagnet with air gap and with ferrofluid at δ = 1 mm and δ = 18 mm. The maximum value of magnetic flux density obtained with ferrofluid at working gap δ = 1 mm is B_{max}=1.75 T and with air gap B_{max}=1.74 T. At working gap δ = 18 mm the maximum value of magnetic flux density with ferrofluid is B_{max}=1.020 T and with air gap B_{max}=0.97 T.



a) μ=1, δ = 1 mm b) μ=1.21, δ = 1 mm



c) μ = 1, δ=18 mm d) μ = 1.21, δ=18 mm

Fig.4. Distribution of magnetic flux density

In Fig.5 are shown static electromagnetic characteristics of the actuator. Electromechanical characteristics are calculated with presence of ferrofluid and without ferrofluid in the working gap.

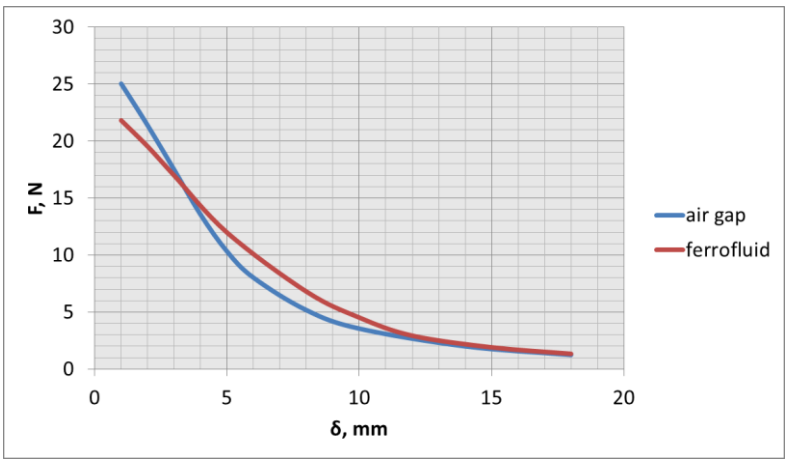
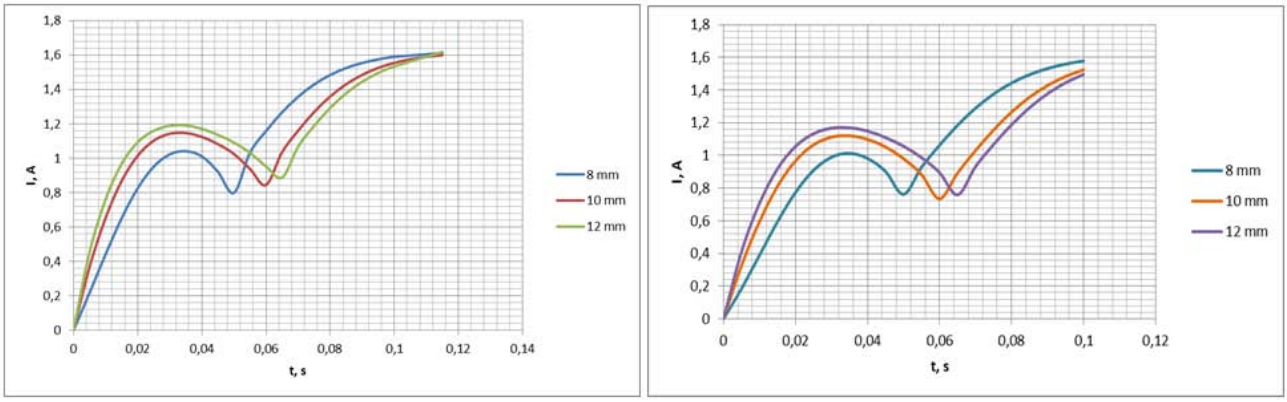


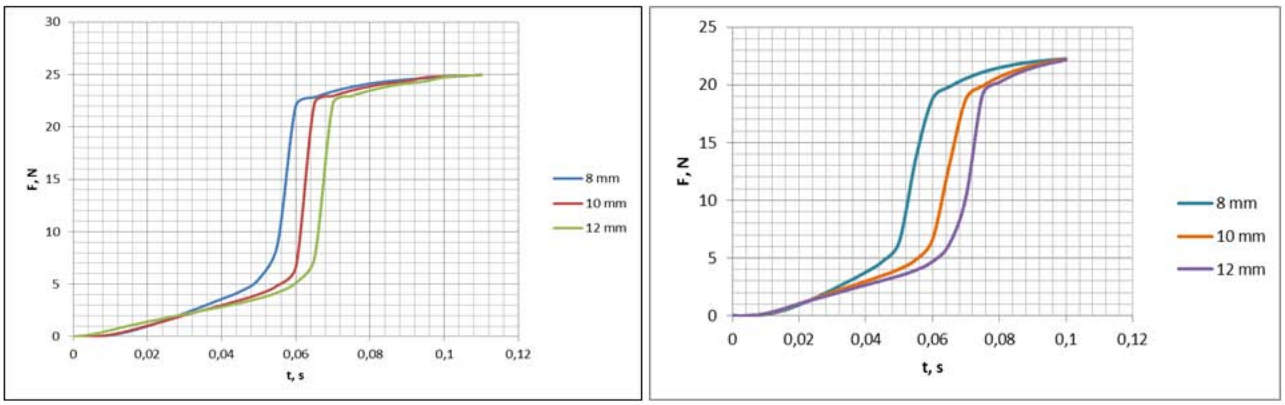
Fig.5. Static electromagnetic force characteristics

In Fig.6.a, Fig.6.b are given the dynamic characteristics of the current changing with time in switching mode of the electromagnet. The calculation are made for electromagnet with air gap and with working gap filled with ferrofluid. In Fig.7 are shown characteristics of electromagnetic force changing with time and in Fig.8 are shown characteristic of inductance changing with time.



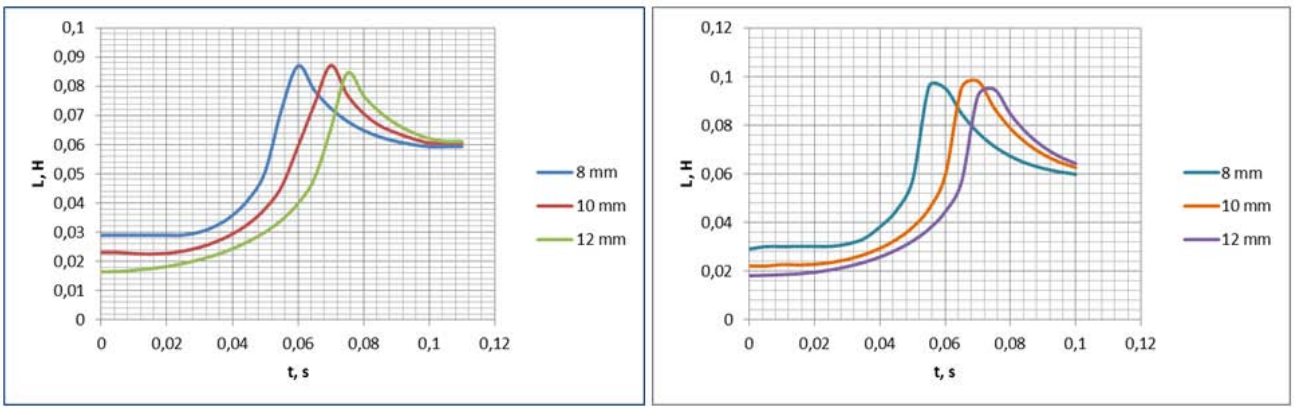
a) air gap b) magnetic gap with ferrofluid

Fig.6. Time dependence of the current in switching mode of the electromagnet



a) air gap b) magnetic gap with ferrofluid

Fig.7. Time dependence of the electromagnetic force in switching mode of the electromagnet



a) air gap b) magnetic gap with ferrofluid

Fig.8. Time dependence of the inductance in switching mode of the electromagnet

The presence of ferrofluid in electromagnet leads to increasing of the magnetic force acting on the plunger at greater working gaps (Fig.4). Moreover, the value of ferrofluid permeability affects on the shape of the corresponding curve, the characteristic becomes flatter. In switching on mode the current in electromagnet with ferrofluid is lower than in electromagnet with air gap (Fig.5). The coil inductance is higher when the electromagnet operates with ferrofluid. The switching time of solenoid almost not influenced. These results are experimentally investigated in [17].

6. Conclusion

Solenoid type electromagnetic actuator is investigated for determination of the static and dynamic characteristics. 3D finite element model is implemented to obtain the static electromagnetic force and the distribution of magnetic field in the actuator. The magnetic problem is formulated and nonlinear magnetic field models of the investigated actuator are built. For analysis of dynamic characteristics coupled approach is used, in which magnetic field model, electric circuit model and mechanical movement are implemented. Transient mode of the electromagnet is modeled by system of ordinary differential equations, solved with iterative technique based on Euler method. The inductance of the coil and the electromagnetic force are obtained by the FEM magnetic field model. Static and dynamic characteristics of the electromagnet with air gap are compared with those of the electromagnet with magnetic gap filed with ferrofluid. The results are presented and analyzed.

Developed model can be applied for explorations of the characteristics of such electromagnetic devices. The performed approach is applicable for investigation of different electromagnetic actuators. Further investigation will be focused on synthesis of 3D coupled field magnetic-fluid dynamics model.

7. Acknowledgements

This research is supported by project 132PD0047-01 – 2013 of the Technical University of Sofia, Bulgaria.

References

[1] Cazacu D., Stanescu C. (2011), ***Performance analysis of a solenoidal electromagnet,*** Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty, "Valahia" University of Targoviste, Romania, Vol. 2 (16) 2011, pp. 5-10

[2] Terzova A., Mateev V., Marinova I. (2013), ***Modelling of electromagnetic actuator with ferrofluid***, Proceeding of full paper of 7th International PhD Seminar on Computational electromagnetics and bioeffects of electromagnetic fields – CEMBEF 2013, August 28-31, 2013, Niš, Serbia, pp. 75-78

[3] Terzova A., Katsarski K., Kashukeev K., Mateev V., Marinova I. (2010), ***Computer modelling and optimization of electromagnets in education on electrical apparatus***, Proceeding of International PhD Seminar on computational electromagnetics and optimization in electrical engineering, CEMOEE, Sofia, Bulgaria, 2010, pp. 154–157

[4] Lee J., Dede E., Banerjee D., Iizuka H. (2012), ***Magnetic force enhancement in a linear actuator by air-gap magnetic field distribution optimization and design,*** Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 58, 2012 , pp. 44–52

[5] Mateev V., Marinova I., Terzova A. (2011), ***Transient electromagnetic modeling of electromagnetic system***, Proceedings of the Technical University - Sofia, Vol. 61, book 2, 2011, pp. 113–121

[6] Shin D., Choi M., Kwon J., Jung H. (2007), ***Analysis of an Electromagnetic Actuator for Circuit Breakers***, Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 2, No. 3, 2007, pp. 346-352

[7] Sreedhar B., Kumar R., Sharma P., Ruhela S., Philip J., Sundarraj S., Chakraborty N., Mohana M., Sharma V., Padmakumar G., Nashine B., Rajan K. (2013), ***Development of active magnetic bearings and ferrofluid seals toward oil freesodium pumps***, Nuclear Engineering and Design, Vol. 256, 2013, pp. 1166–1174

[8] Andò B., Baglio S., Beninato A. (2012), ***A ferrofluid inclinometer with a time domain readout strategy***, Proc. Eurosensors XXVI, Kraków, Poland, 2012, pp. 586 – 589

[9] Horak W., Szczęch M. (2013), ***Experimental and numerical determination of the static critical pressure in ferrofluid seals***, Journal of Physics: Conference Series No. 412, 2013, pp. 1-6

[10] Yoon T., Lee J., Kim D., Lee Y., Park M. (2012), ***Experimental Investigation of Magnetic Fluid used in Tandem mode for Underwater Vehicle System***, 16-th International Conference on Mechatronics Technology, Tianjin, China, 2012, pp. 59-61

[11] Schultheis T., Hoheisel D., Xiao W., Molella L., Reithmeier E., Rissing L., Hardt S. (2012), ***Performance of an adaptive liquid microlens controlled by a microcoil actuator***, Microfluid Nanofluid, Vol. 13, 2012, pp. 299–308

[12] Scherer C., Figueiredo A. (2005), ***Ferrofluids: Properties and Applications,*** Brazilian Journal of Physics, 2005, pp. 718-727

[13] Raj K., Moskowitz B., Tsuda S. (2004), ***New commercial trends of nanostructured ferrofluids***, International Journal of Engineering and Materials Sciences, 2004, pp. 241-252

[14] Mateev V., Marinova I., Saito Y. (20113), ***Coupled Field Modeling of Ferrofluid Heating in Tumor Tissue***, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, Issue 5, 2013, pp. 1793–1796

[15] Yatchev I., Marinova I. (2007), ***Numerical Analysis and modeling of circuits and fields,*** Technical University of Sofia, 2007 (in Bulgarian)

[16] ANSYS Release, 12.0 Documentation, 2010

[17] Terzova A., Mateev V., Marinova I. (2013), ***Computer measurement system for determination of static and dynamic characteristics of electromagnetic actuator with ferrofluid***, Proceeding of 23-th National Scientific Symposium with international participation of Metrology and Metrolgy Assurance, Sozopol, 2013, pp. 205-208

[18] Yatchev I., Hinov K., Gueorgiev V. (2004), ***Dynamic Characteristics of a Bistable Linear Actuator with Moving Permanent Magnet***, Serbian journal of electrical engineering Vol. 1, No. 2, June 2004, pp. 207–214

Автори: Анелия Терзова, маг. инж. ас., докторант, катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *aterzova@tu-sofia.bg*; Валентин Матеев, маг. инж. ас., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vmateev@tu-sofia.bg*; Илиана Маринова, проф. дтн инж., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *iliana@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** проф. дтн Иван Ячев

ТОЧНОСТ НА ЕЛЕКТРОННИТЕ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА РЕАКТИВНА МОЩНОСТ И ЕНЕРГИЯ

Борислав Бойчев, Вълчан Георгиев

Резюме: *През последните години стана актуален въпросът с точното определяне на реактивната мощност при несинусоидални токове и напрежения. В доклада са посочени най-често използваните изчислителни подходи за определянето на тази величина и е извършено изследване, целящо да се установи точността на всеки от тях.*

Ключови думи: *Реактивна мощност, компенсиране на реактивни товари.*

ACCURACY OF REACTIVE POWER AND REACTIVE ENRGY MEASUREMENT

Borislav Bojchev, Vulchan Gueorgiev

Abstract: *Precise measurement or calculation of reactive power in case of non-sinusoidal regimes is a topic of increasing interest. The most popular approaches for reactive power measurement are analyzed and their precision is comparatively estimated.*

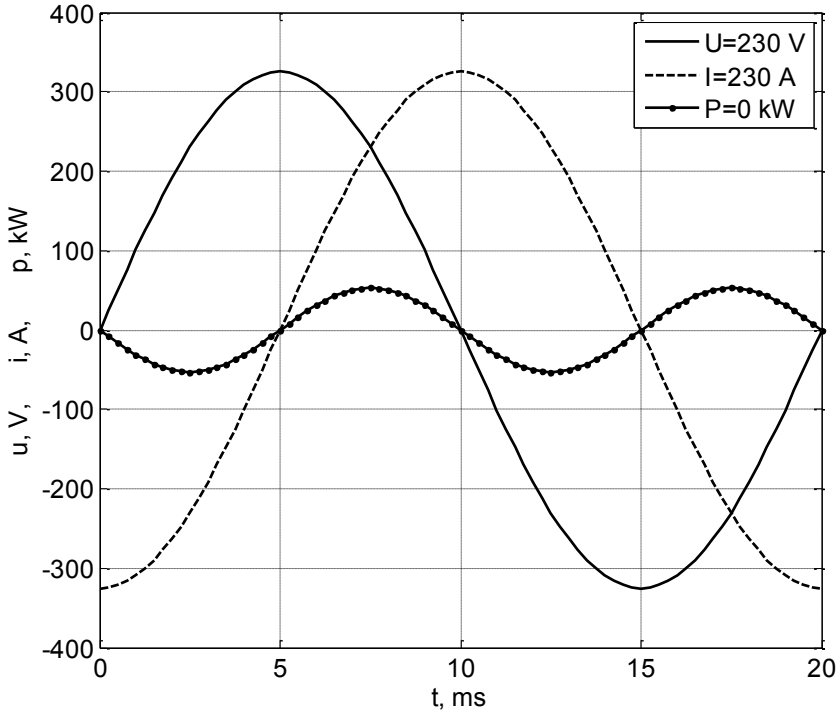
Keywords: *Reactive power, Reactive power compensation*

1. Въведение

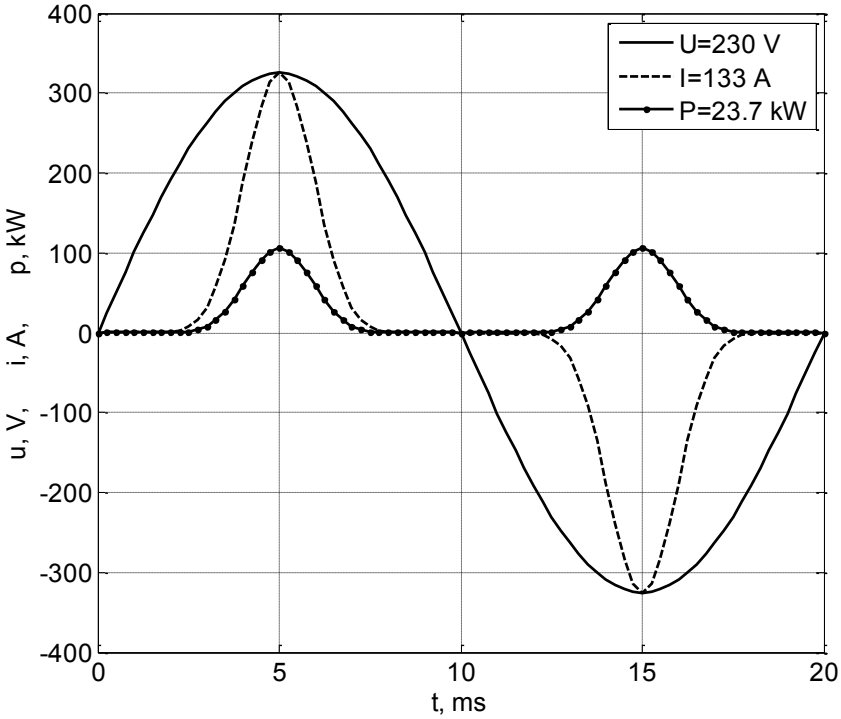
Още при самото създаване на понятията реактивна енергия и съответно реактивна мощност отсъства ясна и точна връзка между дефиниция и физически смисъл. При наличие само на неактивни съпротивления в електрическа верига се появява пулсиране на активната енергия между източник и консуматор, като средната стойност на пулсиращата компонента е нула (Фиг.1). Понятието реактивна енергия е въведено заради изчислителната аналогия с активната енергия при синусоидални режими и факта, че произведението от ефективните стойности на тока и напрежението и синуса на ъгъла на дефазиране между тях дават някаква количествена оценка на големината на пулсиращата активна мощност. Големината на реактивната мощност трябва да бъде еднозначно свързана с големината на пулсиращата активна мощност, или казано с други думи, при нулева реактивна мощност не трябва да е налице пулсиране на активната. Изключително лесно може да се покаже с числен пример, че при използване на дефиниционни изрази от учебниците по електротехника горното правило се нарушава. Това е демонстрирано на Фиг.2.

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

ISSN 1311-0829



Фиг.1. При синусоидални режими, реактивната енергия често се асоциира с тази част от активната енергия, която в рамките на един период пулсира между източник и генератор.



Фиг.2. При несинусоидални режими, е възможно да отсъства пулсираща между източник и консуматор моментна активна мощност, но въпреки това да се получи ненулева реакивна мощност, използвайки например триъгълника на мощностите за изчислението на реактивната мощност. В случая, въпреки отсъствието на пулсираща активна мощност се получават 19 kVAr реактивна мощност.

Дефиниционните проблеми свързани с реактивната мощност са забелязани от инженерите отдавна и съществуват много теоретични разработки, които се опитват да предефинират понятията реактивна енергия и реактивна мощност, така че те да станат общовалидни, независимо от линейността и симетричността на електрическите вериги.

С масовото навлизане на силовите електронни преобразуватели в промишлеността и енергетиката, въпросите за по-прецизното дефиниране на реактивната енергия придобиват съвсем практически, т.е. финансови измерения.

В много държави, включително в нашата, съществува форма на заплащане на реактивната енергия. При несинусоидални и несиметрични режими се явява проблем с измерването и компенсирането на реактивната енергия. Появява се неоднозначност – различните подходи при определяне на една и съща величина, (а именно реактивната енергия), водят до много сериозни разлики в получените стойности, от там и в дължимите суми, необходимата компенсираща мощност, нужните инвестиции и т.н.

2. Използвани означения

U - ефективна (средноквадратична) стойност на напрежението,

I - ефективна (средноквадратична) стойност на тока,

φ - ъгъл на дефазиране между ток и напрежение,

U_n - ефективна (средноквадратична) стойност на n-ти хармоник на напрежението,

I_n - ефективна (средноквадратична) стойност на n-ти хармоник на тока,

φ_n - ъгъл на дефазиране между n-ти хармоници на тока и напрежението,

$u(t)$, $i(t)$ - моментни стойности на напрежението и тока,

u_k, i_k - дискретни стойности на тока и напрежението.

3. Основни теоретични дефиниции

В специализираната литература [1, 2] периодично се посочва, че класическите дефиниции за мощност - активна, реактивна, пълна мощности не могат напълно да опишат явленията, проявяващи се при наличие на хармоници. В следствие на това са предложени множество дефиниции и методи за изчисление на тези величини [3, 5, 6, 7].

Може да се обобщи, че съществуват два основни подхода при дефиниране на неактивните компоненти на електрическите величини при несинусоидални режими – декомпозиция във времевата и в честотната области.

Дефиниция по Будеану

Най-популярна е дефиницията за реактивна енергия дадена от Будеану [13]. При него общата мощност се разделя на две компоненти – активна и неактивна. Първата се дефинира като:

$$P = \sum_{1}^{n} U_n I_n \cos\varphi_n \qquad (1)$$

Тази компонента е реалната мощност, която се преобразува в работа. Будеану разделя неактивната мощност на още две компоненти – реактивна и деформационна мощности. Реактивната се дефинира като:

$$Q = \sum_{1}^{n} U_n I_n \sin \varphi_n \,, \tag{2}$$

т.е. това е сума от реактивните съставки за всеки хармоник. Деформационната мощност е:

$$D^2 = (UI)^2 - P^2 - Q^2 \,, \tag{3}$$

При тази дефиниция всички компоненти на мощността са взаимно перпендикулярни. Реактивната мощност може да се компенсира с допълнителен капацитет или индуктивност, но деформационната мощност - не.

Дефиниция по Фризе

При тази дефиниция [3] се извършва декомпозиция на тока на активна и неактивна ортогонални съставки. Активната съставка на тока се изчислява от активната мощност:

$$i_a(t) \cong \frac{P}{U^2} u(t) \,, \tag{4}$$

а реактивната съставка:

$$i_r(t) = i(t) - i_a(t) \,. \tag{5}$$

Реактивната мощност в този случай се изчислява по:

$$Q = UI_r \,. \tag{6}$$

Тук се работи изцяло във времевия домейн, но изчислената реактивна енергия не носи достатъчно информация за необходимата компенсираща мощност. По тази причина дефиниции от този тип не са така популярни.

Както класическата дефиниция, валидна при синусоидални режими, така и голямото разнообразие на модификации върху дефинициите на Будеану и Фризе [5, 6, 7] не дават определение за моментна стойност на неактивната мощност, докато в същото време моментната стойност на активната мощност е напълно определена:

$$p(t) = u(t)i(t) \tag{7}$$

Необходимостта от компенсиране на бързопроменливи реактивни товари доведе до разработване на теорията на моментната реактивна мощност [8, 9]. В класическия си вариант, тази дефиниция е валидна само за трифазна симетрична система, макар че са направени опити тя да се модифицира за несиметрични и еднофазни системи.

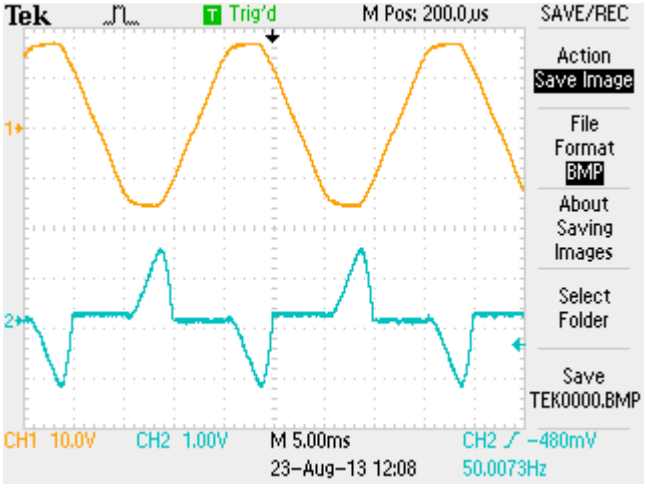
4. Измерване на реактивната мощност

Независимо дали става въпрос за заплащане, регистриране или компенсиране на реактивната мощност, е необходимо да тя да се определи, т.е. измери с достатъчна точност. Тук се появяват недостатъците на теоретичните дефиниции, които създават трудnопреодолими пречки при опитите за практическото им приложение. Класическата дефиниция, при която:

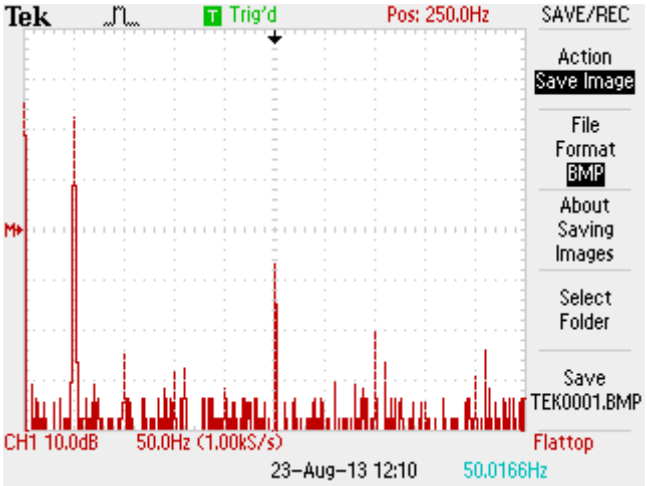
$$Q = UI \sin \varphi \qquad (8)$$

е абсолютно неприложима при несинусоидални режими. Достатъчно е да се погледнат величините, показани на Фиг.2, където понятието ъгъл на дефазиране между тока и напрежението е трудно за дефиниране. Очевидно не може да се работи и с ъгъла на дефазиране на първите хармоници.

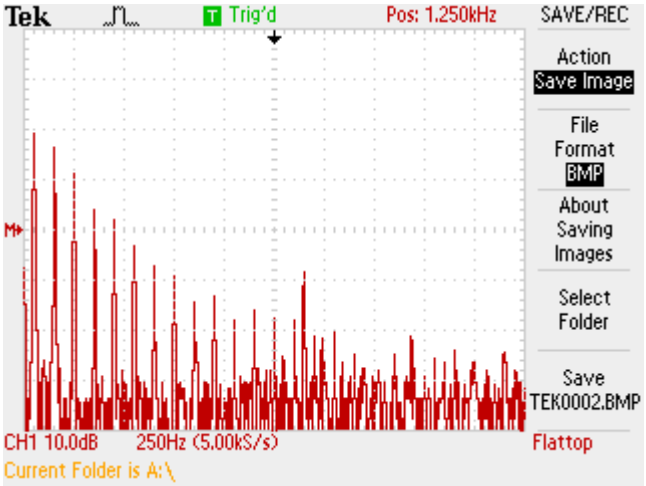
Не е трудно да се покаже практическата несъстоятелност на дефиницията по Будеану. На Фиг.3 е дадена осцилограма на напрежението и тока на еднофазен нелинеен товар. Кривата на тока е типична за всички електронни консуматори, които имат на входа към захранващата мрежа мостов изправител с капацитивен товар и отсъства PFC.



Фиг.3. Напрежение (канал 1, диф. сонда 1:20) и ток (канал 2, токова сонда 100 mA/V) на типичен нелинеен товар с капацитивно натоварен изправител на вхо-да.



FFT анализ на кривата на напрежението от Фиг.3. Ясно различими са 1-ви, 5-ти и 7-ми хармоници, а 2-ри и 3-ти са на границата на шума.



FFT анализ на кривата на тока от Фиг.3. Ясно различими са всички нечетни хармоници от 1-ви до 27-ми.

Фиг.4. Хармоничен анализ на кривите на тока и напрежението от осцилограмата от Фиг.3.

На Фиг.4 е даден хармоничния състав на тока и напрежението от Фиг.3. Вижда се, че хармоничния състав на напрежението е значително по-беден от този на тока. Следователно всички събираеми от типа:

$$U_n I_n \sin\varphi_n \tag{9}$$

в (2), за които може да се измери токовия, но не и напреженовия хармоник, ще са равни на нула. Това автоматично води до неоднозначност, защото прецизността (точността) на средствата за измерване ще определят дела на реактивната и деформационната мощности.

5. Изчислителни процедури при практическо определяне на мощностите

Всички съвременни средства за измерване, независимо от тяхното приложение – измервателни устройства, регистратори, системи за управление, са цифрови. Извършва се дискретизация на тока и напрежението с определена честота и всички електрически величини след това се определят от получените крайни дискретни редове. При това положение, най-популярните подходи при определяне на мощностите са два – триъгълник на мощностите и дефазиране на тока на четвърт период. Съществуват разбира се различни прийоми за числено реализиране на това дефазиране.

Метод на „триъгълника на мощностите”

Ефективните стойности на тока и напрежението могат да се определят относително лесно, дори при несинусоидални режими по формулите:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(u_k\right)^2}\,, \tag{10}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(i_k\right)^2}\,, \tag{11}$$

Където u_k, i_k са моментните стойности на тока и напрежението, а N е броят дискретни отчета на тези моментни стойности за един период на напрежението. Активната мощност е равна на средна стойност от моментните мощности или:

$$P = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} u_k \cdot i_k\,, \tag{12}$$

Пълната мощност е произведение на вече изчислените ефективни стойности: $S=U.I.$ А реактивната мощност се получава от триъгълника на мощностите като:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}\,. \tag{13}$$

Това е лесен и логичен метод, който е изключително добър при цифрова обработка на синусоидални сигнали. При несинусоидални обаче, се явява грешка, която в някои случаи е неприемливо голяма. На практика се пренебрегва деформационната мощност, а причината за това е, че тя не може да се определи.

Метод на „дефазиране на четвърт период”

При този метод към кривата на тока се добавя фазова разлика (или времезакъснение) отговарящо на 90 електрически градуса или ¼ период:

$$Q = \frac{1}{T}\int_0^T u(t).i\left(t + \frac{T}{4}\right).dt\,, \tag{14}$$

където T е периода на фундаменталната честота.

При цифровите системи този алгоритъм може да се реализира, като дискретните отчети на тока се вземат не едновременно с тези на напрежението, а с закъснение от четвърт период (Фиг.5). Останалите величини се получават по същия начин, като при триъгълника на мощностите.

Фиг.5. Метод на „дефазиране на четвърт период”.

6. Числен експеримент

Извършен е числен експеримент за оценка на адекватността на всеки от изчислителните подходи при определяне на реактивната мощност. Съпоставени са три подхода:

1. Директно приложение на дефиницията по Будеану (2);
2. Триъгълника на мощностите (13);
3. Дефазиране на четвърт период (14).

Подбран е хармоничен състав, който добре описва кривата на напрежението от Фиг.3, която е типична за нашата страна на ниво 0,4 kV. Всички изчисления са извършени с един и същи дискретен ред на напрежението, отговарящо на този типичен случай. Това е близко до реалната ситуация, защото почти винаги мощността на мрежата е достатъчно голяма, за да се пренебрегне влиянието на товара.

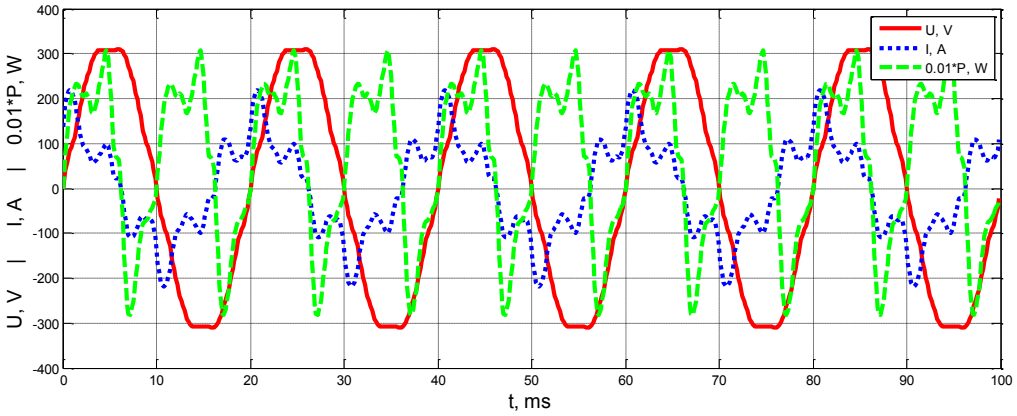
Задаван е различен хармоничен състав на тока. Получената крива е дискретизирана със същата честота, с която е дискретизирано и напрежението (256 отчета за период). Полученият дискретен ред е подлаган на бързо преобразуване на Фурие, за да се разложи на съставни хармоници, които са заместени директно в (2). За определяне на реактивната мощност по останалите два подхода са използвани (10) - (14).

7. Резултати

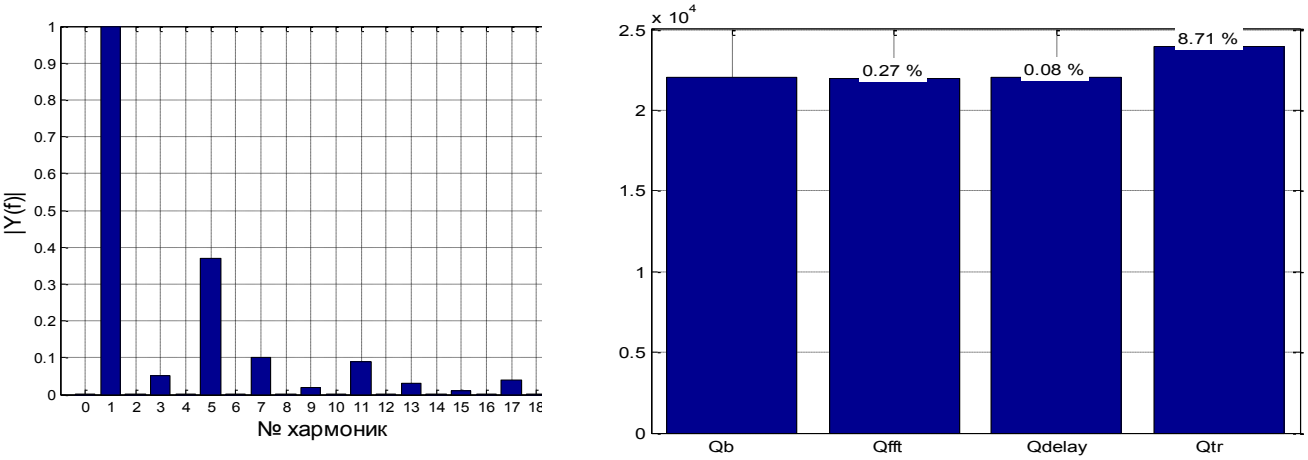
На Фиг.6 са представени времедиаграми на напрежението, тока и моментната активна мощност за един от изследваните случаи. На следващата фигура (Фиг.7) са показани хармоничния състав на тока и грешката при определяне на реактивната енергия, спрямо теоретичната стойност, при всеки от трите подхода.

Аналогично на показаните криви е задаван различен хармоничен състав на тока (и съответно различно дефазиране за всеки от хармониците). При това е опреде-

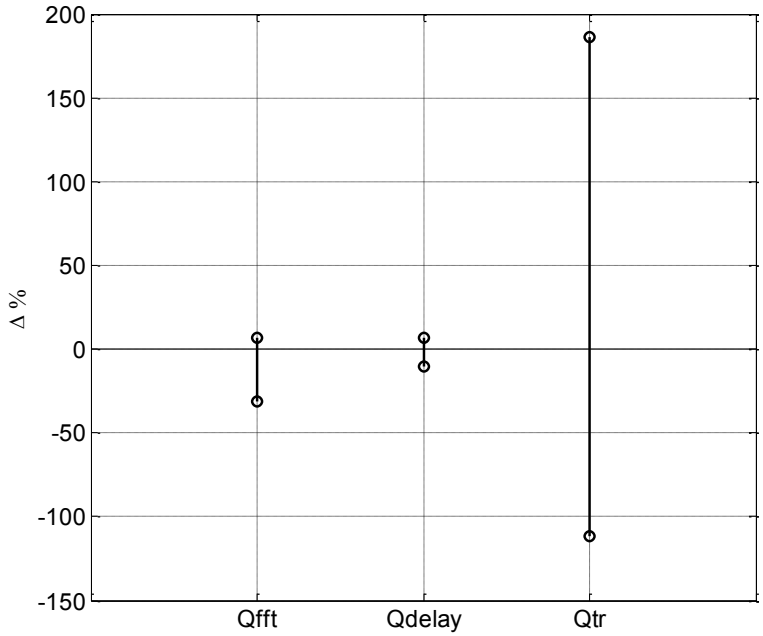
ляна грешката спрямо теоретичната стойност за всеки от изчислителните подходи. Обобщените резултати са показани на Фиг.8.



Фиг.6. Времедиаграми на напрежението, тока и моментната активна мощност за един от изследваните случаи.



Фиг.7. Хармоничен състав на тока и грешка спрямо теоретичната стойност за всеки от трите изчислителни подхода.



Фиг.8. Интервали на изменение на грешката при определяне на реактивната мощност по всеки от трите подхода за числения експеримент.

8. Заключение

Получените резултати показват, че грешката е минимална при използване на подхода с дефазиране на четвърт период. В литературата са известни различни методи за реализиране на този подход [12].

За съжаление, може да се смята, че в момента не съществува дефиниция или стандарт, които да дефинират еднозначно начина на изчисляване на реактивната енергия при несинусоидални режими. Една от налагащите се в литературата практики е да се посочва изрично методът на измерване/изчисление, използван при определяне на реактивната мощност [10, 11].

Литература

[1] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effect of Meter Performance and De f~t i o n so f Power; "Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.11, No.1. January, 1996

[2] IEEE Std 1459-2000 IEEE Trial-Use Standard Defmitions for The Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 21 June 2000

[3] Fryze, S.; "Active-, Reactive-, and Apparent Pow'& in Networks with Nonsinusoidal Waveforms of Voltage and Current", (in Polish) Przegl. Elektr., No.7,8,1931, (in German) ETZ, Bd.53, 1932

[4] Shepherd, W. and Zand, P.; Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits, (Cambridge University Press, 1979)

[5] Sharon, D.; "Reactive Power Definition and Power Factor Improvement in Nonlinear Systems", Proc. IEE, 120, 1973, pp. 704-706

[6] Czamecki, L. S.; "Comparison of Power Definitions for Circuits with Nonsinusoidal Waveforms", IEEE Tutorial Course 90EHO327-7-Pm pp.43-50

[7] Balchi M, M. Hocaoglu, "Comparison of Power Definitions for Reactive Power Compensation in Nonsinusoidal Conditions", 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2004

[8] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 20, no. 3, pp. 625-631, 1984

[9] A. Nabae, T. Tanaka, "A new definition of instantaneous active- reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1238–1243, 1996

[10] Milanés M. I., V. Miñambres, E. Romero, F. Barrero, "Quality Meter of Electric Power Systems based on IEEE Standard 1459-2000"

[11] Tolbert L, T. Habetler, Comparison of Time-Based Non-Active Power Definitions for Active Filtering

[12] F. GHASSEMI “Should the Theory of Power be Reviewed?”, L’Energia Elettrica - Volume 81 (2004) - “Ricerche”

[13] Budeanu C: Reactive and Fictitious Powers. “Publication No. 2 of the Rumanian National Institute, Bucharest”, 1927

Автори: Борислав Бойчев, гл. ас, инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *bojchev@tu-sofia.bg*; Вълчан Георгиев, доц., д-р, инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *lchy@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент**: доц. д-р инж. С. Гунински

ОЦЕНКА НА ЗАГУБИТЕ НА МОЩНОСТ И ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ ПРЕДИЗВИКАНИ ОТ ПРИСЪЕДИНЯВАНЕТО НА ВЪЗОБНОВЯЕМИ ИЗТОЧНИЦИ КЪМ РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНА ЕЛЕКТРИЧЕСКА МРЕЖА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Валентин Колев

Резюме: *Присъединяването на възобновяеми източници на ел.енергия използвайки вятъра и слънцето като първична енергия поставя нови предизвикателства към електрическите мрежи на разпределителните предприятия. В много случаи генерираната мощност от отдалечени МВЕЦ се налага да се пренася по дълги ненатоварени въздушни електропроводи, което предизвиква повишаване на технологичните разходи за разпределение на електрическата енергия. В доклада се анализират подобни случаи.*

Ключови думи: *Загуби на мощност, загуби на ел.енергия, генерирана мощност*

ASSESSMENT OF LOSS OF POWER AND ELECTRICITY DUE TO THE ACCESSION OF RENEWABLE ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORK TO MEDIUM VOLTAGE

Valentin Kolev

Abstract: *Accession of renewable electricity using wind and solar as primary energy brings new challenges to the electricity networks of distribution companies. In many cases, the power generated from remote HPP has to be carried by long pulsed power lines, causing increases in technological costs of electricity distribution. The report analyzes these cases.*

Keywords: *Power losses, losses of electric power, power capacity*

1. Въведение

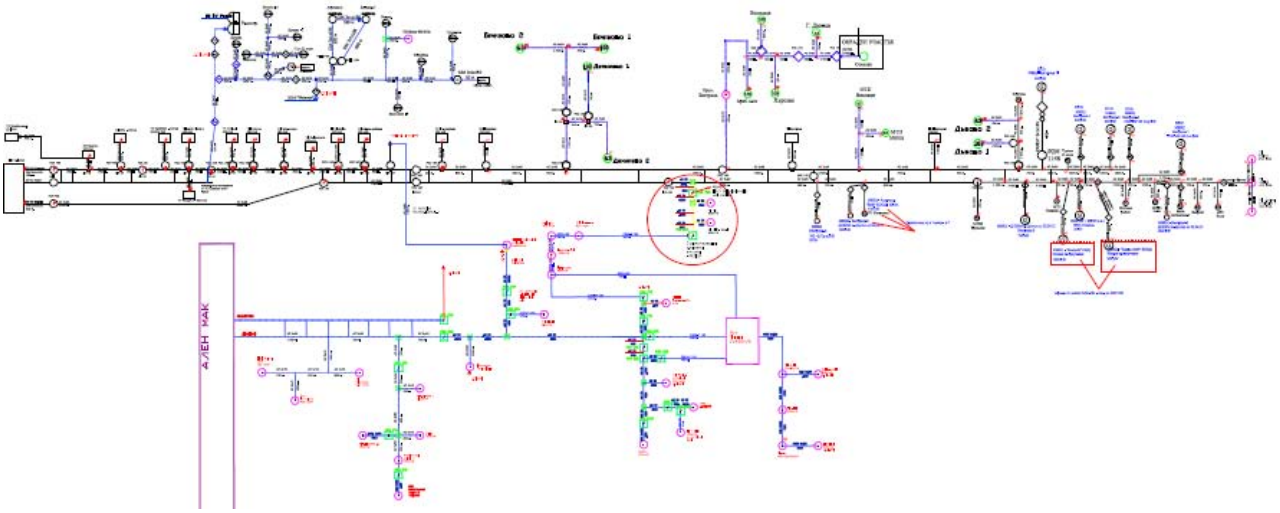
Към п/ст Джумая са присъединени две ВЕЛ 20 kV изпълнени на една стълбовна линия с дължина над 25 км. Към тях са присъединени няколко МВЕЦ с инсталирани мощности между 0,5 и 1,5 MW. Целта е да се изчислят загубите на мощност и енергия и предизвиканите технологични разходи при пълна генерация от МВЕЦ.

2. Изложение

На фиг.1 е показана диспечерската схема на ВЕЛ „Баража”, „Славово” и „Лесопарк”.

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

ISSN 1311-0829



Фиг.1. Диспечерска схема

Извод „Славово” е с обща дължина 28,3 км. ВЛ е изпълнена с неизолирани проводници тип АС 3х70 с дължина 7,2 км и АС 3х95 с дължина 21,1 км. Към електропровода са присъединени четири МВЕЦ, данните за които са показани в табл.1.

Табл.1.

№	Инвеститор	Местоположение	Р инст [MW]	Възел на при-съед.	ДПЕРМ	дата ДПЕРМ за достъп	ДИЕЕ
1	Благоевград-ска Бистрица ООД	МВЕЦ „Благоевградска Бист-рица № 7“ в ПИ № 001111, ЕКА-ТЕ 04217 с. Бистрица	0,600	90	2.3.2011	17.4.2012	17.1.2012
2	Благоевград-ска Бистрица ООД	МВЕЦ „Благоевградска Бист-рица № 5“ в ПИ № 001107, ЕКА-ТЕ 04217 с. Бистрица	0,650	93	2.3.2011	16.1.2012	17.1.2012
3	Благоевград-ска Бистрица ООД	МВЕЦ „Благоевградска Бист-рица № 5“ в ПИ № 001106, ЕКА-ТЕ 04217 с. Бистрица	0,650	95	2.3.2011	16.1.2012	17.1.2012
4	Благоевград-ска Бистрица ООД	МВЕЦ „Благоевградска Бист-рица № 5“ в ПИ № 001104, ЕКА-ТЕ 04217 с. Бистрица	1,045	97	2.3.2011	16.10.2012	17.1.2012
	Сумарна инсталирана мощност на ЕП		2,945				

Изчисления на загубите на мощност при товар на потребителите - 0 MW

Табл.2.

клон	P, kW	ΔP, kW	I, A	x, Ω.km	L, km	Възел	U, kV
98-97	1045	0,147	27,87	0,217	0,29	98	22,243
97-95	1045	0,769	27,87	0,33	1,00	97	22,216
96-95	650	0,014	17,33	0,217	0,07	95	22,215
95-93	1695	4,045	45,20	0,33	2,00	95	22,126
94-93	650	0,023	17,33	0,217	0,12	94	22,124
93-92	2345	9,678	62,53	0,33	2,50	93	21,969
92-90	2345	5,807	62,53	0,33	1,50	92	21,877
90-48	2945	86,092	78,53	0,33	14,10	90	20,780
48-0	2945	61,280	78,53	0,46	7,20	0	20,000
Общо:	**2945**	**166,926**		**Общо:**	**27,42**		

Изчисления на загубите на мощност при товар на потребителите – 0,5 MW

Табл.3.

клон	P, kW	ΔP, kW	I, A	x, Ω.km	L, km	Възел	U, kV
98 ÷ 97	1045	0,147	27,87	0,217	0,29	98	22,111
97 ÷ 95	1045	0,769	27,87	0,33	1,00	97	22,083
96 ÷ 95	650	0,014	17,33	0,217	0,07	95	22,083
95 ÷ 93	1695	4,045	45,20	0,33	2,00	95	21,993
94 ÷ 93	650	0,023	17,33	0,217	0,12	94	21,992
93 ÷ 92	2345	9,678	62,53	0,33	2,50	93	21,837
92 ÷ 90	2345	5,807	62,53	0,33	1,50	92	21,744
90 ÷ 48	2945	86,092	78,53	0,33	14,10	90	20,648
48 ÷ 0	2945	42,238	65,20	0,46	7,20	0	20,000
Общо:	**2945**	**147,884**		**Общо:**	**27,42**		
	ΔP,%=	5,02%					

Изчисления на загубите на мощност при товар на потребителите – 1,0 MW

Табл.4.

клон	P, kW	ΔP, kW	I, A	x, Ω.km	L, km	Възел	U, kV
98 ÷ 97	1045	0,147	27,87	0,217	0,29	98	21,978
97 ÷ 95	1045	0,769	27,87	0,33	1,00	97	21,951
96 ÷ 95	650	0,014	17,33	0,217	0,07	95	21,950
95 ÷ 93	1695	4,045	45,20	0,33	2,00	95	21,861
94 ÷ 93	650	0,023	17,33	0,217	0,12	94	21,859
93 ÷ 92	2345	9,678	62,53	0,33	2,50	93	21,704
92 ÷ 90	2345	5,807	62,53	0,33	1,50	92	21,612
90 ÷ 48	2945	86,092	78,53	0,33	14,10	90	20,515
48 ÷ 0	2945	26,729	51,87	0,46	7,20	0	20,000
Общо:	**2945**	**132,375**		**Общо:**	**27,42**		
	ΔP,%=	4,49%					

Извод „Баража” е с обща дължина 31,4 км до крайния ТП Скиор, 26,9 км до МВЕЦ „Бистрица 2” и 32 км до МВЕЦ „Бистрица 1”. В по-голямата си част ВЛ е реконструирана и е изпълнена с неизолирани проводници тип АС 3х95, а от към п/ст „Джумая” – с АС 3х50 (с дължина 1,7 км).„

От възел 2(РОС 191) на „Баража” и РОМ 1192 на „Славово” двете ВЛ са изпълнени на една стълбовна линия с дължина 20,7 км. Към електропровода са присъединени 7 МВЕЦ, данните за които са показани в табл.5 с обща инсталирана мощност 5,885 MW.

Проучванията относно режима на натоварване на ВЛ **„Баража”** показват, че максималната консумирана ел. мощност не надхвърля 0,7 MW като средното натоварване е в рамките на 0,2 ÷ 0,3 MW.

В табл.7 и табл.8 са показани същите резултати при отчитане на товар на потребителите съответно 0,35 MW и 0,7 MW

Табл.5.

№	Инвеститор	Местоположение	P инст [MW]	Възел на при-съед.	ДПЕРМ	дата ДПЕРМ за достъп	ДИЕЕ
1	**ВЕЦ Енергия**	**МВЕЦ „Славова“ ПИ № 001326, ЕКАТЕ 04217 с. Бистрица**	**1,800**	**16**	**6.1.2010**		**5.5.2010**
2	**А и А ООД**	**МВЕЦ „Бистрица - А“ имот № 001146, с. Бистрица**	**0,700**	**4**	**27.4.2011**	**25.1.2012**	**27.1.2012**
3	**Благоевград-ска Бистрица ООД**	**МВЕЦ „Благоевградска Бист-рица № 1“ в ПИ № 001100, ЕКА-ТЕ 04217 с. Бистрица**	**1,125**	**21**	**2.3.2011**	**16.1.2012**	**17.1.2012**
4	**Благоевград-ска Бистрица ООД**	**МВЕЦ „Благоевградска Бист-рица № 2“ в ПИ № 001102, с. Бистрица**	**1,440**	**25**	**23.3.2011**	**2.4.2013**	**20.11.2012**
5	**Благоевград-ска Бистрица ООД**	**МВЕЦ „Благоевградска Бист-рица № 6“ в УПИ № 829003, с. Бистрица**	**0,700**	**12**	**23.3.2011**	**2.4.2013**	**20.11.2012**
6	**Благоевград-ска Бистрица ООД**	**МВЕЦ „Благоевградска Бист-рица № 8“ в УПИ № 001414, с. Бистрица**	**0,600**	**6**	**28.4.2011**	**2.4.2013**	**20.11.2012**
7	**В и К**	**МВЕЦ Ковачица**	**0,120**	**6**		**2010г.**	**2010г.**
	Сумарна инсталирана мощност на ЕП		**5,885**				

Табл.6. (товар 0 MW)

клон	P, kW	ΔP, kW	I, A	x, Ω.km	L, km	Възел	U, kV
27 ÷ 26	1 440	0,614	39,64	0,217	0,600	27	23,967
26 ÷ 21	1 440	2,955	39,64	0,33	1,900	26	23,893
23 ÷22	1 125	0,462	30,97	0,164	0,980	23	23,878
22 ÷ 21	1 125	4,462	30,97	0,33	4,700	22	23,734
21 ÷ 16	2 565	13,818	70,60	0,33	2,800	21	23,538
17 ÷ 16	1 800	0,232	49,55	0,217	0,145	16	23,533
16 ÷ 12	4 365	37,157	120,15	0,33	2,600	16	23,224
13 ÷ 12	700	0,024	19,27	0,217	0,1	12	23,223
12 ÷ 6	5 065	69,273	139,42	0,33	3,600	6	22,726
6 ÷ 4	5 785	17,572	159,23	0,33	0,700	4	22,615
4 ÷ 0	6 485	466,859	178,50	0,33	14,800	0	20,000
Общо:	**6 485**	**613,428**		**Общо:**	**33,23**		
	ΔP,%=	9,46%					

Табл.7. (товар 0,35 MW)

клон	P, kW	ΔP, kW	I, A	x, Ω.km	L, km	Възел	U, kV
27 ÷ 26	1 440	0,614	39,64	0,217	0,600	27	23,788
26 ÷ 21	1 440	2,955	39,64	0,33	1,900	26	23,713
23 ÷22	1 125	0,462	30,97	0,164	0,980	23	23,698
22 ÷ 21	1 125	4,462	30,97	0,33	4,700	22	23,554
21 ÷ 16	2 565	13,818	70,60	0,33	2,800	21	23,358
17 ÷ 16	1 800	0,232	49,55	0,217	0,145	16	23,354
16 ÷ 12	4 365	37,157	120,15	0,33	2,600	16	23,044
13 ÷ 12	700	0,006	9,81	0,217	0,1	12	23,044
12 ÷ 6	5 065	60,192	129,96	0,33	3,600	6	22,581
6 ÷ 4	5 785	15,546	149,78	0,33	0,700	4	22,477
4 ÷ 0	6 485	418,690	169,04	0,33	14,800	0	20,000
Общо:	**6 485**	**554,133**		**Общо:**	**33,23**		
	ΔP,%=	8,54%					

Табл.8. (товар 0,7 MW)

клон	P, kW	ΔP, kW	I, A	x, Ω.km	L, km	Възел	U, kV
27 ÷ 26	1 440	0,614	39,64	0,217	0,600	27	23,608
26 ÷ 21	1 440	2,955	39,64	0,33	1,900	26	23,534
23 ÷22	1 125	0,462	30,97	0,164	0,980	23	23,519
22 ÷ 21	1 125	4,462	30,97	0,33	4,700	22	23,375
21 ÷ 16	2 565	13,818	70,60	0,33	2,800	21	23,179
17 ÷ 16	1 800	0,232	49,55	0,217	0,145	16	23,174
16 ÷ 12	4 365	37,157	120,15	0,33	2,600	16	22,865
13 ÷ 12	700	0,000	0,35	0,217	0,1	12	22,865
12 ÷ 6	5 065	51,748	120,50	0,33	3,600	6	22,435
6 ÷ 4	5 785	13,644	140,32	0,33	0,700	4	22,338
4 ÷ 0	6 485	373,142	159,58	0,33	14,800	0	20,000
Общо:	**6 485**	**498,234**		**Общо:**	**33,23**		
	ΔP,%=	7,68%					

Загубите на мощност и ел.енергия, както и разходите за тяхното покриване с и без отчитане на товара на потребителите на ел.енергия са показани по-долу:

Табл.9. Товар 1,0 и 0,7 MW

Обща генерирана мощност:	**P_{Σ}, kW =**	**9 430**
Общо за двете ВЛ:	**ΔP ,% =**	**6,69%**
Общо за двете ВЛ:	**ΔP,kW=**	**630,609**
Общо за двете ВЛ:	**ΔE,kWh=**	**1 891 827**
	х.лв. =	**208,10**

Табл.10. Товар 0,5 и 0,35 MW

Обща генерирана мощност:	**P_{Σ}, kW =**	**9 430**
Общо за двете ВЛ:	**ΔP ,% =**	**7,44%**
Общо за двете ВЛ:	**ΔP,kW=**	**702,017**
Общо за двете ВЛ:	**ΔE,kWh=**	**2 106 052**
	х.лв. =	**231,67**

Табл.11. Товар 0 MW

Обща генерирана мощност:	**P_{Σ}, kW =**	**9 430**
Общо за двете ВЛ:	**ΔP ,% =**	**8,28%**
Общо за двете ВЛ:	**ΔP,kW=**	**780,354**
Общо за двете ВЛ:	**ΔE,kWh=**	**2 341 063**
	х.лв. =	**257,52**

3. Заключение

1. При съществуващото положение при максимална генерирана мощност от МВЕЦ напреженията във някои възли надвишават допустимото 8,8%;

2. Тъй като товарът е в границите 0,35 ÷ 0,7 MW влиянието му върху загубите на мощност е по-малко от 2%;

3. Товарът на ВЛ предизвикан от пренасяната генерирана мощност не надхвърля 50%;

4. Поради голямата дължина на ВЛ, загубите на мощност надхвърлят приемливите стойност. Това води до значителни разходи за електроразпределителното дружество – над 150 х.лв. към настоящият момент;

Литература

[1] *Д. Николов*, ***Електрически мрежи и системи***
[2] *Данни от ЧЕЗ*

Автор: д-р инж. Валентин Генов Колев – доцент, катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vkolev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. А. Цолов

ПРОУЧВАНЕ ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА ХОМОГЕННИ НЕИЗОЛИРАНИ ПРОВОДНИЦИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МРЕЖИ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Валентин Колев

Резюме: *Присъединяването на възобновяеми източници на ел.енергия използвайки вятъра и слънцето като първична енергия поставя нови предизвикателства към електрическите мрежи на разпределителните предприятия. Пренасянето на генериращи мощности на разстояния по-големи от 10 км предизвиква значителни технологични разходи в разпределителните мрежи 20 kV. Един съвременен начин за намаляване на технологичните разходи е използването на високопроводими хомогенни проводници. В доклада се прави технико-икономически анализ на възможността за използване на такива проводници.*

Ключови думи: *високотемпературни, високопроводими хомогенни неизолирани проводници*

CONSIDERATION TO USING OF HOMOGENEOUS NO INSULATED CONDUCTORS THE MAINS MEDIUM VOLTAGE

Valentin Kolev

Abstract: *Accession of renewable electricity using wind and solar as primary energy brings new challenges to the electricity networks of distribution companies. Transfer of the generating capacity at distances greater than 10 kilometers causing significant technological costs in distribution networks 20 kV. A modern way to reduce the cost of technology is the use of highly conductive homogeneous conductors. The report feasibility study of the use of such wires*

Keywords: *high temperature, uniform, high conductivity uninsulated conductors*

1. Въведение

В работата е направено технико-икономическо проучване на възможностите за присъединяване на допълнителни генериращи мощности към съществуваща електрическа мрежа при запазване на технологичните разходи за разпределение на електрическата енергия.

2. Изложение

Разглеждат се следните два типа хомогенни високопроводими неизолирани проводници.

- AAC(All Aluminium Conductor)

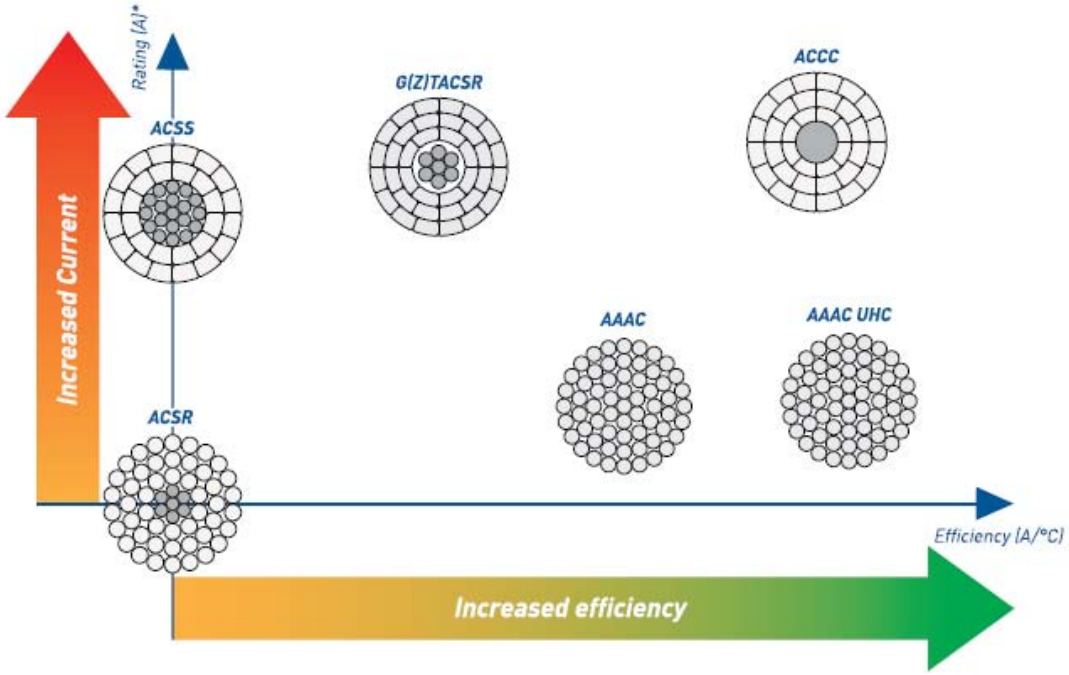
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

- AAAC (All Aluminium Alloy Conductor)

Фиг.1. Хомогенни неизолирани проводници

Преносна способност и ефективност



В табл.1 са показани основните механични и електротехнически характеристики на хомогенни и класически проводници.

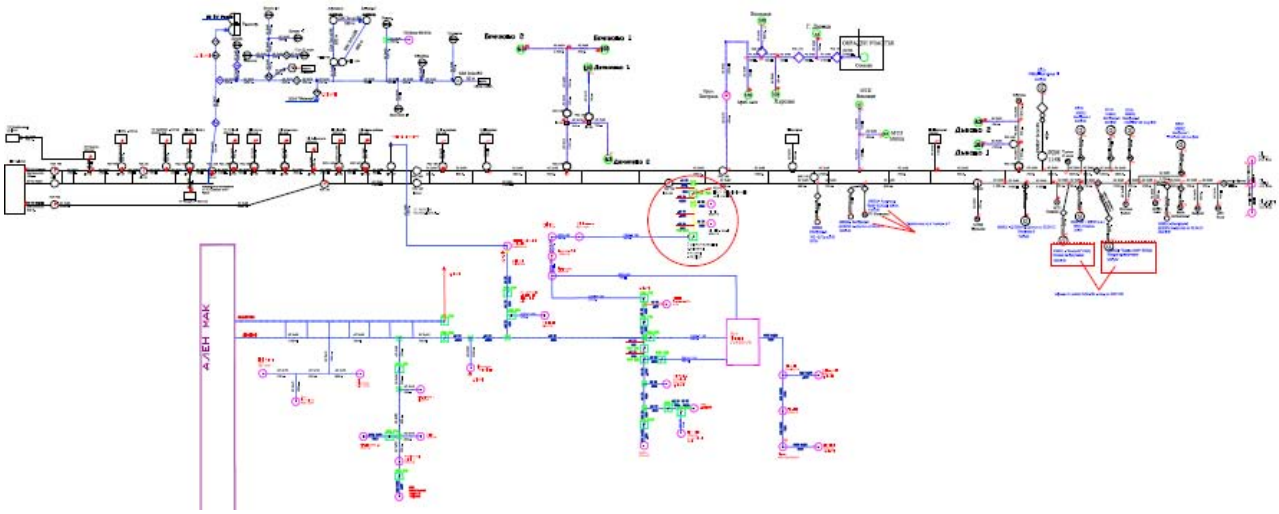
Характерни особености за този тип проводници са:

- R < 40%;
- Тегло (сравнено с ACSR) – по-ниско;
- Диаметър на проводника – същия;
- Вътрешна корозия – няма;
- Вибрационно затихване – по-добро;
- Вибрации – по-малко;
- Коефициент на линейно разширение – по-малък;
- Якост на опън >.

Табл.1

Параметър	95mm² ACSR	AAAC 140 UHC	120mm² ACSR	AAAC 175 UHC	150mm² ACSR	AAAC 215 UHC
Диаметър [mm]	13,5	13,5	16,16	15,16	16,96	17
Ел. съпротивление [Ohm/km]	0,301	0,2156	0,251	0,1704	0,196	0,1388
Якост на опън [kN]	32,9	36,1	46,6	45,6	57,2	56,2
Тегло [kg/km]	386	380	491	481	616	595,2

Диспечерска схема на захранването на МВЕЦ е показана на фиг.1



Фиг.1.

Подадено е искане за проучване за присъединяване на две МВЕЦ в района на възел №92 (ВЛ „Славово”) и 16 (ВЛ „Баража”).

№	Инвеститор	Местоположение	Ринст. [**MW**]	Възел на присъед.
1	“Хидро 2009“ ЕООД	„МВЕЦ“: имот с номер 001272, с. Бистрица	0.900	92(16)
2	“Бендида“ ООД	имот с номер 001057, с. Бистрица	1.500	92(16)

Разглеждат се следни варианти за присъединяване на двете централи:

Вариант №1 – присъединяване към ВЛ „Баража”;

Вариант №2 – присъединяване към ВЛ „Славово”;

Вариант №2.1 – без реконструкция;

Вариант №2.2 - В този вариант се предлага да се подменят съществуващите проводници от тип АС с хомогенни високопроводими проводници от тип АААС 140 на ВЕЛ „Баража” в участъка от п/ст „Джумая” (възел 0) до възел 4 – около 15 км.

Вариант №2.3 - В този вариант се предлага да се подменят съществуващите проводници от тип АС с хомогенни високопроводими проводници от тип

АААС 140 на ВЕЛ „Баража” в участъка от п/ст „Джумая” (възел 0) до възел 4 – около 15 км и на началния участък на ВЕЛ „Славово” – дължина 7 км.

Вариант №3 –присъединяване на двете централи към ВЛ „Лесопарк” и разкъсване на ВЛ „Баража” в отклонението за РОС 789.

Вариант №4 - предлага се да бъде изтеглена нова кабелна линия от МВЕЦ ”Бендида” и МВЕЦ ”Хидро 2009” до РОС 789 към ВЕЛ „Лесопарк” 20 kV – дължина около 10 км.

Вариант №4.1 - присъединяване на МВЕЦ „Бендида” и „Хидро 2009” към новоизтегления кабел САХЕкТ 3х185;

Вариант №4.2 - присъединяване на МВЕЦ „Славова”, „Бендида” и „Хидро 2009” към новоизтегления кабел САХЕкТ 3х185.

Технико-икономически сравнение на вариантите

Вариант	Описание	Реконструкция	Бюджетна ст-т на реконструкцията, лв.	P_{Σ}, kW	ΔP,kW	ΔP ,%	ΔE,kWh	х.лв.
съществуващо положение			**0,00**	**9 430**	**631**	**6,69%**	**1 891 827**	**208,10**
Присъединяване на МВЕЦ "Бендида" и "Хидро 2009" към:								
№1	ВЛ"Баража"	без реконструкция	**0,00**	**11 920**	**1167**	**9,79%**	**3 500 520**	**385,06**
№2.1	ВЛ"Славово"	без реконструкция	**0,00**	**11 920**	**969**	**8,13%**	**2 906 580**	**319,72**
№2.2	ВЛ"Славово"	подмяна на проводниците на ВЛ"Баража" в.0 - в.4 с АААС (15 км)	**380 х.лв.**	**11 920**	**833**	**6,99%**	**2 499 000**	**274,89**
№2.3	ВЛ"Славово"	подмяна на проводниците на ВЛ"Баража" в.0 - в.4 и ВЛ"Славово" в.48-в.0 с АААС (22 км)	**570 х.лв.**	**11 920**	**758**	**6,36%**	**2 272 929**	**250,02**
№4.1	ВЛ"Лесопарк"	КЕЛ 20 kV от МВЕЦ "Бендида" до РОС 789 (10 км)	**650 х.лв.**	**11 920**	780	**6,55%**	**2 341 062**	**257,52**
Присъединяване на МВЕЦ "Славова" към КЕЛ 20 kV								
№4.2	ВЛ"Лесопарк"	КЕЛ 20 kV от МВЕЦ "Бендида" до РОС 789 (10 км)	**650 х.лв.**	**11 920**	**759**	**6,37%**	**2 277 120**	**250,48**

3. Заключение

1. След направените анализи и изчисления за разглеждане остават II-ри и IV-ти варианти;
2. От гл.т. на разходите за присъединяване на МВЕЦ „Бендида” и „Хидро 2009” най-приемлив изглежда варианта, при който двете централи се присъединяват към ВЛ „Славово”. При този вариант сумарните загуби на мощност са 8,13%, ΔP = 969 kW. При 3000 часа часова използваемост на инсталираната мощност разходите на ЧЕЗ за покриване на тези загуби ще бъдат около 320 х.лв.;
3. При реализиране на вариант 2.2. изразходваните средства за подмяна на проводниците на ВЕЛ Баража с високопроводими хомогенни проводници са в размер на 380 х.лв., загубите на мощност са 758 kW, разходите за покриване на тези загуби намаляват с около 50 х.лв. до 274 х.лв. Срокът на откупуване на инвестицията е около 8 г.;
4. При реализиране на вариант 2.3. инвестицията е в размер на 570 х.лв. като разходите намаляват до 250 х.лв. и срокът на откупуване е около 8 г.;

5. За реализиране на вариант **4.1.** е необходимо инвеститорът да инвестира около 650 х.лв., при което сумарните загуби на мощност са **6,55%,** ΔP = **780 kW**. При 3000 часа часова използваемост на инсталираната мощност разходите на ЧЕЗ за покриване на тези загуби ще бъдат около **257 х.лв.**;
6. Инвестицията за реализиране на Вариант **4.2.** е същата като при **4.1.** Сумарните загуби на мощност са **6,37%,** ΔP = **759 kW**. При 3000 часа часова използваемост на инсталираната мощност разходите на ЧЕЗ за покриване на тези загуби ще бъдат около **258 х.лв.**;
7. При реализиране на вариант 2.2 икономията на разходите за покриване на загубите на мощност и ел.енергия са в размер на 70 х.лв. спрямо базовия вариант 2.1. В този случай срокът на откупуване на инвестицията възлиза на 9-10 г. при прилагане на динамичен метод за оценка на инвестицията NPV (Net Present Value) и определяне на PBP (Pay Back Period);
8. Както се вижда при реализиране на Вариант 4.2 се получава годишна икономия на разходи от загуби на ел.енергия по разпределителната мрежа между 70 х.лв. Срокът за откупуване на инвестицията е между 9 и 10 год. при прилагане на динамичен метод за оценка на инвестицията NPV (Net Present Value) и определяне на PBP (Pay Back Period);
9. Тъй като вариант 4.2. е свързан с по-тежки разрешителни процедури препоръчвам реконструкцията да се реализира вариант 2.3.
10. Причината за високите стойности на загубите на мощност и ел.енергия в разглежданите ВЛ е ниските електрически товари на потребителите;
11. Необходимо е да се направят постъпки за промяна на нормативната уредба и при подобни случаи загубите на мощност и ел.енергия да бъдат за сметка на инвеститора на база изчисления вместо да се правят скъпо струващи инвестиции за ненужно развитие на ел.мрежа.

Литература

[1] *Колев В.* ***Икономически оценки на инвестиционния процес, свързан с увеличаване преносната способност на въздушните електропроводи****, Созопол 2012, III-та конференция*

[2] *Колев В.* ***Изследване на механичните характеристики на високо температурни неизолирани проводници с нисък провес****, Созопол 2012, III-та конференция*

Автор: инж. Валентин Генов Колев, доц. д-р, катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vkolev@tu-sofia.bg*

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

ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕАКТИВНАТА МОЩНОСТ И ЕНЕРГИЯ В ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА МРЕЖА НА ЧЕЗ

Валентин Колев, Борислав Бойчев

Резюме: *В доклада се изследва ефекта от промените в Наредбата за регулиране на цените на електрическата енергия върху разходите за използвана и отдадена реактивна енергия. Определени са причините за увеличаване на разходите на електроразпределителните дружества за използвана и върната реактивна енергия.*

Ключови думи: *реактивна енергия, фактор на мощността.*

INVESTIGATION REACTIVE POWER AND ENERGY IN ELECTRICAL NETWORK CEZ

Valentin Kolev, Borislav Boichev

Abstract: *The report examines the effects of changes in the Ordinance on regulating of electricity prices on the cost of used and emitted reactive power. Certain causes increased costs of Electricity Company used for reactive power and returned.*

Keywords: *reactive power, power factor*

1. Въведение

Във връзка с трайната тенденция на увеличаване на цената на електрическата енергия и свързаните с това увеличаващи се технологични разходи за пренос и разпределение на електрическата енергия през 2012 г. Държавната комисия за енергийно и водно регулиране извърши промени в Наредба №7. В доклада се изследва ефекта от тези промени.

2. Изложение

Анализ на измененията и допълненията на "Наредба за регулиране на цените на електрическата енергия" в сила от 05.06.2012 г.

Според чл. 7 на наредбата (до измененията от 05.06.2012 г.), ползвателите на електрическа мощност, по-голяма от 100 kW, трябва да заплащат реактивната енергия, ако средномесечният фактор на мощността (cos φ) е по-нисък от 0,9. Съгласно (Изм. - ДВ, бр. 42 от 2012 г., в сила от 05.06.2012 г.) (1) „Ползвателите на електрическа енергия от електрическите мрежи с предоставена електрическа мощност 100 кВт и повече, разпределителните предприятия и производителите

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

ISSN 1311-0829

на електрическа енергия, когато са в режим на потребление, заплащат надбавка върху стойността на активната електрическа енергия в зависимост от използваната реактивна електрическа енергия за всеки петнадесетминутен интервал, при който факторът на мощността е по-малък от 0,9. Допълнителна алинеа в същия чл. (2) Факторът на мощността и надбавката по ал. 1 се определят за всяка точка на търговско измерване поотделно.

Измерва се както активната, така и реактивната енергия. Според чл. 7, ал. (3) *„Количеството използвана реактивна електрическа енергия, за което се заплаща надбавката по ал. 1, е положителната разлика между количеството използвана реактивна електрическа енергия и произведението на количеството използвана активна електрическа енергия и коефициент, съответстващ на фактор на мощността 0,9, съгласно формулата:”*

$$E_{р(пл)} = E_{р(изп)} - 0,49 * E_{а(изп)} \quad (1)$$

където: **Ер(пл)** е количеството реактивна електрическа енергия, за което са заплаща санкцията, кВАрч; **Ер(изп)** - количеството използвана реактивна електрическа енергия от ползвателя, определена за петнадесетминутни интервали от средството за търговско измерване, кВАрч; **Еа(изп) -** количеството използвана активна електрическа енергия от ползвателя, определена за петнадесетминутни интервали от средството за търговско измерване на активна електрическа енергия, кВтч; **0,49** - коефициентът, съответстващ на фактор на мощността - косинус "фи", равен на 0,9;

Съгласно ал. (4) цената на използваната реактивната енергия е равна на 12% (10% - стар вариант) от базисната цена за 1 кВтч активна електрическа енергия. Върнатата в мрежата реактивна енергия (или генерираната капацитивна) съгласно ал. (5) се заплаща по цена, равна на базисната цена за 1 кВтч активна електрическа енергия.

Базисната цена на активната електрическа енергия се определя като среднопретеглената цена изчислена от кондензационните централи и водноелектрическите централи с инсталирана мощност над 10 MW.

Анализирайки промените в последната редакция на Наредба №7 се установява следното:

1. Въвежда се задължение на разпределителните предприятия да заплащат консумираната рективна енергия, когато факторът на мощността е по-нисък от 0,9 и цялото количество върната в ел. мрежа реактивна енергия.
2. Съгласно чл. 7 ал.(1) факторът на мощността се определя за всеки петнадесет минутен интервал и съгласно ал. (2) за всяка точка на търговското измерване поотделно.

Както се вижда от формулата количеството реактивна енергия, което подлежи на заплащане зависи основно от количеството използвана активна енергия. Така

даден потребител с относително плътен товаров профил в месечен разрез по текстовете на старата Наредба може да не дължи санкции за реактивна енергия, тъй като тази формула се прилага за изразходвани количества енергия за целия месец. С въвеждането на последната редакция (петнадесет минутен период на отчитане) ако по технологична или др. причина основните товари в същия потребител бъдат спрени (дори за няколко часа) липсата на потребената активна енергия за това кратко време ще доведе до понижаване на фактора на мощността и съответстваща санкция. При такъв режим ако няма много асинхронни товари този потребител ще отдава в мрежата реактивна енергия, а ако има ще консумира такава, но при всички случаи временно ще бъде в режим на понижен фактор на мощността. Другият фактор, който ще влияе върху разходите на потребителя за използвана реактивна енергия ще бъде последната поправка в Наредбата, свързана с отчитането на факторът на мощността и надбавката за всяка точка на търговско измерване поотделно.

Това налага да се направи енергиен одит за въвеждане на организационни и технически мероприятия за поддържане на факторът на мощността в определените от Наредбата граници по всяко време.

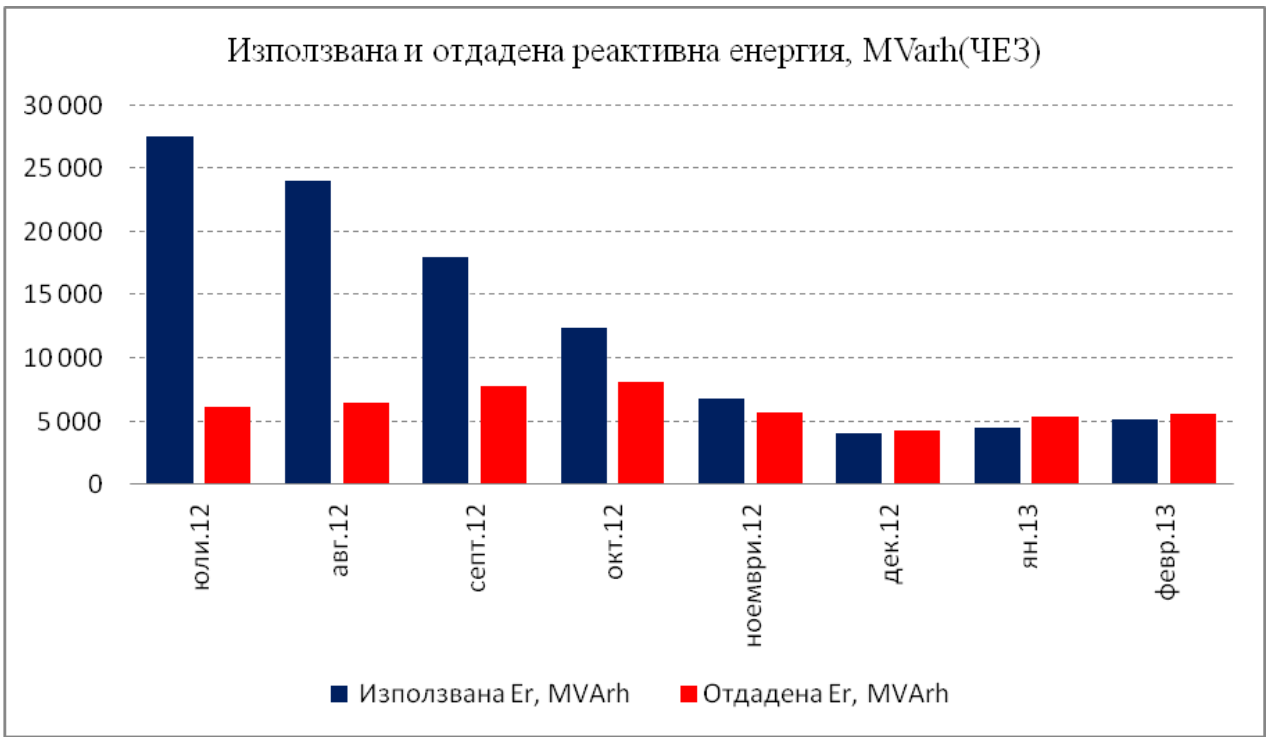
Анализирани са изчислените стойности на получената надбавка за използвана и отдадена реактивна електрическа енергия на цялото дружество ЧЕЗ Електро България АД за периода 01.07.2012 г. - 28.02.2013 г.
В табл.1 са представени обобщени данни от използваната и отдадена реактивна енергия и разходите за заплащане в съответствие със зависимостта (1) по месеци.

Табл.1.

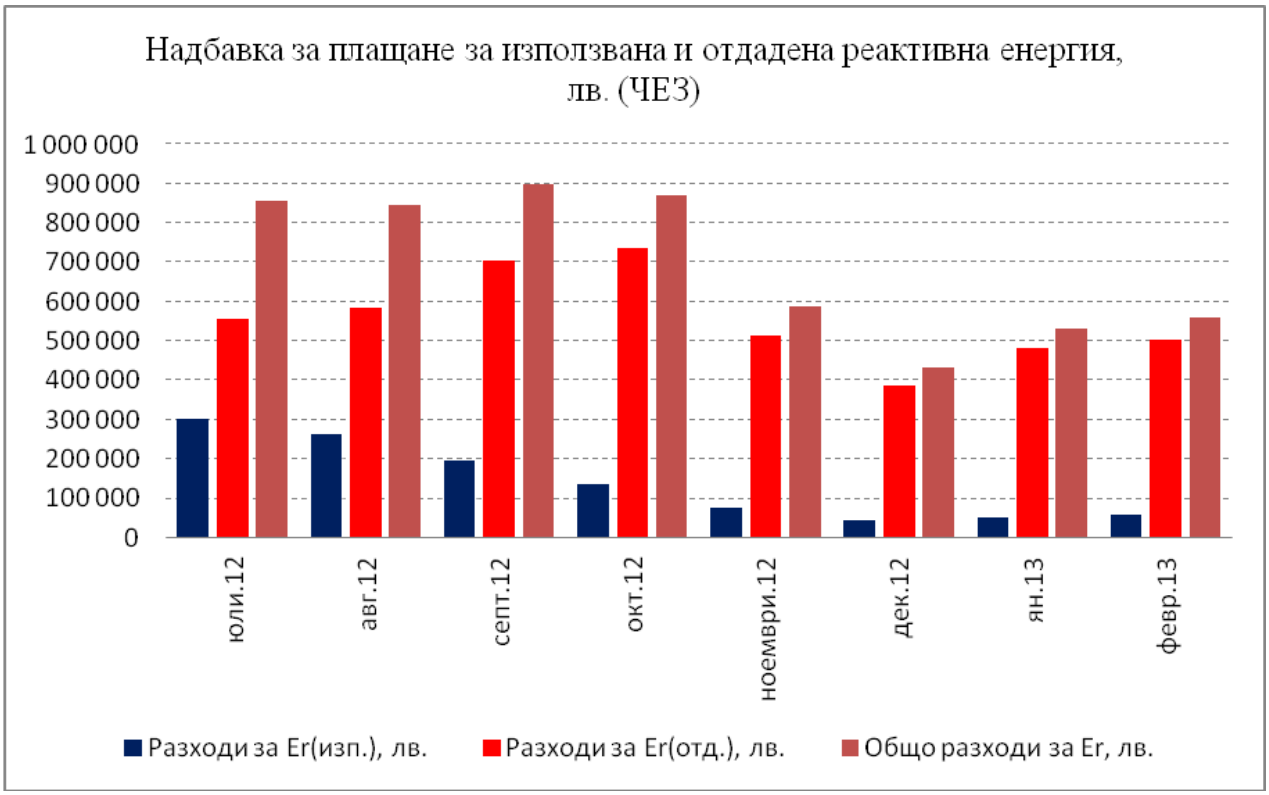
	месец	Използвана E_r, MVArh	Разходи за Er(изп.), лв.	Отдадена Er, MVArh	Разходи за Er(отд.), лв.	Общо разходи за Er, лв.
Общо за "ЧЕЗ Разпреде-ление България" АД	юли.12	27 589	299 351	6 159	556 905	856 256
	авг.12	24 081	261 293	6 451	583 276	844 569
	септ.12	17 993	195 236	7 800	705 252	900 488
	окт.12	12 388	134 410	8 144	736 379	870 790
	ноември.12	6 829	74 102	5 705	515 857	589 959
	дек.12	4 080	44 269	4 285	387 412	431 681
	ян.13	4 529	49 138	5 320	481 002	530 140
	февр.13	5 160	55 984	5 555	502 320	558 304
Общо:		**102 649**	**1 113 783**	**49 418**	**4 468 403**	**5 582 186**

На фиг.1.а и 1.б. са показани в графичен вид изменението на използваната и отдадена в електропреносната мрежа на НЕК ЕАД реактивна енергия по месеци, както и разходите за заплащане.

В табл.2 са показани резултатите от използваната реактивна енергия за заплащане по райони, а в табл.3 - отдадената реактивна енергия.



Фиг.1.а. Използвана и отдадена енергия за ЧЕЗ



Фиг.1.б. Разходи за използвана и отдадена реактивна енергия за ЧЕЗ

Табл.2

Надбавка за заплащане на използвана реактивна енергия, MVArh

№	Район	юли.12	авг.12	септ.12	окт.12	ноември.12	дек.12	ян.13	февр.13
1	София град	2 727	2 369	1 625	1 182	441	258	263	246
2	София област	1 038	1 367	1 004	711	396	264	166	124
3	Перник	235	185	126	88	16	1	3	5
4	Кюстендил	630	620	513	479	396	241	291	284
5	Благоевград	5 350	3 918	3 268	2 581	2 447	1 145	927	1 312
6	Монтана	3 402	2 986	2 108	1 319	320	222	272	292
7	Враца	5 927	5 265	4 087	2 574	1 610	1 288	1 709	1 811
8	Видин	819	1 129	823	536	149	95	85	100
9	Плевен	4 875	4 178	2 928	2 009	817	459	431	590
10	Ловеч	2 586	2 063	1 513	908	238	106	382	396

Табл.3

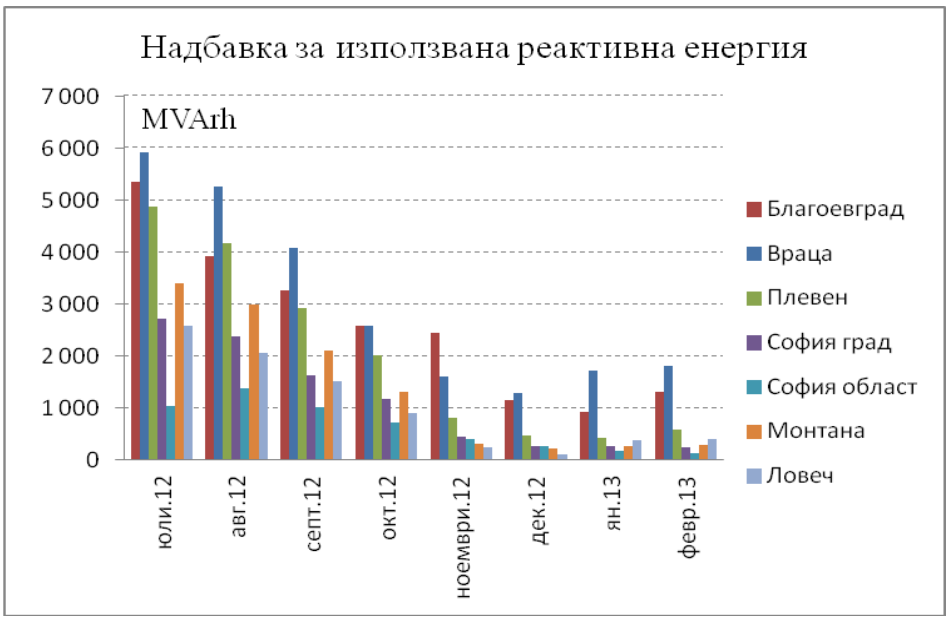
Разходи за заплащане на надбавката за използвана реактивна енергия, лв.

№	Район	юли.12	авг.12	септ.12	окт.12	ноември.12	дек.12	ян.13	февр.13
1	София град	29 587	25 705	17 662	12 830	4 783	2 798	2 858	2 668
2	София област	11 268	14 837	10 118	7 716	4 300	2 869	1 801	1 340
3	Перник	2 554	2 008	2 554	951	169	13	35	54
4	Кюстендил	6 837	6 731	6 764	5 198	4 297	2 614	3 153	3 077
5	Благоевград	58 048	42 513	58 048	28 006	26 548	12 423	10 055	14 234
6	Монтана	36 910	32 401	36 910	14 317	3 468	2 409	2 953	3 173
7	Враца	64 307	57 130	64 307	27 926	17 473	13 980	18 546	19 648
8	Видин	8 882	12 250	8 882	5 814	1 617	1 031	920	1 090
9	Плевен	52 901	45 336	52 901	21 798	8 868	4 982	4 672	6 402
10	Ловеч	28 057	22 382	28 057	9 855	2 578	1 149	4 146	4 300

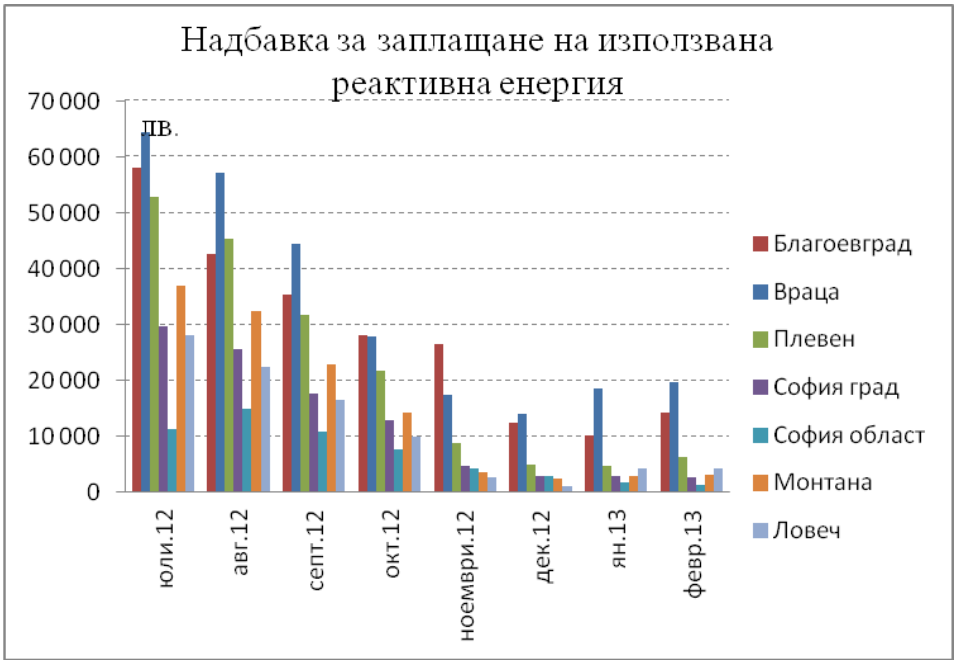
От показаната таблица се вижда, че районите с най-големи разходи за заплащане на отдадена в мрежата на НЕК реактивна енергия са София град и Благоевград. За район Благоевград е характерно, че след ноември месец количеството на отдадената реактивна енергия рязко спада, докато за района на гр. София се запазва почти постоянно количество отдадена енергия.

В графичен вид на фиг.2 е показано изменението на използваната реактивна енергия по месеци за районите с месечна надбавка за използвана реактивна енергия над 2500 MVArh. На фиг.3 са показани същите резултати остойностени в лв.

В табл.4 са показани данните от отдаденото количество реактивна енергия по присъединения.



Фиг.2



Фиг.3.

Табл.4

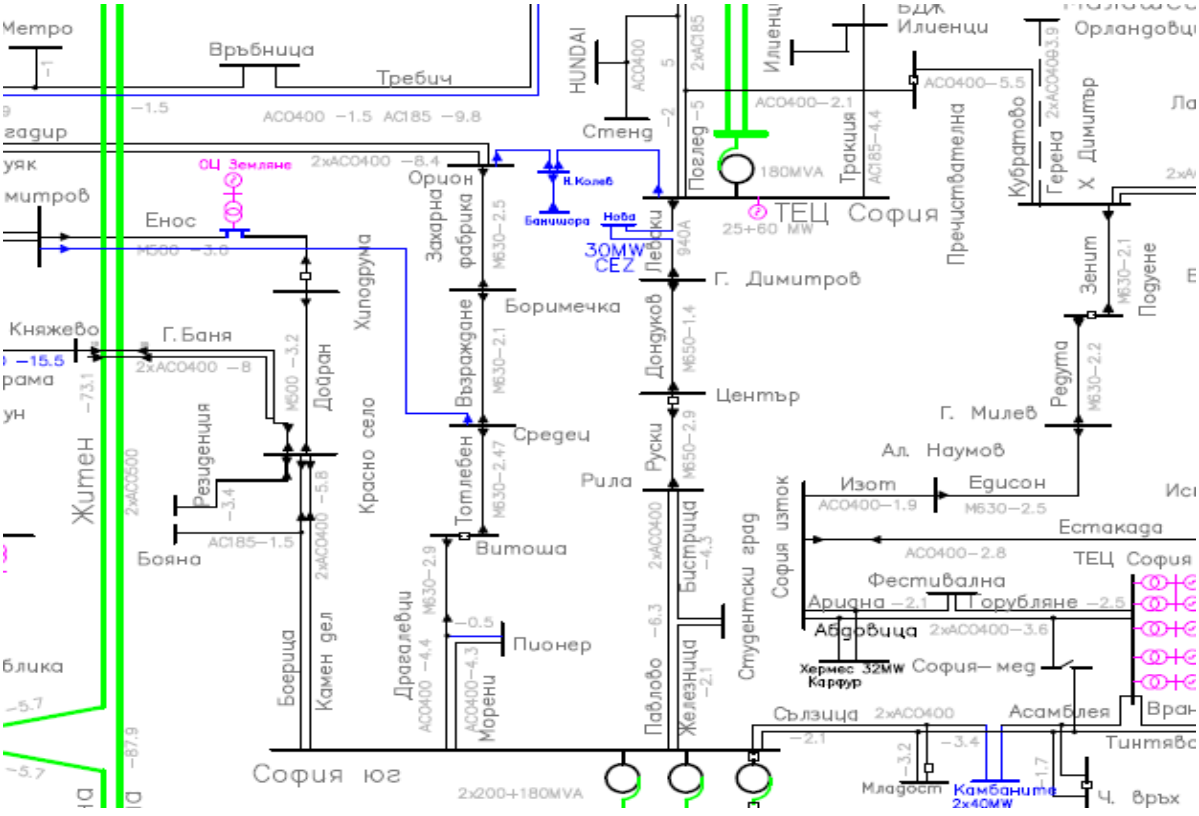
№	Район	Обект	Присъединение	07.2012 г.	лв.
1	София-град	Красно Село	Дойран 110кV	3 768,46	340 744
2	Благоевград	п/ст Банско	Тр. 1 - I с.20 kV	1 259,52	113 886
3	София-град	Хаджи Димитър	Зенит-110 kV	324,16	29 311
4	София-град	София Изток	Тр1-35кV	130,52	11 802
5	Благоевград	п/ст Банско	Тр. 2 -III с. 20 kV	129,48	11 708
6	София-град	Камбаните	Тр1-20кV	91,08	8 235
7	Кюстендил	Бабино	Тр2-20	90,16	8 152
8	Благоевград	п/ст Банско	Тр. 1 - II с. 20 kV	69,57	6 291
9	София-град	София Юг	Железница-110 kV	45,87	4 147
10	Кюстендил	Бабино	Тр1-20	30,99	2 802

Веднага се забелязва, че присъединенията са най-голямо количество отдадена реактивна енергия са КЕЛ 110 kV „Дойран” и п/ст „Банско”.

Както се вижда от диспечерската схема (фиг.4) КЕЛ „Дойран” работи на репер в п/ст „Хиподрума” от страната на п/ст „Красно село”. За отбелязване е, че за КЕЛ „Руски”, който е с подобна дължина (2,9 км) и по същият начин е на репер в п/ст „Център” не се регистрира такова количество отдадена реактивна енергия в електропреносната мрежа на НЕК ЕАД. Видно е, че захранващата схема и на двата КЕЛ е една и съща – от п/ст „Юг” през двойни ВЕЛ съответно („Боерица” и „Камен дел” до п/ст „Красно село”) и („Павлово” и „Бистрица” до п/ст „Рила”).

Единствената разлика в тези две схеми е собствеността на двете подстанции, което определя точката на търговско измерване на ел.енергия. Тъй като п/ст „Красно село” е собственост на НЕК ЕАД, то точката на измерване е от страната на КЕЛ „Дойран”. В този случай отдадената от електропровода реактивна енергия няма как да бъде компенсирана от активна енергия, тъй като тази точка липсва поток на активна мощност.

Обратно, тъй като п/ст „Рила” е собственост на ЧЕЗ Разпределение България АД, то средствата за търговско измерване на ел.енергия са от страната на двата ВЕЛ, които са собственост на НЕК ЕАД. Сега обаче активната ел.енергия консумирана от подстанцията компенсира отдадената реактивна енергия от КЕЛ „Руски”.



Фиг.4.

3. Заключение

1. Необходимо е да се промени наредбата като се отразят такива и други характерни случаи, при които се получава неправомерно заплащане на реактивна енергия.
2. За компенсиране на използваната реактивна енергия се препоръчва въвеждане в експлоатация на компенсиращи устройства;
3. Препоръките направени в този материал доведоха до излизането на **НАРЕДБА № 1 от 18 март 2013 г. за регулиране на цените на електрическата енергия**

ЛИТЕРАТУРА

[1] ***"Наредба №7за регулиране на цените на електрическата енергия" в сила от 05.06.2012 г.***

[2] ***НАРЕДБА № 1 от 18 март 2013 г. за регулиране на цените на електрическата енергия***

Автори: д-р инж. Валентин Генов Колев – доцент в катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vkolev@tu-sofia.bg*; инж. Борислав Бойчев – гл. асистент в катедра „ЕСЕОЕТ” Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *bojchev@gmail.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. С. Гунински

ОЦЕНКА НА ВЛИЯНИЕТО НА ВЪЗОБНОВЯЕМИТЕ ИЗТОЧНИЦИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ ВЪРХУ РАБОТАТА НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНАТА СИСТЕМА

Валентин Колев, Цветелина Богоева - Виткова

Резюме: *Присъединяването на възобновяеми източници на ел.енергия използвайки вятъра и слънцето като първична енергия поставя нови предизвикателства към електрическите мрежи на преносните и разпределителните предприятия. Отговорността за покриване измененията на генериращите мощности от ВЕИ в денонощен разрез е възложена на големите водноелектрически и помпено акумулиращи централи. В настоящия материал е разгледано влиянието на източниците на електрическа енергия от ВЕИ и ролята на големите ВЕЦ и ПАВЕЦ при управлението на електроенергийния баланс на страната.*

Ключови думи: *възобновяеми източници на електрическа енергия, водноелектрически централи и помпено акумулиращи централи*

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF RENEWABLE SOURCES OF ELECTRICITY ON THE WORK OF ELECTRICAL POWER SYSTEM

Valentin Kolev, Cvetelina Bogoeva

Abstract: *Accession of renewable electricity using wind and solar as primary energy brings new challenges to the electricity networks of transmission and distribution businesses. Responsibility for the climate of the generating capacity from renewable energy sources in the clock section is assigned to the largest hydroelectric and pumped storage power plants. This paper has discussed the influence of sources of electricity from renewable energy sources and the role of large WPP and the management of the energy balance of the country.*

Keywords: *renewable energy sources, hydro and pumped storage plants*

1. Въведение

Структурата на електропроизводствените мощности в страната предполага като базови мощности да се използват АЕЦ Козлодуй и кондензационните електроцентрали на въглища. Отговорността за покриване измененията на товара в денонощен и сезонен разрез е възложена на големите водноелектрически и помпено акумулиращи централи. В настоящия материал е разгледана ролята на големите ВЕЦ и ПАВЕЦ при управлението на електроенергийния баланс на страната и перспективите за развитие на водноенергийния сектор.

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

ISSN 1311-0829

Основната цел при управлението на електроенергийната система е поддържането на баланс между производството и потреблението за период от няколко секунди до години напред. Това налага осигуряване на необходимите резерви и системни услуги от електрическите централи при управлението в реално време; краткосрочно (часове, дни) и средносрочно (седмици, месеци) планиране работата на електроенергийната система, както и разработване на дългосрочни (години, десетилетия) планове за развитие на електроенергийната система.
Основните балансиращи и регулиращи мощности в електроенергийната система на България са големите водноелектрически централи. Участието им в резервирането и предоставянето на системни услуги, както и при фазата на планиране, е подчинено на изключително много ограничителни условия като: приоритетност на електропроизводството съгласно Закона за водите; годишен ход на притоците; технически характеристики и маневреност на хидротехническите съоръжения и на хидроагрегатите; необходимост от балансиране, регулиране и резервиране на електроенергийната система и др.

2. Изложение

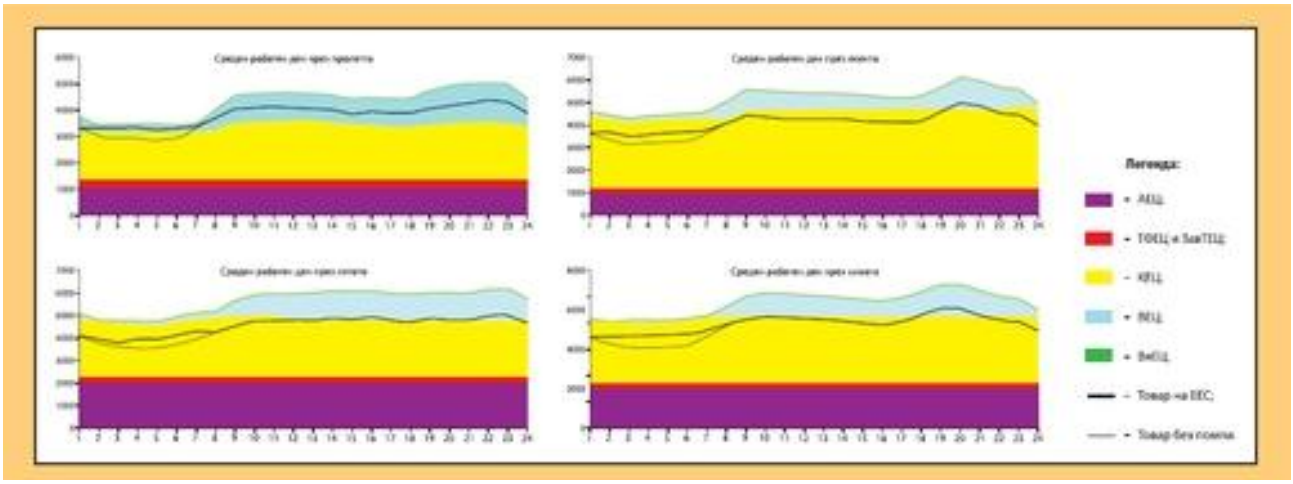
Както всички конвенционални централи, водноелектрическите предоставят пълния набор от резерви и системни услуги за електроенергийната система, а именно: участие в първично и вторично регулиране, предоставяне на бърз третичен резерв, регулиране на напреженията в електропреносната мрежа, стабилизиране на местните и междусистемните колебания на активната мощност, автоматично бързо разтоварване при повишаване на честотата; участие в коридори за възстановяване след системна авария, работа в островен режим и ресинхронизация към електроенергийната система.

За разлика от кондензационните централи, водноелектрическите предоставят и допълнителни услуги като: пускане без външно захранване на собствените нужди и захранване на останалата без напрежение част от електропреносната мрежа, работа в режим на групово управление по активна или реактивна мощност с пропорционално разпределяне на мощността между работещите агрегати спрямо номиналната им мощност и работа в режим на групово управление по напрежение или честота (при островен режим). Освен това поради естеството на мощностите у нас през първите 5-8 часа ролята на студен резерв играят водноелектрическите централи, след което се включва мобилизираният студен резерв в кондензационните централи.

Участие в покриване на денонощната товарова диаграма

Особено важна е ролята на ВЕЦ при покриване на денонощната товарова диаграма. Поради термичните процеси циклите пускане и спиране на блоковете в кондензационните електроцентрали са тежки за самите съоръжения. Увеличаването на броя на тези цикли води до повишаване на аварийността на агрегатите, а това е недопустимо в рамките на един ден с изключение на аварийни ситуации.

За разлика от кондензационните централи, при водноелектрическите термичните процеси са сведени до минимум и това позволява няколкократното им пускане и спиране в рамките на деня. Именно поради тези причини кондензационните централи се използват основно като базови, а ежедневното изменение на товара се покрива от ВЕЦ и ПАВЕЦ. На фиг.1 е илюстрирано покриването на денонощната товарова диаграма от различните видове електрически централи през различните сезони.



Фиг.1. Структура на електроенергийните мощности при покриване на денонощната товарова диаграма през различните сезони

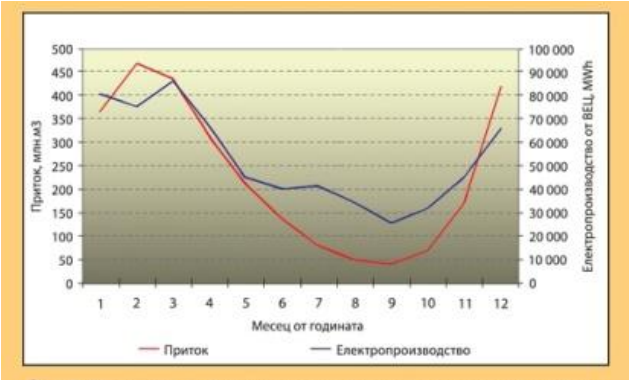
От нея е видно, че структурата на различните видове производствени агрегати принципно не се изменя според сезона при покриване на електрическия товар. Съществена е ролята на ПАВЕЦ, които през малките часове на денонощието компенсират „тромавостта" на кондензационните централи.

По време на пролетното пълноводие се диспечира увеличено електропроизводство от ВЕЦ с цел избягване на изпускане на енергийно непреработени води. Същото може да се получи и при много влажни години, каквито бяха последните 5 години и особено 2010 година, която беше рекордна за цялата история на водната енергетика. Това налага при нормално потребление в страната да се търсят възможности за икономически изгоден износ на електроенергия към съседни държави.

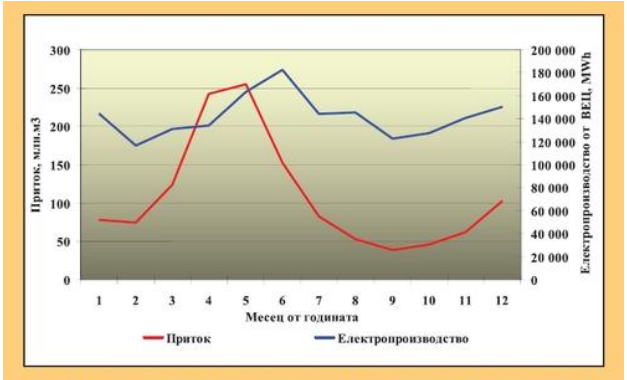
През летния сезон работата на ВЕЦ е изцяло подчинена на графиците за напояване, питейно и промишлено водоснабдяване, както и на екологичните нужди за овлажняване на речните корита. В зависимост от климатичните условия през зимния и есенния сезон ВЕЦ работят за покриване на електрическите товари.

Средносрочно планиране работата на ВЕЦ

Средносрочното планиране на работата на ВЕЦ се основава преди всичко на годишния ход на притоците през периода зима-пролет. Това е видно от фиг.2 и фиг.3.



Фиг.2. Корелация между усреднените месечни притоци и електропроизводството от ВЕЦ за каскада „Арда“ за периода 2980-2010 г.



Фиг.3. Корелация между усреднените общи месечни притоци и електропроизводства от ВЕЦ за каскади „Белмекен“, „Баташки водносилов път“ и „Доспат-Въча“ за периода 1980-2010 г.

Каскада Арда е отделена от останалите каскади, тъй като нейните притоци са повлияни от средиземноморския климат. Поради тази причина притоците по р. Арда са основно през зимния период. Този факт, заедно с релефните особености на водосборния басейн на реката, налага усилена работа на ВЕЦ през зимата с цел недопускане на енергийно непреработени води. За разлика от останалите каскади електропроизводството от ВЕЦ към каскада Арда следва изцяло годишния ход на притоците. Това се дължи на факта, че от каскадата не се използват води за напояване.

При останалите каскади притоците са основно през пролетния период. Това се дължи на влиянието на континенталния климат и по-високата надморска височина. Поради тази причина се налага предварително освобождаване на достатъчно оптимален свободен обем в язовирите преди пролетното пълноводие чрез електропроизводство от ВЕЦ, което съвпада с повишените енергийни нужди през зимата. Друга цел е достигане на максимални обеми в края на пролетта с цел осигуряване на води за напояване през летния сезон.

Планове за развитие

Електропроизводството от ВЕЦ се основава на възобновяемия енергиен източник вода. Европейските политики за насърчаване на възобновяемите енергийни източници чрез законодателни инициативи и финансови инструменти очертават добри перспективи за водната енергетика. В България възможностите за изграждане на водноелектрически обекти са основно по отношение на малките водноелектрически централи.

Единствените перспективи за големи ВЕЦ, участващи в балансирането и регулирането на електроенергийната система, се изчерпват с каскада Горна Арда и евентуално хидроенергийните комплекси по р. Дунав. Изграждането на последните ще зависи от технико-икономическите, социалните и екологични оценки, съчетани с междуправителствени договори и осигуряване на значителен финансов ресурс.

Съгласно изискванията на чл. 16, ал. 2 на Директива 2009/28/ЕО държавите-членки гарантират, че при диспечиращите електрогенериращи инсталации операторите на преносните системи дават приоритет на тези инсталации, които използват възобновяеми източници на енергия, доколкото това се позволява от сигурната експлоатация на националната електроенергийна система.
Освен ВЕЦ към мощностите с приоритетно производство се числят високоефективните когенерации и ВЕИ (ВяЕЦ, фотоволтаици, биомаса и др.). С изключение на ВяЕЦ всички останали мощности са в състояние да следват денонощния ход на товаровата диаграма. За сметка на това ВяЕЦ имат най-голям прогнозен дял сред централите с приоритетно производство.
Непостоянството на първичния енергиен ресурс на ВЕИ, и по-специално на ВяЕЦ, води до проблеми с поддържане баланса между производството и потреблението.

До 2015 година ще бъдат изведени от експлоатация ТЕЦ Варна, ТЕЦ Бобов дол, ТЕЦ Марица 3 и ТЕЦ Русе-блок 4, които понастоящем участват в поддържане баланса между производството и потреблението в денонощен разрез.

Перспективите са тяхното производство да бъде заместено от това на ТЕЦ Марица изток 1 и ВЕИ. Ако проектираните вятърни, водни и атомни агрегати са нерегулируеми, управляемостта на ЕЕС ще бъде нарушена. Възниква необходимост от предприемане на алтернативни решения. По отношение на водноелектрическите централи те са:
- Агрегатите от каскада Горна Арда да работят в помпено-акумулиращ режим;
- Доизграждане на язовир Яденица и свързващия тунел с язовир Чаира с цел повишаване продължителността на непрекъсната работа на ПАВЕЦ Чаира в помпен и генераторен режим;
- Като допълнителна мярка към гореспоменатите решения е преминаването на малките ВЕЦ с горен изравнител под централизирано диспечерско управление от ЕСО чрез операторите на разпределителните мрежи, което да се регламентира в законодателната рамка. Тази мярка изисква малко инвестиции, но предполага непреработени първични ресурси в малките часове на денонощията през пролетния сезон и намалена използваемост на инсталираните мощности.

Изборът на някоя от гореспоменатите мерки или комбинация от тях в съчетание с други конвенционални решения е въпрос на технико-икономически анализ, съобразен с развитието на електроенергийния пазар в страната и региона.

Нарастването на дела на ВЕИ ще засили ролята на ВЕЦ

Нарастването на дела на възобновяемите енергийни източници ще засили ролята на водноелектрическите и помпено-акумулиращите централи при овладяване на флуктуациите в електропроизводството на ВяЕЦ. Това обаче ще трябва да бъде съчетано с интересите на останалите водоползватели от големите комплексни язовири, което значително усложнява решението на целевата функция за оптимално използване на водите. В тази връзка ЕСО е създало и продължава да

създава достатъчен технически и човешки потенциал за управлението на ВЕЦ. Използвайки научния потенциал в НИМХ, ЕСО инвестира в изграждането на мрежа от дъждомерни и хидрометрични станции по водосборните басейни на основните каскади в страната с цел по-точно прогнозиране на притоците. През 2010 година беше внедрена системата Scheduling Application на фирмата Siemens, която позволява оптимално диспечиране на ВЕЦ при значителен обем ограничителни първоначални условия.

Към месец януари 2013 година инсталираните мощности от ФЕЦ на територията на България надхвърлиха 1000 MW. Видно е и увеличението на мощностите от ВяЕЦ, които достигнаха 670 MW. При така създадената ситуация възникват множество мрежови проблеми, появяват се и такива свързани с овладяването на баланса между производството и потреблението в електроенергийната система. В табл.1 и табл.2 са показани инсталираните мощности от ФЕЦ и ВяЕЦ.

В табл.3 е направено сравнение на електроенергийния баланс за две характерни години.

За да бъдат конкретизирани проблемите, свързани с управлението на ЕЕС на България ще бъде разгледан изминал период от време (09.03.2013 г. – 10.03.2013 г.), характеризиращ се с високи стойности на среднодневните температури. Те, в съчетание с нарастването на светлата част от денонощието, водят до многократно увеличение на електропроизводството от ФЕЦ.

Табл.1.

Инсталирана мощност MW			
ФЕЦ	2011 г.	2012 г.	Прираст %
Преносна мрежа	22	275	1152%
Разпределителна мрежа, в т.ч.	132	737	459%
ЧЕЗ	24	141	483%
ЕВН	84	501	497%
Енерго-Про	24	96	302%
Общо:	154	1013	558%

Табл.2.

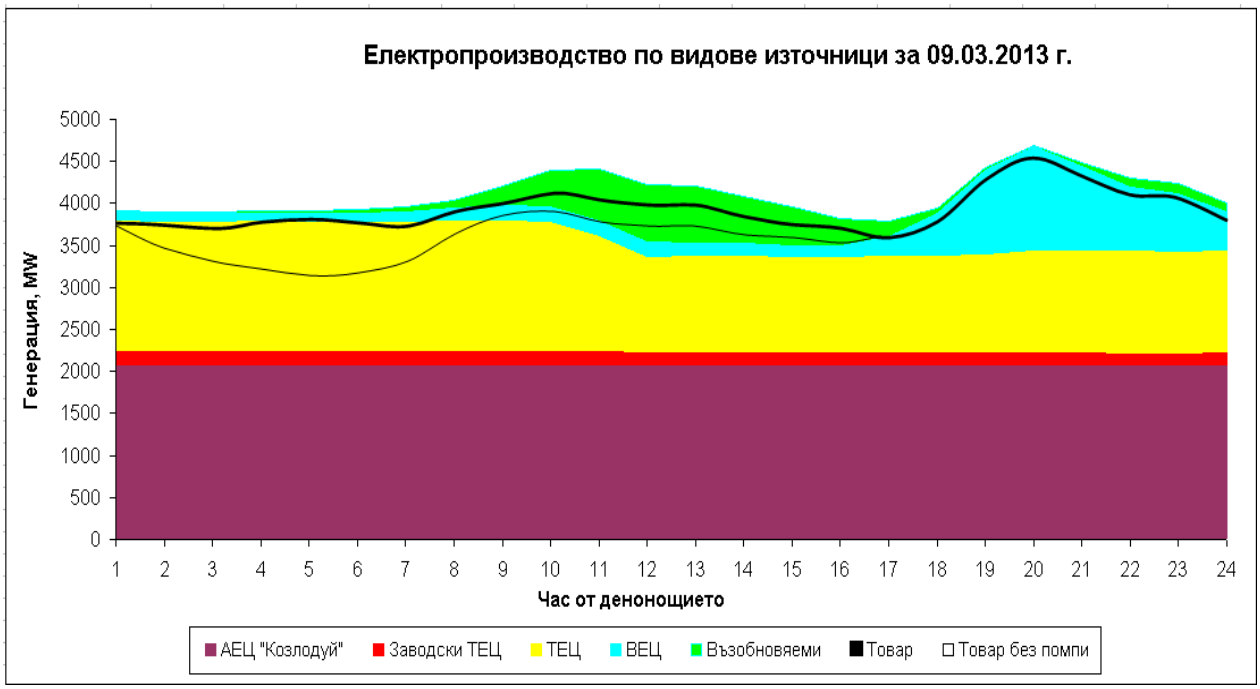
Инсталирана мощност MW			
ВяЕЦ	2011 г.	2012 г.	Прираст %
Преносна мрежа	241	358	48%
Разпределителна мрежа, в т.ч.	275	319	19%
ЧЕЗ	9	18	95%
ЕВН	30	38	95%
Енерго-Про	237	263	11%
Общо%	516	677	31%

В табл.3. е показано електропроизводството от ВяЕЦ, ФЕЦ и Биомаса.

Табл.3.

/MWh /	**Януари 2012**	**Януари 2013**	**Прираст, %**
ВЕИ в преносна мрежа:	**66 518**	**103 203**	**55.15**
ВяЕЦ	65 358	87 047	33.18
ФЕЦ	1 160	13 594	1071.90
Биомаса	0	2 562	
ВЕИ в разпределителна мрежа, в т.ч.:	**84 071**	**119 500**	**42.14**
ВяЕЦ	75 760	82 749	9.23
ФЕЦ	8 279	36 448	340.25
Биомаса	32	303	846.88

На фиг.4 е показано изменението на електропроизводството по видове източници за един характерен ден (09.03.2013 г.), при който се вижда негативното влияние на генериращите източници от ВЕИ. Както се вижда от показаната графика в по-голямата част на денонощието има излишък на мощност и енергия, за което време се налага работа на ПАВЕЦ в помпен режим. Друг начин за овладяване на режима по мощност е да бъдат спирани някои от кондензационните блокове, но това би струвало повече и води до намаляване на надеждността на оборудването в термичните централи.



Фиг.4. Работа на ЕЕС на 09.03.2013 г.

3. Заключение

- Въз основа на изнесеното в настоящия доклад може да се заключи, че наличието на "тромави" електропроизводствени мощности (основно КЕЦ и АЕЦ) в структурата на електроенергийната система и перспективите за развитие на ВяЕЦ предопределят големите ВЕЦ в страната като неин основен настоящ и бъдещ "балансьор";
- Широкият диапазон на изменение на производството от ФЕЦ в денонощен разрез води до появата на изключително тежки проблеми при овладяването на минималните товари;
- Нерегулируемите производствени мощности като: АЕЦ с 2050 MW, централи с комбиниран цикъл на производство – топлофикации с 350 MW и заводски централи със 160 MW, както и малки ВЕЦ – 120 MW представляват около 80% – 82% от реализирания минимален товар през разглежданите два почивни дни;
- Ограничаване на производството от термични централи за този период води до създаване на трудности по отношение на осигуряване на резервни мощности за покриване на върховия товар;
- Съвкупността от всички тези фактори води до намаляване на резерва за вторично и третично регулиране надолу, особено през периода на нощен и следобеден минимум на товара;
- Очакваният минимален товар е 2650 MW;
- Очаквано многоводие от пролетното снеготопене и евентуални дъждовни притоци;
- Намален износ на електроенергия;
- Тези три фактора създават предпоставки за трудното овладяване на минималните режими на ЕЕС на България, особено преди плановото спиране за ремонт и презареждане на основно гориво на блок 1000 MW в АЕЦ “Козлодуй”;

Литература

[1] План за развитие на електропреносната мрежа на РБългария

[2] Национален план за действие с енергията от възобновяемите източници

[3] *http://www.tso.bg/*

Автори: д-р инж. Валентин Генов Колев - доцент в катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vkolev@tu-sofia.bg*; маг. инж. Цветелина Богоева, гл. асистент в катедра „ЕСЕОЕТ” Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *tbogoeva@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. А. Цолов

3D ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ВИЗУАЛИЗИРАНЕТО НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ И ТОПЛИННИ ПОЛЕТА

Валентин Матеев, Георги Кацаров, Илиана Маринова

Резюме: *В тази статия е разработена и приложена иновативна методика за 3D визуализация, приложима при анализа на магнитни и топлинни полета. Методиката дава възможност да бъдат обработвани и визуализирани данни получени чрез моделиране с програмния пакет за анализ с метода с крайни елементи ANSYS или чрез непосредствено наблюдение с помощта на оптична или инфрачервена камера. Показани са резултати за топлинно и магнитно поле на електромагнитен изпълнителен механизъм. Количествено са оценени ефекта от зрителното възприятие и качеството на изображението. Направени са препоръки за подобряване на процеса на 3D визуализация.*

Ключови думи: *3D технологии за визуализация, електромагнитно поле, топлинно поле, анализ на електромагнитни и топлинни полета.*

3D TECHNOLGIES FOR VIZUALISATION OF ELECTROMAGNETIC AND TERMAL FIELDS

Valentin Mateev, Georgi Katsarov, Iliana Marinova

Abstract: *In this article is developed and applied an innovative method for 3D visualization, applicable for the analysis of magnetic and thermal fields. It enables to process and visualize data, accumulated through creating a model with the program package for analysis with the finite element method ANSYS or through direct observation with the help of an optical and infrared camera. Results for the magnetic and thermal fields of an electromagnetic actuator are shown. Quantitative analysis of the effect of the visual perception and the quality of the image is made. Recommendations for improvement of the process of 3D visualization are made.*

Keywords: *3D visualization, electromagnetic fields, thermal fields.*

1. Въведение

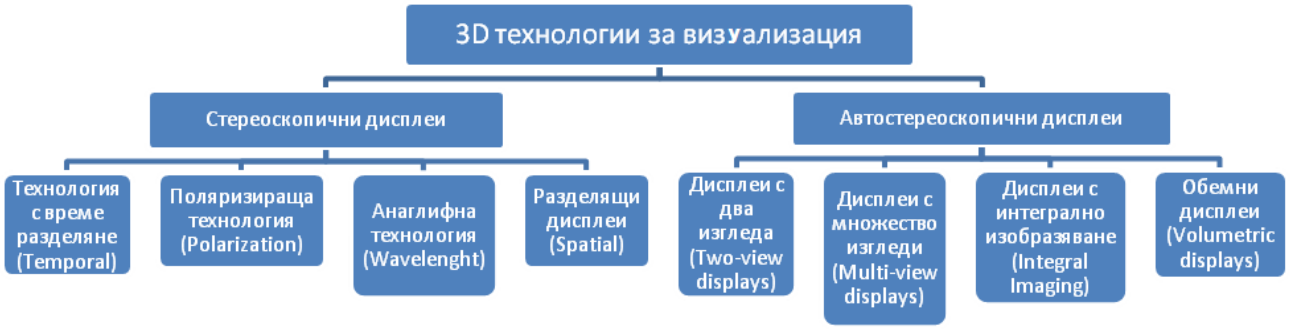
Визуализацията и анализа на данните за магнитните и топлинните полета са много важни аспекти от инженерната дейност. В последно време се наблюдава тенденция за нарастване на интереса към 3D технологиите и по-специално към 3D визуализацията. Първоначално измислена като средство за забавление, днес 3D визуализацията и 3D моделирането са в основата на всеки проект, имащ нужда от представяне под достъпна за възприемане форма.

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

ISSN 1311-0829

Един от най-разпространените методи за анализ и визуализация на магнитни и топлинни полета е методът на крайните елементи. Получените от конкретен програмен пакет (напр. ANSYS) данни, трябва да бъдат достъпно визуализирани. Друг метод за получаване на информация за топлинните полета е заснемането с инфрачервена камера, която все по-успешно се налага във функцията на мощен диагностичен инструмент за поддръжка на съоръжения от различни инженерни области.

3D технологиите за визуализация разчитат на създаването на илюзия за наличие на реален пространствен обект. Заобикалящите ни тела заемат определен обем в пространството. От устройството на окото е ясно, че те се проектират върху повърхността на ретината. Полученото изображение е плоско (двумерно). Двете очи на човека са разположени средно на разстояние 65mm, което довежда до получаването на две леко различни изображения, по едно от всяко око. Именно тази разлика дава на мозъка необходимата информация за да изчисли дълбочината на изображението, което съответства на даден триизмерен обект. Съществуват множество технологии за 3D визуализация, като всички те се стремят да решат един фундаментален проблем, а именно как да насочат различни картини към лявото и дясното око на зрителя, които впоследствие да бъдат обработени от човешкия мозък и обединени в едно. Решаването на този проблем чрез различните оптични технологии за насочване на светлината е довело до множество дизайни на 3D дисплеи, като всички те спадат към две обширни категории: стереоскопични и авто-стереоскопични. При стереоскопичните дисплеи от зрителя се изисква да носи филтриращи очила с цел да се разделят лявото и дясното изображение и всяко от тях да се вижда с правилното око докато автостереоскопичните дисплей осигуряват възможността всяко око да вижда правилното изображение автоматично, без да е нужно зрителя да носи филтриращи очила. [1-5]

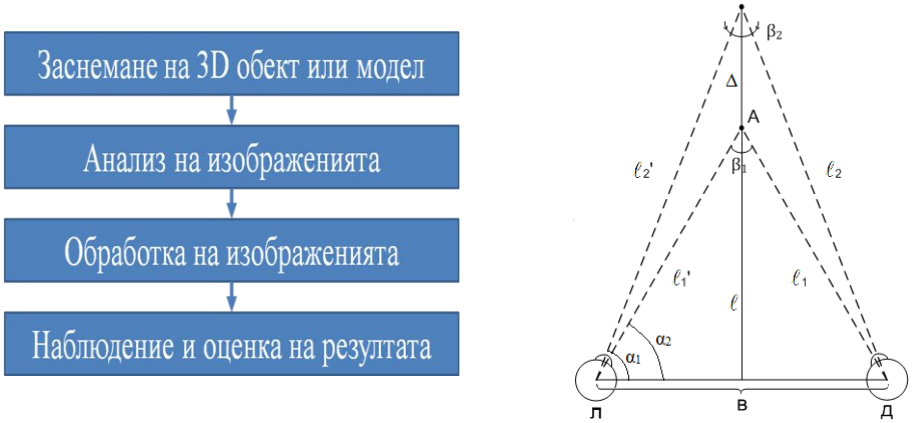


Фиг.1. Класификация на съществуващите 3D технологии

В тази статия е разработена и приложена иновативна методика за 3D визуализация, приложима при анализа на магнитни и топлинни полета. Ме-тодиката дава възможност да бъдат обработвани и визуализирани данни получени чрез моделиране с програмния пакет за анализ с метода с крайни елементи ANSYS 12.1 или чрез непосредствено наблюдение с оптична или инфрачервена камера FLIR i40 [7].

2. Методика за 3D визуализация

Създадената методика за 3D визуализация на изображения е комплексен процес с множество специфични особености, който може да бъде разделен на четири главни етапа, както е показано на фиг.2.а.



(а) (б)

Фиг.2. Блок-схема на разработената 3D методика за визуализация (а) и формиране на представа за дълбочина при стереоскопично зрение (б)

Четирите главни етапа на разработената методика са като следва: заснемане на реален 3D обект или модел - получаване на двойка изображения, анализ на получената двойка изображения, обработка на изображенията и накрая количествена оценка на получения резултат.

Най-важният елемент от разработената методика за заснемане и визуализиране на обекта е изчисляването на хоризонталния диференциален паралакс, разстоянието и завъртането между двете гледни точки (фиг.2.б). При обект разположен в средата на зрителното поле и отдалечен на разстояние ℓ (фиг.2.б), можем да запишем

$$\begin{vmatrix} \ell_1 = \ell_1^I = \dfrac{B}{2}\cos\alpha_1 \\ \ell_2 = \ell_2^I = \dfrac{B}{2}\cos\alpha_2 \end{vmatrix}, \tag{1}$$

От (1) определяме ъглите на завъртане на двете гледни точки, необходими за формиране на зрителна представа за обект с дълбочина Δ, или

$$\begin{vmatrix} \alpha_1 = \arccos\left(\dfrac{2\ell_1}{B}\right) \\ \alpha_2 = \arccos\left(\dfrac{2\ell_2}{B}\right) \end{vmatrix}. \tag{2}$$

Стойността на ъгъла на завъртане на гледната точка α при заснемане на изображенията е

$$\alpha = \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right). \tag{3}$$

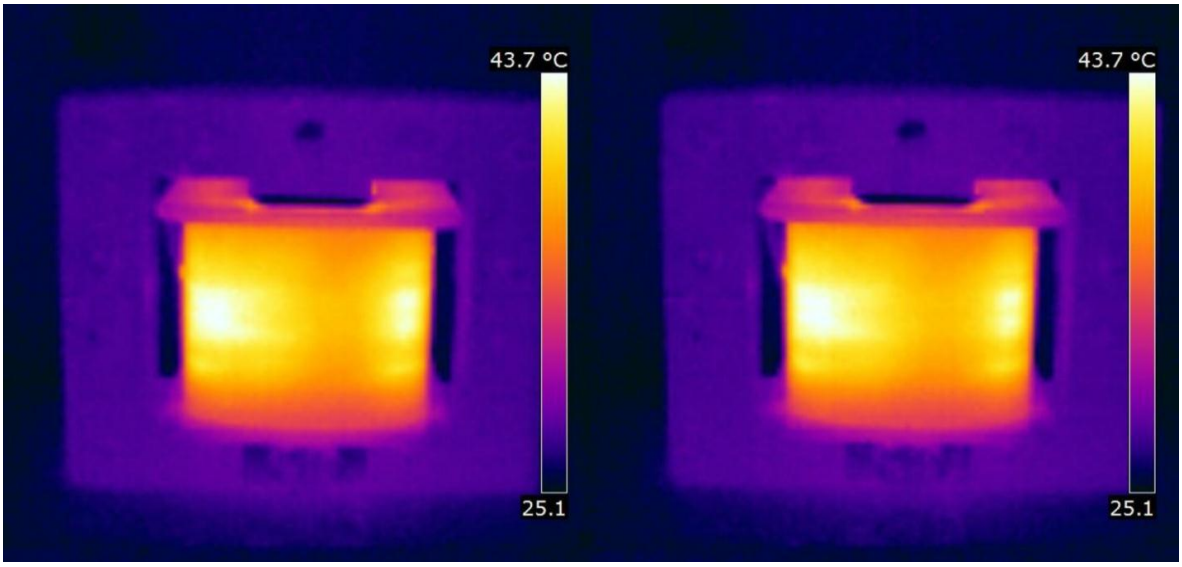
Необходимото разстояние между двете гледни точки B при заснемане се определя от

$$B = 2\ell \frac{\cos \beta_1}{\cos \alpha_1} = 2(\ell + \Delta) \frac{\cos \beta_2}{\cos \alpha_2}. \quad (4)$$

Към заснемането на 3D обект или модел спада изборът на подходящ фон, на който той да бъде заснет. За получаване на добър 3D ефект обектът и фонът трябва да са стационарни, а при използването на инфрачервена камера също така и с установена температура. Хоризонталното разстояние ***B*** между гледните точки на двете изображения трябва да е в диапазона от 20 до 40 mm за метър разстояние до обекта. След преминаването на този диапазон се наблюдава размазване и раздвояване на картината заедно с трудности при фокусирането и голямо натоварване на очите на зрителя. Добре е фокусната точка да бъде избрана във вътрешността на обекта и дълбочината на изображението да надвишава 1,5 пъти реалната дълбочина на обекта.

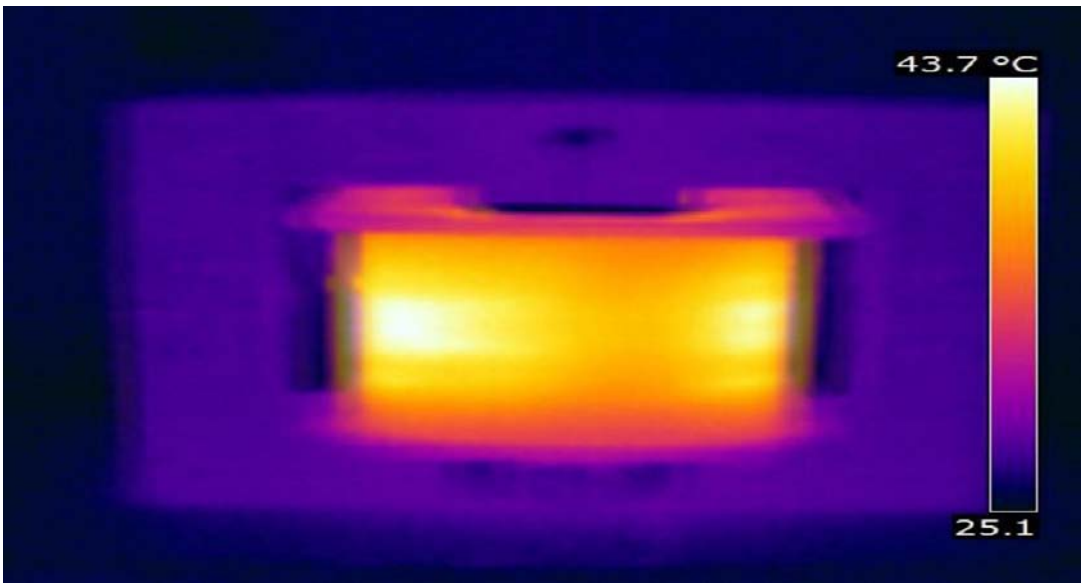
Изображенията, получени от първия етап се анализират и обработват, като се оценява и променя разделителната способност на получената двойка изображения. При обработката двойките изображения биват обединявани в едно с подходящи пропорции и разделителна способност. За най-добър 3D ефект изображенията трябва да са с максималната разделителна способност за използваната система за 3D визуализация или 1920x1080 пиксела. Полученото изображение, готово за 3D визуализация посредством линейна поляризация трябва да изглежда по следния начин, фиг.3.

При използване на инфрачервена камера като средство за получаване на изображенията, те се обработват със софтуерния продукт Flir Quick Reporter [7].



Фиг.3. Изображение готово за 3D визуализация

Наблюдението и оценката на резултата е изключително важен етап. Зрителят трябва да е разположен централно пред системата за 3D визуализация и да носи линейно поляризирани очила. Избраната система за 3D визуализация е LG42LW5400 [4].



Фиг.4. 3D Инфрачервена снимка на изследвания електромагнит.

3. Резултати

Обектът, избран за тестване на методиката за 3D визуализация е двойно „Ш“ - образен електромагнит за задвижване. Общ вид на електромагнита може да бъде видян на фиг.6. За електромагнита са направени визуализации със снимки от оптична (фиг.6) и инфрачервена камера (фиг.4), също от реализиран 3D геометричен модел в програмата ANSYS 12.1, както и резултати от топлинни (фиг.9) и магнитни модели (фиг.8), представени като разпределение на вектори и еквипотенциални контури.

Обработката на изображенията е реализирана със специално създадено Python [8] приложение, извършващо описаните функции по преобразуване и съчетаване на изображенията. За автоматично получаване на двойки изображения в програмата ANSYS е реализирана Ansys Parametric Design Language (APDL) скриптова програма [6]. Програмата дава възможност за автоматично изчисляване и коригиране на координатите и посоките на необходимите две гледни точки, разстоянието до обекта, перспективата на пространството и др.

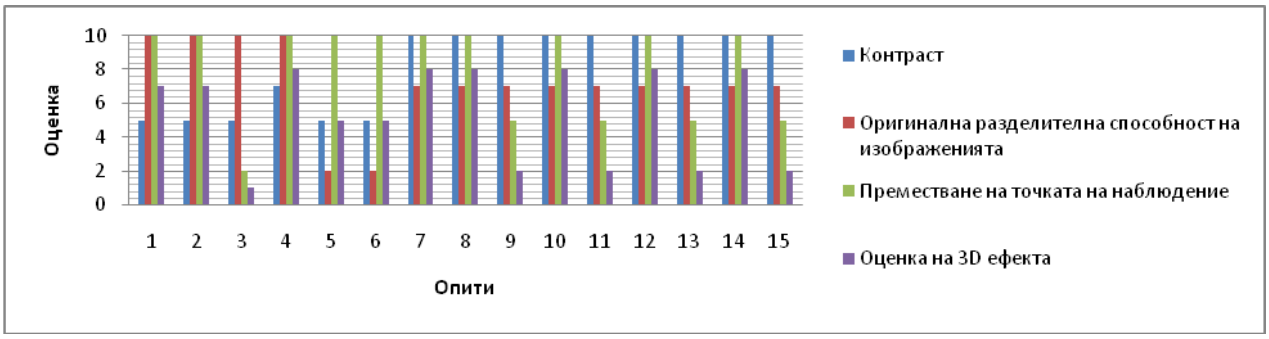
С разработената методика са получени 15 варианта на 3D стереоскопични изображения. Оценени са факторите влияещи на качеството на получения 3D ефект. Откроени са три главни фактора влияещи на 3D визуализацията. Това са преместването между двете снимки, контрастът между фона и заснемания обект и разделителната способност на отделните изображения.

- Преместването между двете снимки. При оптичните и инфрачервените снимки ясно се вижда, че с увеличаване на преместването на фотоапарата (камерата) между двете снимки се получава подобряване на 3D ефекта, но също така изображенията стават по-трудни за фокусиране и причиняват дискомфорт на наблюдателя. Същото се наблюдава и при модела в ANSYS 12.1, с увеличаването на преместването се увеличава 3D ефекта до момента, в който започва да се забелязва размазване, разделяне на картината и проблеми при фокусирането на очите и причиняване на дискомфорт на наблюдателя.

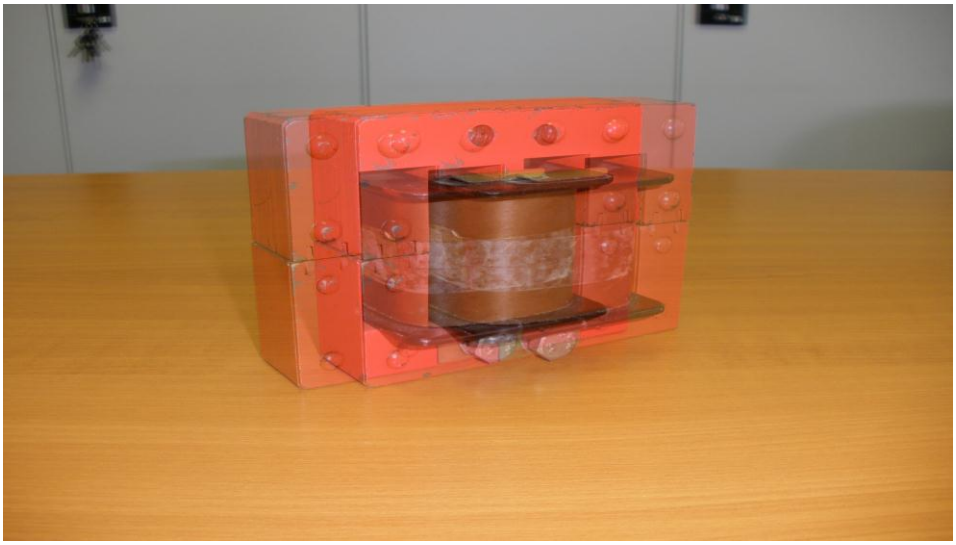
- Контрастът между фона и заснемания обект. От снетите оптични, инфрачервени и ANSYS изображения се вижда, че контраста оказва голямо влияние върху качеството на 3D ефекта. В голяма част от случаите контрастът на заснемания обект с фона не може да се промени защото обектът е стационарен - неподвижен.
- Разделителната способност на двойката изображения. Високата разделителна способност е от голямо значение за постигане на добър 3D ефект. Това се вижда при всички направени снимки. Качеството на 3D ефекта при инфрачервените снимки може да се подобри със заснемането с инфрачервена камера с по-голяма разделителна способност, например FLIR E-Series с разделителна способност 320x240 пиксела, докато FLIR i40 е с разделителна способност 120x120 пиксела [7].

Освен тези три фактора се забелязва, че хора гледали 3D и преди фокусират и разпознават 3D ефекта по-бързо от такива, които не са имали допир до тази технология. Забелязването на 3D ефекта е по-лесно при наличие на светлосенки върху обекта. Субективните фактори при изследването са оценени с формирането на целева група от наблюдатели.

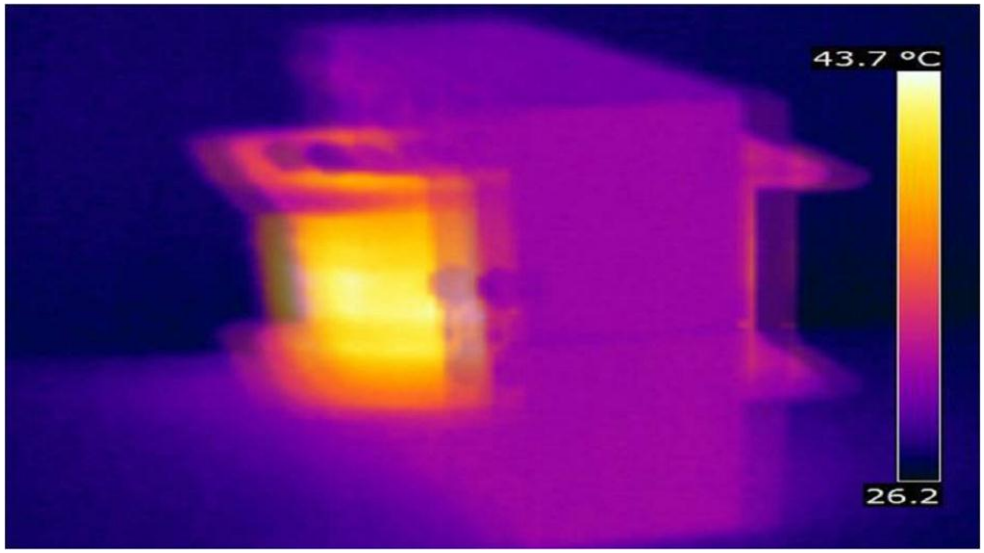
Резултатите от направените опити са показани на фиг.5. По абсцисата са нанесени 15 от опитите, а по ординатата са представени четирите главни фактора влияещи на качеството на 3D ефекта, които са остойностени за всеки един опит с оценка 0 до 10.



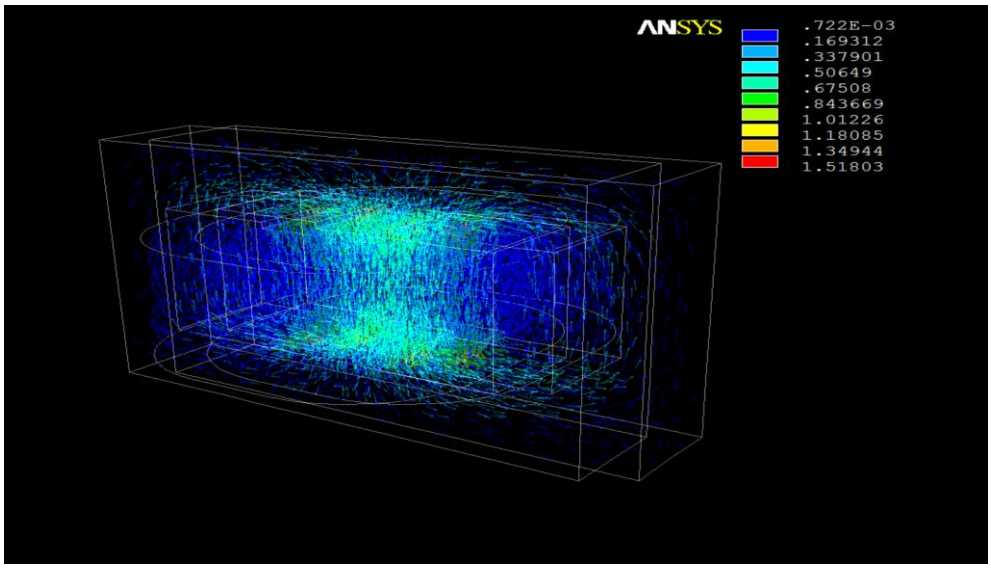
Фиг.5. Оценка на получените резултати при варианти от 1 до 15



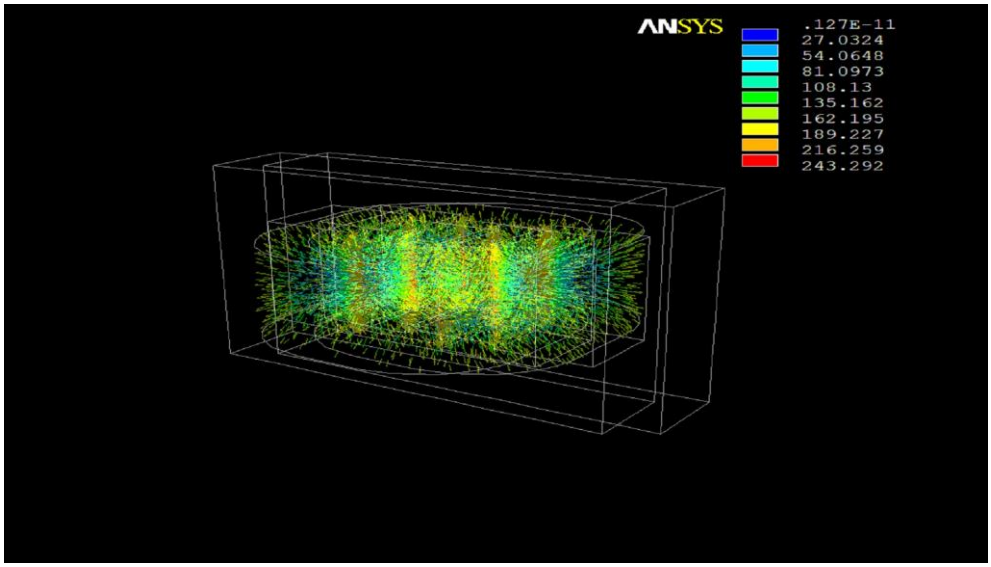
Фиг.6. Оптична снимка на изследвания електромагнит



Фиг.7. Инфрачервена снимка на изследвания електромагнит



Фиг.8. Вектори на магнитната индукция в изследвания електромагнит



Фиг.9. Вектори на топлинния поток в изследвания електромагнит

При визуализирането на полета, получени от моделиране с метода с крайни елементи, при което изображението е компютърно генерирано (фиг.8 и фиг.9),

са налице някои важни особености, които са отчетени в създадената методика и нейната програмна реализация. При визуализирането на векторни полета с програмата ANSYS 12.1 такива особености са: липсата на контрастен фон, позициониране на фокусната точка под повърхността на обекта поради получаващия се ефект на прозрачност, липса на светлосенки и външен източник на осветеност.

10. Заключение

Създадената методика за 3D визуализация е приложена при анализа на магнитни и топлинни полета. Методиката дава възможност да бъдат обработвани и ефективно визуализирани данни получени чрез моделиране с програмния пакет за анализ с метода с крайни елементи ANSYS 12.1 или чрез непосредствено наблюдение с оптична или инфрачервена камера FLIR i40. Направена е програмна реализация на разработената методика с използване на скриптовия език на програмата ANSYS – APDL и Python. Използвайки оптични, инфрачервени и получените от ANSYS изображения, е тествана методиката за 3D визуализация и са определени главните фактори влияещи на качеството на получените резултати. Отчетени са някои важни особености при визуализацията на специфични 3D компютърно генерирани изображения. Получените резултати доказват перспективите пред бъдещите изследвания и разработки в областта на 3D визуализацията.

Литература

[1] Съйнов В., Съйнов С. (1986), ***Изобразителна Холография***, Българска академия на науките, София 1986

[2] McNally P., Block B. (2013), ***3D Storytelling: How Stereoscopic 3D Works and How to Use It***, Focal Press 2013.

[3] Michel B., Michel C. (2013), ***Digital Stereoscopy: Scene to Screen 3D Production Workflows***, CreateSpace Independent Publishing Platform 2013.

[4] Кацаров Г. (2013), ***3D технологии за визуализация при изследване на магнитно и топлинно поле***, Дипломна работа, ТУ-София, 2013

[5] Cooper J. (2011), ***The 3D Photography Book***, Habakuk International Trade Connection Oy, 1st edition, 20 Nov. 2011

[6] Ansys Inc. (2010), ***Ansys Mechanical v12.1 Help Manual***, 2010

[7] Flir Inc. (2009), ***Flir i40 User Manual***, 2009

[8] Python Software Foundation (2013), ***Python v2.7.5 Documentation***, 2013

Автори: маг. инж. Валентин Матеев, асистент, катедра "Електрически апарати“ Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vmateev@tu-sofia.bg*; Илиана Маринова, проф. дтн инж., катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *iliana@tu-sofia.bg*; инж. Георги Кацаров, студент, катедра "Електрически апарати", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *g.katsarov@yahoo.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** проф. дтн Иван Ячев

ИЗМЕРВАНЕ НА НЕЛИНЕЙНИ ИНДУКТИВНОСТИ В УСТАНОВЕН РЕЖИМ

Васил Агапиев, Валери Иванов

Резюме: *В работата е посочена необходимостта от измерване на нелинейни индуктивности в работни условия. Описано е първоначалното изчисляване на индуктивността чрез елементарно измерване с разполагаеми уреди. За елиминиране на систематичната грешка от тяхното включване е илюстрирано приложението на теоремата на вариациите (от теоретичната електротехника) с експериментално определяне на участващите във веригата импеданси. Методиката е проиграна за реален асинхронен двигател в момент на пуск.*
Ключови думи: *Измерване на индуктивности, теорема на вариациите, импеданси на уредите.*

MEASUREMENT OF NONLINEAR INDUCTANCES IN STEADY-STATE

Vasil Agapiev, Valery Ivanov

Abstract: *In the work refers to the need to measure the nonlinear inductances in working conditions. Described is the initial calculation of inductance through the elementary measurement devices available. To eliminate systematic errors of their involvement illustrates the application of the theorem of variation (the theoretical electrical engineering) with experimental determination of participating in the chain impedances. The methodology is played out for real induction motor at the time of release.*
Keywords: *Measuring inductances, theorem of variations, impedances of devices*

1. Въведение

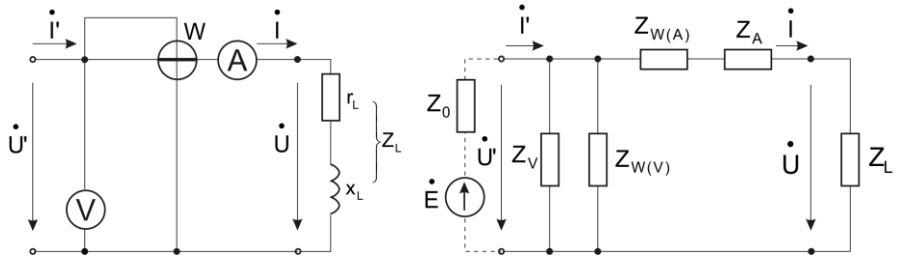
В електроизмервателната техника за определяне на собствените и взаимни индуктивности са известни различни методи, повечето от тях директни (мостови, резонансни [1]). В преобладаващия брой случаи обаче индуктивностите на реалните електрически съоръжения са нелинейни и определянето им за изчисляване на режимите следва да става в работни условия, т.е. при протичащ през тях работен ток.

Регистрирайки веднъж работния ток през бобината I (условие за точността на измерването), индуктивностите лесно могат да бъдат изчислени първо чрез измерване на напрежителния пад U върху тях (по схема V-A или A-V в зависимост от съпротивленията на уредите - фиг.1-а, 2-а), при което се определя мо-

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

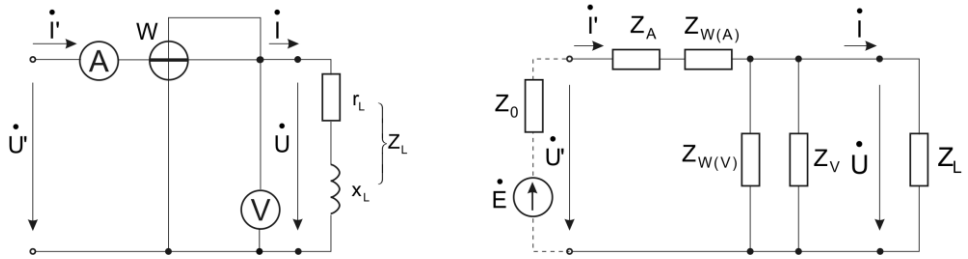
ISSN 1311-0829

дулът на импеданса $z_L = \frac{U}{I}$.



а) б)

Фиг.1. Измерване на индуктивности по V-A метод:
а - схема на измерването; б - заместваща схема



а) б)

Фиг.2. Измерване на индуктивности по A-V метод:
а - схема на измерването; б - заместваща схема

Паралелно с това от измерените с ватметъра загуби на активна мощност P_w (в намотката и магнитопровода на бобината) се изчислява еквивалентното активно съпротивление $r_L = \frac{U^2}{P_W}$, съответно и индуктивното съпротивление $x_L = \sqrt{z_L^2 - r_L^2}$, откъдето индуктивността на бобината при известна честота f е:

$$L = \frac{x_L}{\omega} = \frac{x_L}{2\pi f} \qquad (1)$$

Макар и индиректен, този метод се отличава с пределните си простота и надеждност, като за измерване на собствени индуктивности може да се прилага изцяло в работни условия, т.е. без изключване на индуктивността от работната й верига. Същевременно методът е изключително полезен за учебни цели, тъй като проиграва основни зависимости от теоретичната електротехника, затвърдява векторното представяне на величините при променливия синусоидален ток и създава трайни навици за работа с масовите измервателни уреди за напрежение, ток и мощност, преговаряйки от теорията на електрическите измервания отчитането на грешките.

Както е известно, прилагането на схема за измерване V-A или A-V е в зависимост от съотношенията между товарния импеданс и тези на уредите, т.е. за означените на фиг. 1 и 2 елементи:

при $z_A << z_L$ и $z_{W(A)} << z_L$ - схема V-A (фиг.1);

при $z_V >> z_L$ и $z_{W(V)} >> z_L$ - схема A-V (фиг.2),

където z_A и z_V са модулите на импедансите на амперметъра и волтметъра, а

$z_{W(A)}$ и $z_{W(V)}$ - модулите на импедансите на токовата и напреженовата намотки на ватметъра.

2. Методика за прецизиране на измерването

При използване на всякакъв вид електроизмервателни уреди, в редица случаи работно присъстващи в други части на веригата, систематичната грешка от уредите лесно може да бъде отчетена съгласно теоремата на вариациите [2].

Според тази теорема ако импедансът на който и да е клон от електрическата верига се измени с $\pm Z'$, то изменението на токовете във веригата ще бъде такова, каквото ще се предизвика от действието в клона $Z \pm Z'$ на е.д.н., насочено противоположно на първоначалния ток $\dot{I}$ в дадения клон и равно по модул и знак на $\pm Z' \dot{I}$.

Теоремата е удобно да бъде илюстрирана за проста електрическа верига, каквато е показаната на фиг.1-а. В случая е ясно, че волтметърът измерва не напрежението върху бобината U , а напрежението на входа U' и измереният модул на импеданса $z'_L = \frac{U'}{I}$ ще се различава от действителния $z_L = \frac{U}{I}$. При неизменно $\dot{U}'$, каквото на практика е напрежението на електрическата мрежа, измереният модул на импеданса ще бъде:

$$z'_L = \frac{U'}{I} = \left| Z_L + Z_A + Z_{W(A)} \right| \qquad (2)$$

До същия резултат следва да се стигне и с използването на теоремата на вариациите. Така ако във веригата на бобината от фиг.1.а при захранващо напрежение $\dot{U}'$ е текъл начален ток $\dot{I}_{нач}$ и импедансът на бобината е бил $Z_L = \frac{\dot{U}'}{\dot{I}_{нач}}$, след включването на амперметъра и токовата намотка на ватметъра токът във веригата намалява до стойността $\dot{I}$, измерена от амперметъра. С нарастването на съпротивлението на веригата със $\left[Z_A + Z_{W(A)} \right]$ възниква допълнителен ток $(\dot{I} - \dot{I}_{нач}) = -\dot{I}_{нач} \frac{\left[Z_A + Z_{W(A)} \right]}{Z_e}$, където Z_e е еквивалентното съпротивление на пасивната верига, включително амперметъра и токовата намотка на ватметъра – фиг. 1-б, т.е. $Z_e = Z_L + Z_A + Z_{W(A)} + Z_0 \| Z_V \| Z_{W(V)}$.

Напрежението $\dot{U}'$ е напрежение на външните клеми на източника на е.д.н. $\dot{E}$ с вътрешно съпротивление Z_0 и при достатъчно мощен източник, какъвто е електрическата мрежа, може да се приеме $Z_0 = 0$, $\dot{U}' = \dot{E}$ и импедансът $Z_0 \| Z_V \| Z_{W(V)} = 0$, откъдето $Z_e = Z_L + Z_A + Z_{W(A)}$.

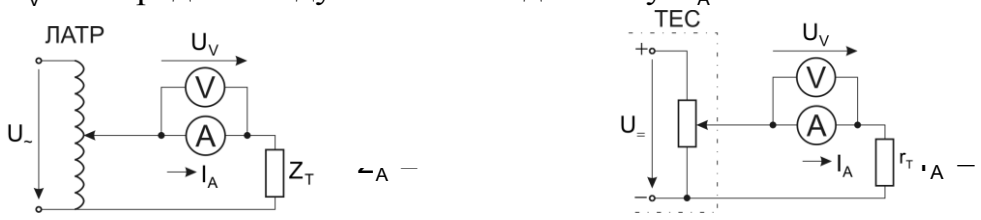
За измерения ток I се получава:

$$I = I_{нач}\left|\frac{Z_e - \left[Z_A + Z_{W(A)}\right]}{Z_e}\right| = I_{нач}\left|\frac{Z_L}{Z_L + Z_A + Z_{W(A)}}\right|, \qquad (3)$$

съответно за измерения импеданс:

$$z_L^{'} = \frac{U^{'}}{I} = \frac{U^{'}}{I_{нач}}\left|\frac{Z_L + Z_A + Z_{W(A)}}{Z_L}\right| = \left|Z_L + Z_A + Z_{W(A)}\right| \qquad (4)$$

При неизвестни съпротивления на електроизмервателните уреди същите се определят в отделни, лесно реализуеми в лабораторни условия, измервателни схеми. Така за неизвестен амперметър (фиг.3) при захранване с променливо напрежение (фиг.3.а) от лабораторен автотрансформатор (ЛАТР), подбиране на товарен импеданс Z_T с оглед токът през амперметъра и отчетен от него I_A да е работен, чрез измерване с допълнителен волтметър на напрежителния пад върху него U_V се определя модулът на импеданса му z_A.

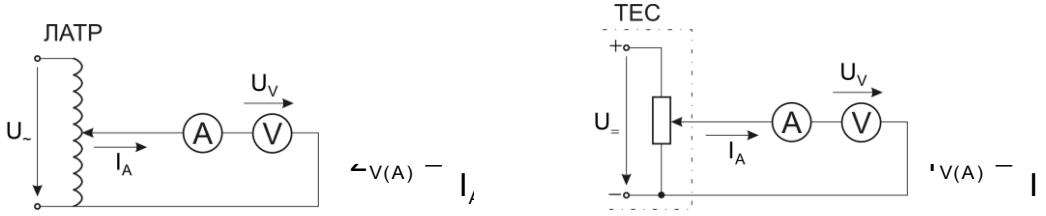


а) б)

Фиг.3. Неизвестен амперметър – определяне на импеданса:
а - на модула; б - на активната съставка

За същия амперметър при захранване с постоянно напрежение (фиг.3.б) от токоизправител електронен стабилизиран (ТЕС), подбиране на товарно съпротивление r_T с оглед токът през амперметъра I_A да е работен, чрез измерване с допълнителен волтметър на напрежителния пад върху него U_V се определя активното му съпротивление r_A. Индуктивното съпротивление на амперметъра е $x_A = \sqrt{z_A^2 - r_A^2}$.

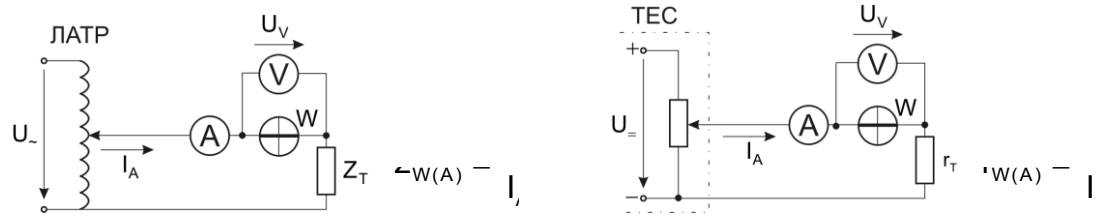
Аналогично за неизвестен волтметър (фиг.4) при захранване с работно променливо напрежение (фиг.4.) чрез измерване с допълнителен амперметър на тока през него I_A и чрез самия уред на напрежителния пад U_V се определя модулът на импеданса му z_V. При захранване пък с работно постоянно напрежение (фиг.4-б) чрез измерване на тока през допълнителния амперметър I_A и чрез самия уред на напрежителния пад U_V се определя активното му съпротивление r_V. Индуктивното съпротивление на волтметъра е $x_V = \sqrt{z_V^2 - r_V^2}$.



а) б)

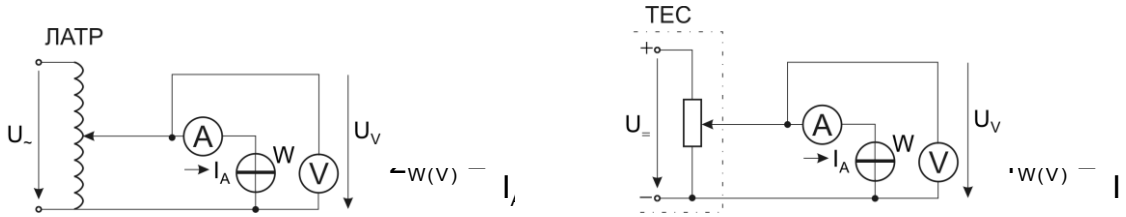
Фиг.4. Неизвестен волтметър – определяне на импеданса:
а - на модула; б - на активната съставка

За неизвестен ватметър с допълнителни амперметър и волтметър поотделно се определят модулът на импеданса и активното съпротивление на токовата намотка по схема A-V (фиг.5), подобно на тези за амперметъра, и модулът на импеданса и активното съпротивление на напреженовата намотка по схема V-A (фиг.6), подобно на същите за волтметъра. Индуктивните съпротивления на намотките са съответно $x_{W(A)} = \sqrt{z^2_{W(A)} - r^2_{W(A)}}$; $x_{W(V)} = \sqrt{z^2_{W(V)} - r^2_{W(V)}}$.



а) б)

Фиг.5. Неизвестен ватметър - определяне на импеданса на токовата намотка:
а - на модула; б - на активната съставка



а) б)

Фиг.6. Неизвестен ватметър-определяне на импеданса
на напреженовата намотка:
а - на модула; б - на активната съставка

3. Експериментално проиграване на методиката за измерване

За утвърждаване на гореизложеното и с учебна цел бе проведено измерване на индуктивността на работна фаза на трифазен асинхронен двигател в момент на пуск. Същото бе необходимо за изчисляване на стойността на дефазиращия пусков кондензатор при подготовка на двигателя за включването му към еднофазна мрежа.

Изследван бе трифазен асинхронен двигател тип A071 B/2, производство на "Елпром"–Тетевен, с номинални данни: $P_H = 0{,}55kW$; за всяка от намотките $U_H = 220V$; фактор на мощността $\cos\varphi_H = 0{,}83$. Свързването на намотките му бе тип "звезда" с изведена неутрала, което позволи самостоятелно изследване на всяка от фазите.

Измерването се извърши по схемата на фиг.1.а, като роторът бе механично застопорен, за да се постигне хлъзгане s = 1, характерно за пуск. Използваните измервателни апарати бяха: ватметър за постоянен и променлив ток с огледална скала с клас на точност 0,5 , производство Чехия, на обхват за ток - 10 A и за напрежение - 240V; амперметър и волтметър – мултицети Ц4317 с огледална скала за постоянен и променлив ток с класове на точност съответно 1,5 и 2,5, производство Русия, на обхвати за постоянен ток - 5A и за променлив ток - 10A,

за напрежение (постоянно и променливо) – 250V.
При включване на двигателя към захранващата мрежа (по схемата на фиг.1.а) бяха отчетени: напрежение $U' = 220V$, ток I=6,4A, активна мощност $P_W = 1240W$. От измерените стойности бяха изчислени индуктивното съпротивление на фазата при пуск $x_п = 16{,}3\Omega$, съответно индуктивността при пуск $L_п = 51{,}9mH$.
За отчитане на измервателната грешка от включването на уредите, съпротивленията на които не са указани, бяха проиграни всички схеми от фиг.3.б. За контролни уреди бяха използвани: амперметър за променлив ток със светлинно петно Д5090 с клас на точност 0,2 , производство Русия, и обхвати за ток 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 20A ; волтметър за постоянен и променлив ток с огледална скала Э544 с клас на точност 0,5 , производство Русия, и обхвати за напрежение 7,5; 15; 30; 60V. Измерените стойности по схемите на свързване от фиг.3.б бяха обработени и за използваните уреди от схемата на фиг.1.а на указаните обхвати бяха изчислени: за ватметъра - за токовата намотка $z_{W(A)} = 0{,}06065\Omega$ и $r_{W(A)} = 0{,}05\Omega$, за напреженовата намотка $z_{W(V)} = r_{W(V)} = 8000\Omega$; за амперметъра - $z_A = 0{,}0905\Omega$, $r_A = 0{,}0748\Omega$; за волтметъра - $z_V = r_V = 10M\Omega$.

4. Заключение

Нелинейните индуктивности в работни условия се измерват най-лесно по опростените V-A или A-V схеми и по принцип се доуточняват съгласно (4). В разгледания пример обаче, при така изчислените съпротивления на участващите в измерването уреди, грешката от включването им е абсолютно незначителна и може да се пренебрегне.

Литература

[1] Русев Д., Б. Матраков, В. Туренков. ***Електрически измервания.*** София, Техника, 2006
[2] Атабеков, Г. И. ***Теоретические основы электротехники. Часть I.*** Москва, Энергия, 1978

Автори: Васил Агапиев, доц. д-р, КЕЕ към Технически Университет - София,, E-mail address*: v_agapiev@tu-sofia.bg*; инж. маг. Валери Иванов, гл. ас., ЮЗУ-Благоевград, E-mail address: *valeryivanov@swu.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р С. Гунински

ФОТОВОЛТАИЧНА СИСТЕМА ЗА ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ НА ЛАБОРАТОРНИ СТЕНДОВЕ

Васил Димитров

Резюме: *Използването на слънчевата светлина е средство за достигане на устойчиво енергийно развитие. Различни видове фотоволтаични системи са широко разпространени за директно превръщане на слънчевата енергия в електричество. Те предлагат екологично производство на електроенергия и намаляване на замърсяването на околната среда в сравнение с използването на традиционните методи за производство на електричество. Целта на този доклад е да се проектира фотоволтаична инсталация, която да се използва за електрозахранване на стендове от лаборатория "Микропроцесорно управление на електрозадвижванията“ към Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“ - София.*

Ключови думи: *фотоволтаични системи, соларни инсталации, енергийна ефективност*

PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR POWER SUPPLY OF LABORATORY STANDS

Vasil Dimitrov

Abstract: *The utilization of sunlight is a means of achieving sustainable energy development. Different types of photovoltaic systems are widely used for direct conversion of the solar energy into electricity. They offer environmentally friendly electricity production and reduce environmental pollution with the use of traditional methods for energy production. The aim of this paper is to design a PV installation that will serve the domestic use of the laboratory “Microprocessor control on electrical drives” in the Todor Kableshkov University of Transport”- Sofia.*

Keywords: *photovoltaic systems, solar installations, energy efficiency*

1. Въведение

Лабораторията "Микропроцесорно управление на електрозадвижванията“ към катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта” е едно от звената с модерно оборудване във Висшето транспортно училище „Тодор Каблешков“ - София. Изградени са стендове за научни и инженерни изследвания, моделиране и изпитания на задвижвания от съвременен тип:

1. Инверторно асинхронно задвижване с еднофазен честотен преобразувател ELDI-M (Electroinvent) с мощност 0.55 kW;

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

ISSN 1311-0829

2. Инверторно асинхронно задвижване с трифазен честотен преобразувател Sinamics G120 (Siemens) с мощност 2.2 kW, към който са монтирани и следните модули за разширяване на възможностите при провеждане на лабораторни упражнения и научни изследвания:

– Стенд за оптимизирано управление на задвижвания, който включва програмируем логически контролер PLC Simatic S7-200 (Siemens), дисплей TP177micro Touch Panel (Siemens) и стабилизиран токоизправител Logo Power (220VAC/24VDC, 1.3 A) за захранване на елементите от стенда и някои датчици;

– Система за натоварване на асинхронния двигател, изградена от синхронен генератор, куплиран към двигателя, 3 бр. товарни реостати, бутони и контактори (220 VAC, 1 A) за превключване на реостатите и скокообразно изменение на товара на двигателя. Плавно изменение на натоварването се извършва чрез регулатор на възбудителното напрежение на синхронния генератор (220 VAC / 0-24 VDC, 1 A);

– Система за оценка на момента: във веригата на синхронния генератор са включени датчик на ток (токов трансдусер HAS100-S) и на напрежение (диференциален усилвател UR_P3), захранвани от стабилизиран токоизправител (220 VAC / 15 VDC, 1 A). На вала на генератора е монтиран ротационен енкодер. Трите датчика са свързани към PLC Simatic S7-200;

3. Стенд за микроконтролерно управление на стъпкови електрозадвижвания – състои се от стъпков двигател (24V, 1,8^{o}), позиционен механизъм, платка за управление с микроконтролер PIC16F873A, SMD елементи и индикаторни светодиоди. Захранването на стенда се осъществява от стабилизиран токоизправител (220 VAC / 12 и 24 VDC, 1 A);

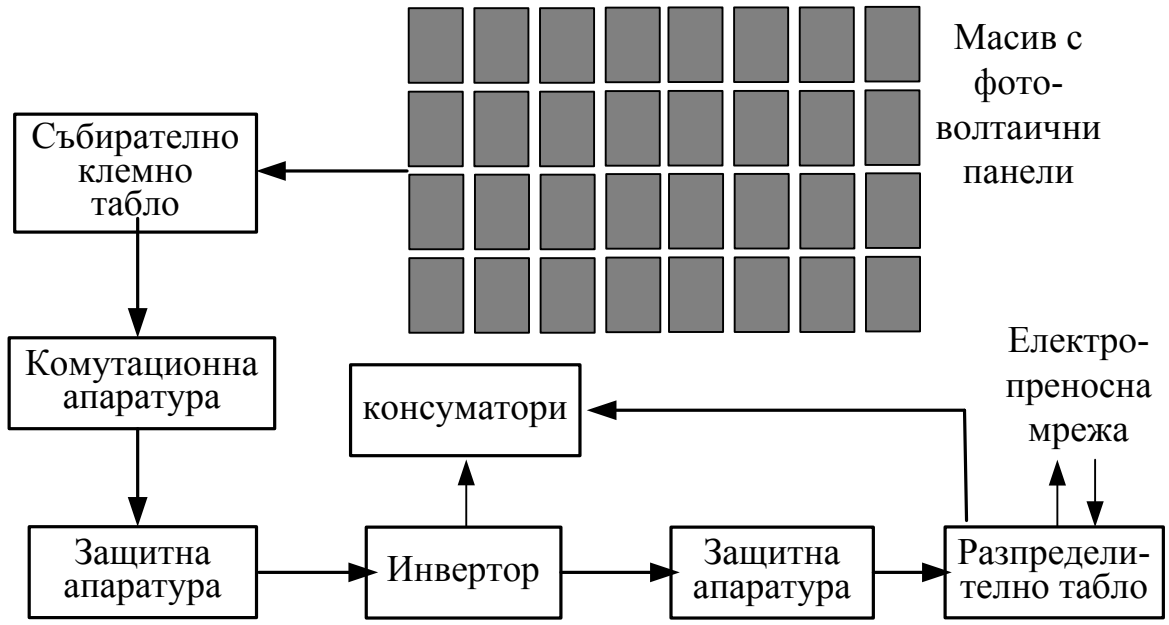
4. Компютърна система (PC) с инсталирани софтуерни пакети STEP 7-Micro/WIN (за управление на PLC Simatic S7-200), WinCC-flexible (за програмиране на информационния панел TP177micro Touch Panel), Starter (за връзка с честотния преобразувател Sinamics G120), COM Port Reader Writer (интерфейс за управление на стъпковото задвижване);

5. Стенд за изпитания на еднофазен асинхронен генератор: задвижва се от постояннотоков двигател с импулсен регулатор (220 VAC / 180 VDC, 1.5 A).

Следователно, необходимото захранване с еднофазно променливо напре-жение 220VAC и с постоянно напрежение 24VDC е с обща мощност $P \leq 1{,}5$kW. Трябва да се отбележи, че е много малко вероятно всички стендове да работят едновременно.

2. Фотоволтаична централа във ВТУ „Тодор Каблешков“

В [1, 2] е проектирана свързана с мрежата фотоволтаична централа във ВТУ „Тодор Каблешков“ (фиг.1). При определянето на консумираната мощност е взето под внимание, че тя ще се използва предимно за експериментални и научни изследвания и за обучение на студенти.



Фиг.1. Принципна схема на фотосолоарна централа във ВТУ

Избрана е пикова мощност 3,36 kW, защото такива централи са широко разпространени за електрозахранване на сгради [3]. Предвидено е свързване на соларната централа към осветлението и маломощни консуматори в лаборатория „Възобновяеми енергийни източници“.

На покрива на сградата на първи учебен корпус са монтирани 32 бр. фотоволтаични модула Kaneka HB105 с пикова мощност 105 Wp (при стандартни условия на тестване – Standard Test Conditions STC). Техните основни технически данни са показани в табл.1 [4]. Модулите са разположени в две групи по 16 от двете страни на покрива, съответно с източно и западно изложение. Сградата не предоставя възможност за монтаж на модулите от южната страна. Панелите са свързани по четири последователно и в паралел.

Табл.1 - технически данни на фотоволтаични модули Kaneka HB105

STC мощност P_{STC} (P_{max})	105 Wp
STC номинално напрежение U_{mpp}	53,5 V
STC номинален ток	1,96 A
STC напрежение на празен ход U_{oc}	71,0 V
STC ток на късо съединение I_{sc}	2,40 A
Изменение на мощността (толеранс)	+10%...-5%
Номинална температура на работа на клетките (*NOCT*)	44°C
Температура на околната среда (от … до)	-25...60 °C
Температурен коефициент на тока I_{sc}	+0,1%/K
Температурен коефициент на напрежението U_{oc}	-0,248V/K
Температурен коефициент на мощността P_{max}	-0,33%/K
Размери: 1210/1008/40 mm; Маса	18,0 kg

В соларната инсталация се използва инвертор IBC ServeMaster 3300MV. Неговите технически данни са показани в табл.2 [3, 4]. Инверторът притежава два постояннотокови входа с отделни устройства за следене на точката с максимална мощност (Maximum power point tracking – MPPT). Двете групи фотоволтаични модули се свързват към отделни входове на инвертора, като по този начин се осигурява необходимото съгласуване по напрежение и ток.
ServeMaster 3300MV предлага възможност за включване към електрическата мрежа и не се влияе от промяната на напрежението в нея.
Предвиден е комуникационен интерфейс и дисплей за мониторинг на работата на системата.

Табл.2 - технически данни на инвертор IBC ServeMaster 3300MV

Номинална входна мощност (P_{DC})	3,6 kW
Номинална изходна мощност (P_{AC})	3,3 VA
Номинално входно напрежение (U_{DC})	310 V
MPP-напрежение	180-350 V
Максимално входно напрежение – Самостоятелно / в паралел	450 / 410V
Изходно напрежение (U_{AC})	230V$\pm$15%
Изходна честота (f)	(50$\pm$5)Hz
Номинален постоянен ток	5,8 A
Максимален постоянен ток I_{DC} (2 входа)	2x10 A
Номинален променлив ток	14,5 A
Максимален променлив ток	15,5 A
Максимален кпд/ кпд по европейски стандарт	94,2/93,4%
Фактор на мощността при товар >20%	0,97
Коефициент на изкривяване на формата THD	5
Размери: 618/434/182 mm; Маса:	20,0 kg
Интерфейс	RS-485; модем

Максималната изходна мощност на соларната централа винаги е по-малка от сумата от максималната мощност на индивидуалните модули [3]. Има загуби на мощност и при преобразуване, и при пренасяне на енергията от покрива до лабораторията. Следователно, изходната мощност на соларната централа трябва да бъде намалена с коефициента на редукция K_{RED}, изчислен по формулата:

$$K_{RED} = K_{PT}.K_{TR}.K_D.\eta_{INV}.K_L \quad (1)$$

където [1, 2, 3]: K_{PT} е коефициент на производствен толеранс (приема се 95%);

K_{TR} – коефициент на температурна редукция (приема се 89% за пролетта и есента, при ясно време, по средата на деня);

K_D – коефициент на редукция вследствие замърсяване и прах (приема се годишен фактор 90%);

η_{INV} – коефициент на полезно действие на инвертора (приема се 90%);

K_L – коефициент на редукция от загуби на мощност (нормално е да се приеме 95%).

Следователно, за общия коефициент на редукция се получава K_{RED} = 0,65 и за изходната мощност на соларната централа се получава стойността:

$$P = n.P^I = n.K_{RED}.P_{STC} = 32.0{,}65.105W = 2186W \approx 2{,}19kW \quad (2)$$

където n=32 е броят на модулите; P^I е мощност от един модул.

3. Проектиране на инсталация за захранване на лабораторни стендове

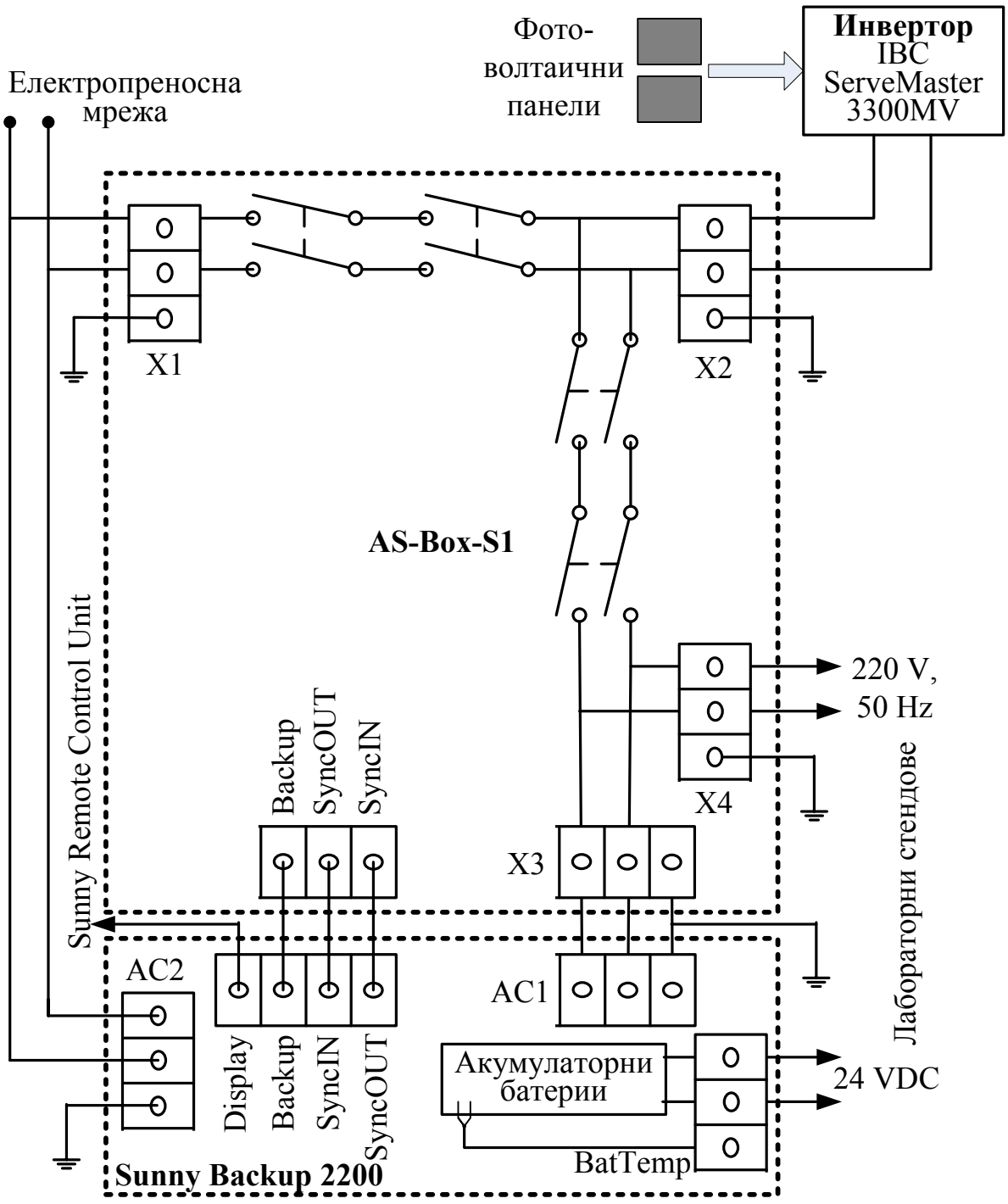
Целта на този доклад е проектиране на допълнителна инсталация към изградената фотоволтаична система с цел осигуряване електрозахранване на стендовете в лаборатория "Микропроцесорно управление на електро-задвижванията“, която е в непосредствена близост до лаборатория „Възобновяеми енергийни източници“.

През деня ъгълът на попадане на слънчевата светлина върху модулите се променя, което води до непрекъсната промяна на изходната мощност. Тя се увеличава от 0 (призори) постепенно до максимална стойност по обяд и след това отново намалява до 0 привечер. За захранването на лабораторните стендове често е необходима електрическа енергия при лоши метеорологични условия и в тъмната част от денонощието (рано сутрин и привечер през есента и зимата). Ето защо се налага към разработената фотоволтаична централа да се монтира система за надеждно резервно захранване [3, 4, 5, 6]. Обикновено се използват акумулаторни батерии, които запасяват произведената и неупотребена в момента електрическа енергия, използвана при нужда от консуматорите. За регулиране на напрежението и тока при зареждане на батериите се инсталира контролер, който не само ги предпазва от презареждане (като по този начин се удължава срокът на експлоатацията им), а и осъществява превключванията на консуматорите към различно захранване: от фотоволтаичната централа, от мрежата или от батериите.

Подходяща за включване към соларната централа е системата за резервно захранване Sunny Backup Set S [5]. Техническите данни са показани в табл.3.

Табл.3 - технически данни на Sunny Backup Set S

Номинална изходна мощност (*при захранване от мрежата*)		5,7 kW (кл.X4)
Ном. изх. мощност (*при захранване от соларната централа*)		4,6 kW (кл.X4)
Номинална изходна мощност (*при захранване от батериите*)		2,2 kW (кл.X4)
Изходно напрежение (U_{AC})	230 V (172.5–264.5 V) (кл.X4)	
Изходна честота (*f*)	50 Hz (45-65 Hz) (кл.X4)	
Номинално изходно напрежение (U_{DC}) за 2 бр. батерии		24 V / 2x12 V
Капацитет на акумулаторните батерии		142 Ah
Размери (SB 2200): 470/445/180 mm;	Маса:	19,0 kg
Размери (AS-Box-S1): 200/300/120 mm;	Маса:	4,5 kg
Размери (батерия): 498/230/177 mm;	Маса:	5,5 kg
Интерфейс		RS-485; модем



Фиг.2. Схема на соларна инсталация за захранване на лабораторни стендове

Системата за резервно захранване Sunny Backup Set S напълно съответства на напреженията на фотоволтаичните модули, инвертора и мрежата. Разполага с DC/DC преобразувател за зареждане на акумулаторни батерии с напрежение 24VDC, каквото се изисква от някои от лабораторните стендове. Номиналната изходна мощност в продължителен режим съответства на изчислената в (2).

Sunny Backup Set S се състои от следните елементи (фиг. 2): контролер за зареждане на батериите (Sunny Backup 2200), устройство за автоматично превключване на консуматорите (Automatic Switch Box AS-Box-S.1), 2 бр. акумулаторни батерии (2x12V), има възможност за осъществяване и на дистанционно

управление (чрез Sunny Remote Control Unit). Разполага с изходи за променливо (захранване от мрежата, соларната централа или акумулаторите) и постоянно напрежение (от батериите). Има ниска собствена консумация (40 W през деня / 6 W тих режим през нощта). Контролерът Sunny Backup 2200 на практика представлява конвертор, който съгласува напрежението на соларните модули и акумулаторните батерии (24VDC). При липса на захранване от соларната централа той подава сигнал към AS-Box-S.1 и се осъществява автоматично превключване (за по-малко от 50 ms) на лабораторните стендове към захранване от батериите. В този случай изходната мощност напълно съответства на изчислената в (2).

4. Заключение

Във ВТУ „Тодор Каблешков“ е изградена фотоволтаична инсталация, която се използва за научни изследвания и обучение на студенти. Соларните модули са монтирани на покрива, а инверторът и защитната и комутационна апаратура са инсталирани в лаборатория „Възобновяеми енергийни източници“. По този начин е реализирана свързана с мрежата фотоволтаична централа. При провеждането на експериментални изследвания от докторанти и преподаватели и на лабораторни упражнения със студенти може да се изследва ефективността на соларната централа при различни условия: влияние на ъгъла и интензивността на слънчевото излъчване, промяната на товара, почистването на панелите от замърсяване и др. Използвайки комуникационния интерфейс RS485 на инвертора, стойностите на всички важни параметри могат да бъдат изпращани към компютър и следени в реално време: U_{DC}, I_{DC}, P_{DC}, U_{AC}, I_{AC}, P_{AC}, f, $t\ ^oC$, *енергия (за ден, седмица, месец, година, обща)*. Посредством модема, инсталиран в инвертора, всички тези величини могат да бъдат проследявани и през Интернет.

В настоящата разработка се предлага решение за превръщане на тази фотоволтаична инсталация в хибридна. Използвайки подходяща система за резервно захранване Sunny Backup Set S се създава възможност за запасяване на произведената и неизразходвана в момента енергия и за осигуряване на непрекъсваемо токозахранване на лабораторни стендове (намиращи се в съседна лаборатория). Осигурява се не само променливо напрежение 220V, 50Hz, а и постоянно напрежение 24V, като лесно може да се извърши превключване за захранване и с 12 VDC. Предвидена е и необходимата защитна и измервателна апаратура, както и възможност за ръчно управление.

Произведената енергия от соларната централа ще се използва с предимсто за електрозахранване на лабораторните стендове. Ако има излишък, се зареждат акумулаторните батерии или се връща в мрежата. През тъмната част на денонощието или при лоши климатични условия се потребява енергия от мрежата, а при отпадане на захранването стендовете автоматично се превключват към акумулаторните батерии. Изчислената мощност напълно съответства на необходимата за предвидената инсталация.

С реализирането на тази система не само се намалява значително разходът на енергия, а се осигурява непрекъснато захранване на стендовете и компютърната

техника при провеждане на изпитания, което би могло да предотврати възникването на аварийни ситуации или повреда на някои съоръжения.

Литература

[1] Milenov I., Dimitrov V. (2013), ***Design of Photovoltaic plant for research purposes in University of Transport – Sofia***, Proceedings of papers of XLVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies - ICEST 2013, Ohrid, Macedonia, 26-29 June 2013, Vol. II, ISBN 978-9989-786-89-1, pp. 767 - 770

[2] Миленов И., Димитров В. (2013), ***Соларна инсталация за научно-изследователски цели***, Научно списание „Механика, транспорт, комуникации“, ISSN 1312-3823, том 11, брой 3, 2013 г., статия № 0858, стр. X-26 – X-32

[3] Soresen B. (2007), ***Renewable energy, Conversion, Transmission and Storage***, Academic Press, ISBN 978-0-12-374262-9, 2007.

[4] http://www.ibc-solar.com/

[5] http://3k-solar.bg/

[6] http://www.sma.de/

Автор: Васил Димитров, гл. ас. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“ - София, E-mail address: *vdimitroff@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** гл. ас. д-р инж. Л. Стоянов

АДАПТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА ТЯГОВИ ЗАДВИЖВАНИЯ - ЛАБОРАТОРЕН СИМУЛАТОР

Васил Димитров

Резюме: *В работата е предложен метод за реализация на управление на асинхронно задвижване с програмируем логически контролер, чрез който се осъществява оценка на момента и се реализира адаптивно управление. Изграден е лабораторен симулатор и е извършена експериментална верификация на разработения метод.*
Ключови думи: *асинхронно задвижване, PLC, адаптивно управление*

ADAPTIVE CONTROL ON TRACTION DRIVES - LABORATORY SIMULATOR

Vasil Dimitrov

Abstract: *In the work a method for realization of a control on asynchronous drive by a programmable logic controller is proposed. The PLC performs an estimation of the torque and realizes adaptive control. A laboratory simulator was build and an experimental verification of this method was carried out.*

Keywords: *asynchronous drive, PLC, adaptive control*

1. Въведение

Адаптивно управление намира приложение, когато е необходимо да се изменят характеристиките на системата за автоматично управление (САУ) на задвижването в зависимост от условията на експлоатация, т.е. САУ се коригира (адаптира) към изменението на параметрите на околната среда [1]. Корекцията се осъществява автоматично чрез изменение коефициента на усилване от управляващото устройство (УУ) или чрез изменение на закона на управление на УУ. В основата на адаптивното управление е заложено интегриране на познанието за процеса, представено като база данни, с управление в реално време в зависимост от постъпващата информация. Характеризира се с голяма стабилност на управлявания процес и постоянство на натрупаните грешки. Този метод осигурява автоматично разпознаване на електродвигателя, директно управление на големината на въртящия момент и др. Изискванията за работа с висока точност, която да е гарантирана и устойчива във всички диапазони на работните скорости, се реализира чрез управлението на двигателите по:

- ток (ограничение на тока, както и на производната му чрез ограничение на ускорението);

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

ISSN 1311-0829

- скорост (необходим диапазон на регулиране, аналогово задание за скорост, диапазон на колебание на скоростта);

- въртящ момент (ограничение на момента, задание за момент и ограничение на скоростта).

Адаптивното управление на задвижването би увеличило енергийната ефективност и комфорта на движение при електрическите транспортни средства. Основни регулируеми величини са скоростта на движение и в някои случаи – точността на спиране. Главни смущения са колебанието на напрежението в контактната мрежа, масата на товара, климатичните условия, състоянието на релсите, профилът на пътя. Като следствие на тяхното влияние е отклонението от зададената скорост на транспортното средство. Оценката на смущенията и използването й при адаптивното управление би довела до намаляване на пулсациите на момента и на разхода на енергия.

2. Теоретична постановка

Регулирането на скоростта и теглителната сила на задвижването на електрическите транспортни средства (ЕТС) се базира на различни принципи, които се определят преди всичко от типа и системата на възбуждане на тяговите двигатели (ТД) [2]. Теглителната сила се създава благодарение на наличието на сцепление между колелата и пътя и създавания от тяговия двигател момент. Тя има за задача да преодолява силите на съпротивление на движение и инерционните сили, което осигурява движение на ЕТС с определена скорост. Регулирането на теглителната сила при повечето ЕТС в експлоатация у нас се извършва от водача, а в редки случаи – от система за автоматично управление.

Теглителната характеристика на ЕТС представлява зависимостта на теглителната сила от скоростта и в голяма степен определя динамичните качества на ЕТС. Тя е свързана и с мощността на ЕТС, тъй като между механичната мощност на вала на двигателя $P_м$ и електрическата мощност, подавана на клемите му $P_{ел.}$, е в сила зависимостта:

$$P_м = P_{ел}.\eta_д \tag{1}$$

където $\eta_д$ е кпд на тяговия двигател.

От друга страна е известно, че:

$$P_M = \omega.M = \frac{2.\pi.n}{60}.M \tag{2}$$

където ω е ъгловата скорост на двигателя, M е моментът на вала му, n е скоростта на въртене, об/мин.

Тогава от (1) и (2) за момента на вала на двигателя се получава:

$$M = \frac{60.P_M}{2.\pi.n} = \frac{60.P_{ел}.\eta_д}{2.\pi.n} \tag{3}$$

От (3) може да се изведе уравнението на теглителната характеристика, тъй като постъпателната скорост v е пропорционална на честотата на въртене на ТД, а теглителната сила на периферията на двигателните колела F_k е пропорционална на момента на вала на ТД [2]:

$$v = \frac{\omega.D_T}{2.\mu} = \frac{\pi.n.D_T}{\mu}, m/s \quad (4)$$

$$F_k = \frac{2.M_д.\mu.\eta_P}{D_T}, N \quad (5)$$

$$F_k \sim \frac{P_{ел}.\eta_д.\eta_P}{v} \quad (6)$$

където D_T е кръг на търкаляне на двигателните колела, μ и η_P са съответно предавателно отношение и кпд на редуктора.

Видът на теглителната характеристика се определя преди всичко от типа на ТД. Те работят в широк диапазон на изменение на натоварването и скоростта. На практика върху характеристиките им се налагат редица ограничения, зависещи от типа на ТД и на ЕТС: по максимална (конструктивна) скорост на ЕТС, по условия на сцепление, по максимален ток на ТД и т.н.

Следователно, ако се следи в реално време изменението на натоварването на ТД, може да се постигне оптимално управление така, че ТД да работят при постоянна мощност или ЕТС да се движи с постоянна скорост.

Съвременните ЕТС се изграждат на базата на инверторни асинхронни задвижвания, като се реализира режим на векторно управление. При него се постига независимо управление на потока и електромагнитния момент чрез регулиране на статорния ток, разделен на потокообразуваща и моментообразуваща компоненти, по аналогия с постояннотоковите машини. За регулирането на скоростта на асинхронния двигател се реализира промяна на честотата f_1, а за регулиране на магнитния поток Ф – на амплитудата на захранващото напрежение U_1, като се съблюдава основния закон на Костенко за честотно управление:

$$\frac{U_1}{U_{1N}} = \frac{f_1.\Phi}{f_{1N}.\Phi_N} = \frac{f_1}{f_{1N}}\sqrt{\frac{M}{M_N}} \quad (7)$$

където в знаменателя са номиналните стойности на величините, а в числителя – техните текущи значения.

Зависимостта (7) обезпечава оптимални условия на работа на асинхронния двигател – осигурява се работа при минимални загуби, с най-висок кпд и cosφ и постоянна претоварваща способност.

Като се вземат под внимание (4), (5) и (7) може да се запише:

$$\frac{U_1}{U_{1N}} = \frac{v}{v_N}\sqrt{\frac{F_k}{F_{kN}}} \quad (8)$$

3. Лабораторен симулатор

Лабораторният симулатор е изграден на базата на съвременни технически средства, като основните елементи са разработка на фирмата Siemens: трифазен асинхронен двигател (АД) от серия 1LA7 с повишена енергийна ефективност и олекотена конструкция и честотен преобразувател Sinamics G120. Задвижването може да работи в режим на векторно управление [3], като обратната връзка по

скорост е реализирана чрез ротационен енкодер, монтиран на вала на АД и свързан към управляващия модул на Sinamics G120.

Натоварването на асинхронния двигател се осъществява от синхронен генератор (СГ) и товарни реостати R_1, R_2, R_3. Създадена е възможност за плавна и рязка промяна на съпротивителния момент съответно чрез регулатор на възбудителния ток на СГ и бутони и контактори.

Непрекъснато разширяващите се приложения на съвременните програмируеми логически контролери (Programmable Logic Controllers – PLC) поставят на преден план въпроса за оценка на възможността те да бъдат използвани при адаптивно управление на тягови задвижвания. PLC навлизат все по-широко в различни телекомуникационни системи, в системите за сигнализация и управление, както и за дистанционен контрол и управление на движението и на електрозахранването в транспорта.

В лабораторния симулатор е внедрен PLC Simatic S7-200-CPU 224XP на фирмата Siemens [4], който се характеризира с достатъчно високо бързо-действие и предоставя възможност за комуникация с датчици, специфични за задвижванията на ЕТС, т.е. може да бъде използван за оценка на смущенията и за реализация на адаптивно управление на тягови задвижвания:

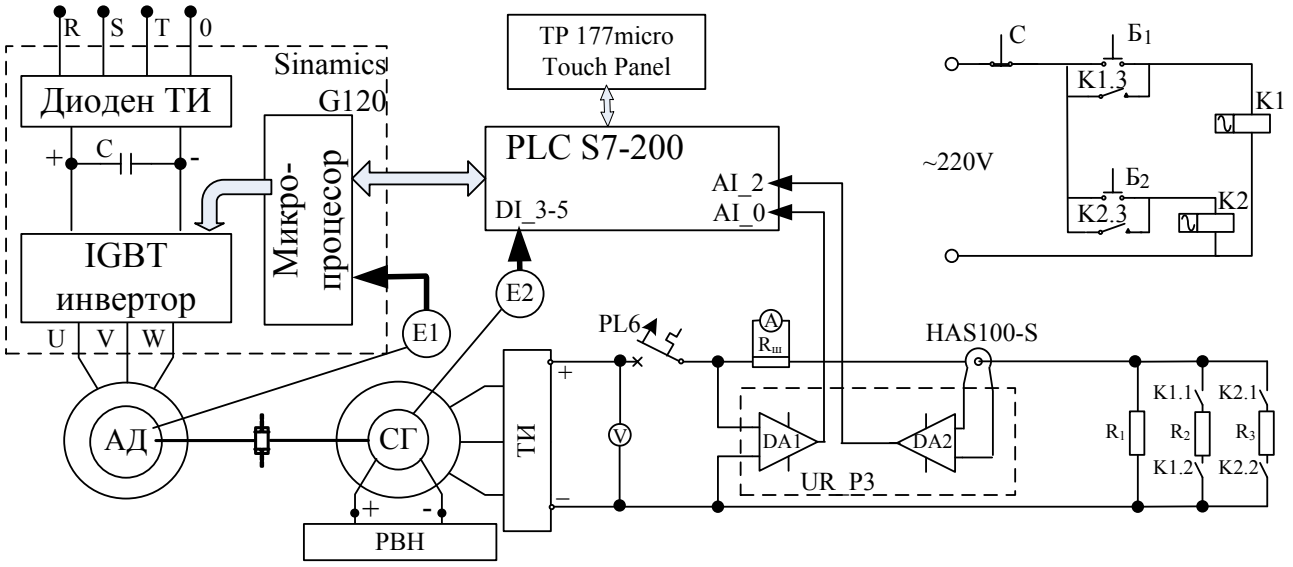
- Към него могат да се включат два датчика с аналогов напреженов изход, както и импулсен енкодер за измерване на скорост на движение;

- Благодарение на двата комуникационни порта се създават условия за връзка не само с информационен панел за мониторинг и управление, но и с още едно устройство (в случая – дисплей за управление чрез докосване TP177-micro Touch Panel и честотен преобразувател Sinamics G120).

Въз основа на описаните възможности на PLC S7-200 е реализирана конфигурацията на симулатора, показана на фиг.1. Системата за оценка на съпротивителния момент е базирана на измерване на тока I_g, напрежението U_g и скоростта n_g на синхронния генератор. Във веригата му са включени датчици на ток (HAS 100-S) и на напрежение (UR_P3), свързани към аналоговите входове AI_0 и AI_2 на PLC, а скоростта му се измерва от ротационен енкодер E2, монтиран на вала му и свързан към цифровите входове DI_3-5 на PLC.

4. Алгоритъм за реализация на адаптивно управление

Използвайки софтуерния продукт Step 7 MicroWin, в паметта на PLC може да се зареди програмно желана регулировъчна характеристика на задвижването (механична, тягова, скоростна и др.). Контролерът извършва регулиране по тази характеристика, като следи в реално време стойностите на всички необходими за изчисленията величини: мониторинг на параметрите на АД се извършва чрез Sinamics G120, а на смущенията – от системата за оценка на момента, като съпротивителният момент се изчислява в реално време в зависимост от мощността P_g и ъгловата скорост ω_g на синхронния генератор:



Фиг.1. Схема на лабораторния симулатор

$$M_c = \frac{P_g}{\varpi_g} = \frac{30.U_g.I_g}{\pi.n_g} \quad , \quad (9)$$

където M_c е съпротивителният момент, а U_g, I_g и n_g – параметрите на генератора. По този начин се извършва адаптивно управление на задвижването съобразно изменението на смущаващите въздействия. Разработеният алгоритъм е показан на фиг.2.

Твърдите характеристики на асинхронното задвижване с векторно управление способстват за пълното използване на мощността и теглителните свойства на тяговия двигател. Могат да бъдат реализирани няколко зони на ограничение на мощността, теглителната сила и скоростта. При стартиране и ниски скорости на движение най-голямата теглителна сила се определя от максимално допустимия ток или от условията на сцепление (фиг.3). Ако се приеме оптимален режим $F_k = F_{kN}$, то зависимостта (8) приема вида:

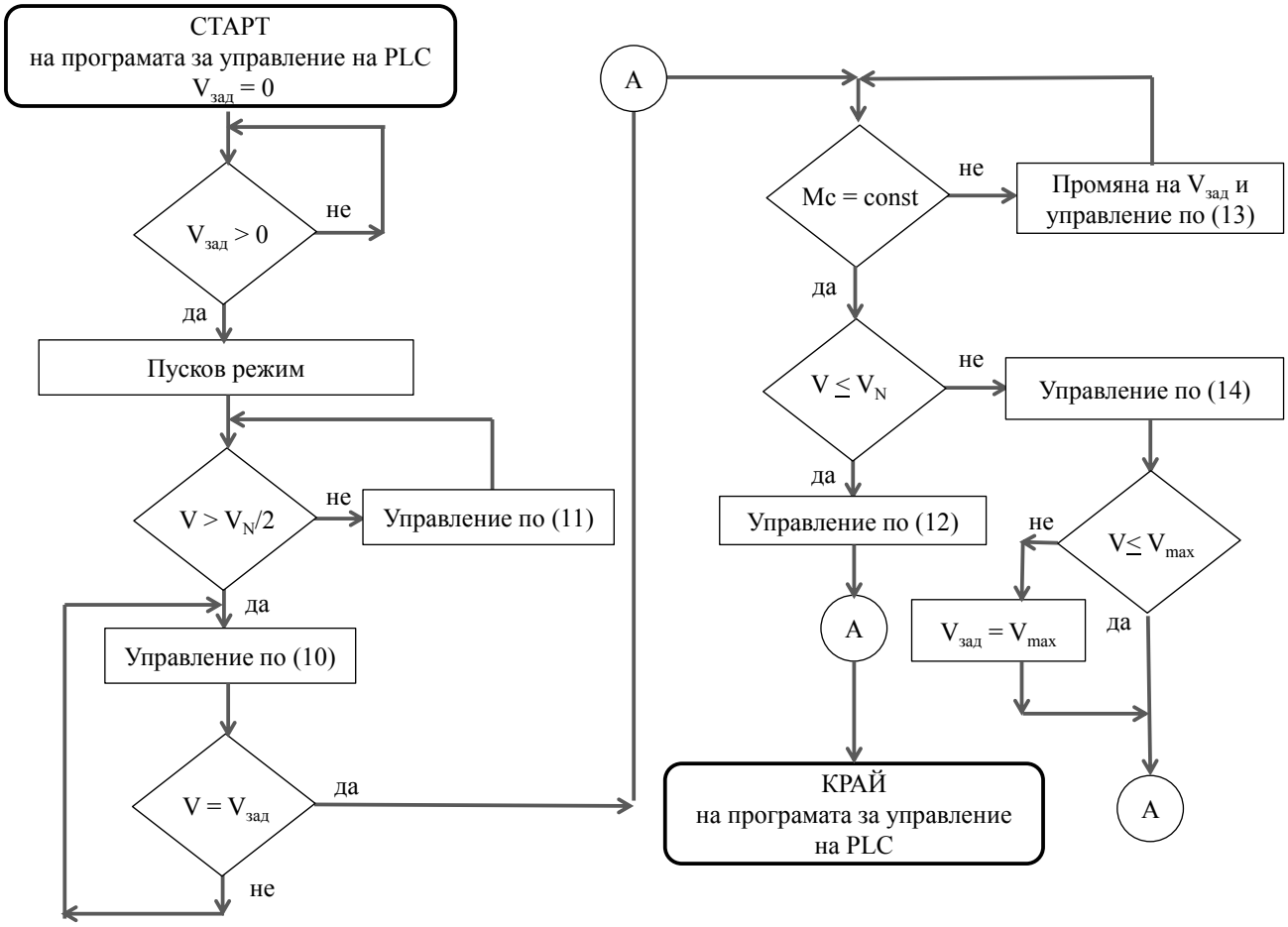
$$\frac{U_1}{U_{1N}} = \frac{v}{v_N} \quad (10)$$

При честоти над $f_{1N}/2$ двигателят работи при условия, близки до работа с номинална честота. При по-ниски честоти, обаче, режимът на работа на двигателят се влошава вследствие увеличения пад на напрежение в активните съпротивления на статора и честотния преобразувател (Σr). Това се компенсира чрез повдигане на напрежението (Boost):

$$U_1 = \frac{U_{1N}.f_1}{f_{1N}} + I_1.\Sigma r \quad (11)$$

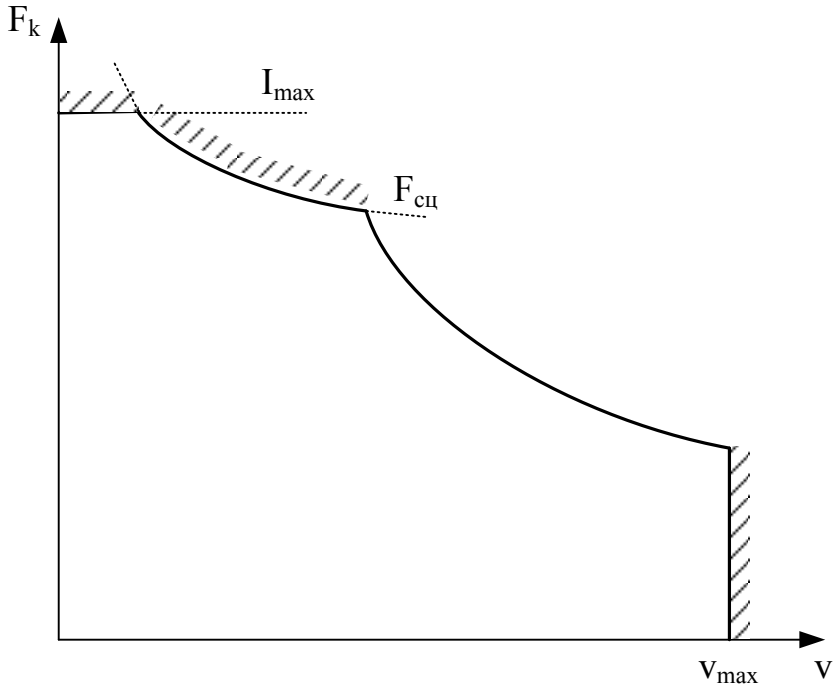
След завършване на пусковия процес може да се поставят различни изисквания. Ако е необходимо движение с постоянна скорост (напр. $v = v_N$), то зависимостта (8) придобива вида:

$$\frac{U_1}{U_{1N}} = \sqrt{\frac{F_k}{F_{kN}}} \quad (12)$$



Фиг.2. Алгоритъм за реализация на адаптивно управление

Следователно е необходимо захранващото напрежение да се изменя пропорционално на корен квадратен от момента на вала. Ако при оценката на смущенията се установи рязка промяна на съпротивителния момент, може да



Фиг.3. Тягова характеристика

се наложи промяна на заданието за скорост, за да се осигури движение при постоянна мощност на двигателя:

$$\frac{U_1}{U_{1N}} = \sqrt{\frac{v}{v_N}} \tag{13}$$

Ако приложеното към двигателя напрежение се запази постоянно $U_1 = U_{1N}$ (напр. при $f_1 > f_{1N}$), въз основа на (8) се получава:

$$\frac{v_N}{v} = \sqrt{\frac{F_k}{F_{kN}}} \tag{14}$$

Следователно, теглителната характеристика се изменя по хиперболичен закон (фиг.3), като максималната честота се определя от допустимата конструктивна скорост, ограничена от якостта на елементите на двигателя и транспортното средство.

5. Заключение

Описаният лабораторен симулатор създава възможност за провеждане на изпитания на асинхронни задвижвания в различни аспекти. В доклада е предложен метод за реализация на адаптивно управление на задвижването чрез PLC.

Разработени са система за оценка на съпротивителния момент и алгоритъм и управляваща програма за контролера, като по този начин се извършва регулиране на задвижването по желана характеристика и се повишават енергийната ефективност и комфортът на движение.

Предложеният метод е изключително полезен и в процеса на обучението на студентите – дава възможност те да навлязат дълбоко в същността на съвременните задвижвания и проектирането на системи за тяхното автоматично управление.

Литература

[1] Баранов Л.А. (2008), ***Модели систем автоматического управления***, Московский государственнЬій университет путей сообщения (МИИТ), ISBN 978-5-7876-0022-3

[2] Българанов Л. (2009), ***Електрически транспорт,***София ISBN 954-12-0103-2

[3] Димитров В. (2012), ***Изследване на динамичните характеристики на асинхронни електрозадвижвания с честотно управление – лабораторен симулатор***, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 1312-3823, том 10, бр.3/3, стр. BG-8.30; UK-8.7, статия № 0746

[4] Dimitrov V. (2011), ***Indirect identification of the disturbances by programmable logic controller Simatic S7-200***, XLVI International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems And Technologies – ICEST 2011, Nis, Serbia, Proceedings of Papers, Volume 3, p. 1018 - 1021

Автор: Васил Димитров, гл. ас. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“ - София, E-mail address: *vdimitroff@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** Проф. д-р инж. Л. Българанов

ФОРМИРАНЕ НА НАПРЕЖИТЕЛЕН СИГНАЛ В СИСТЕМА ЗА НЕПРЕКЪСНАТ КОНТРОЛ НА tanδ НА ПРОХОДНИ ИЗОЛАТОРИ

Велислава Райдовска

Резюме: *Установено е, че значителен дял от отказите в електроенергийните системи се дължат на повреди в проходните изолатори на трансформаторите. Поради това те трябва да се подлагат на превантивен контрол чрез измерване на tanδ на изолационната им система. Поради това се налага да се формира напрежителен сигнал, пропорционален на напрежението върху проходния изолатор. Този сигнал, заедно със сигнала, пропорционален на тока през изолационната му система, са необходими за определяне на загубите в нея (чрез tanδ). По този начин изпреварващо се предотвратява авариен електрически пробив. Тук се разглежда въпросът за формиране на такъв напрежителен сигнал с помощта на капацитивен делител. Разработена е програма в средата на Matlab, която по зададени размери на проходния изолатор и номинално работно напрежение, изчислява стойностите на елементите в предлаганата верига.*

Ключови думи: *непрекъснат контрол на tanδ, капацитивен делител, проходен изолатор*

SETTING A VOLTAGE SIGNAL IN A TANδ ON-LINE MONITORING SYSTEM OF BUSHINGS

Velislava Raydovska

Abstract: *It has been established that a significant amount of the failures in electric power systems are due to damage to the transformers bushings. Therefore they have to be subjected to preventive control through tanδ measurements of their insulation system. That necessitates setting a voltage signal proportional to the bushing voltage. That signal, together with the signal proportional to the current through the bushings insulation system, is requisite for determining the insulation system losses (by means of tanδ) thus anticipating and preventing accidental electrical breakdown. The paper discusses the issue of setting such a voltage signal through the use of capacitor divider. An application has been developed in the Matlab environment which, for a given size and nominal rated voltage of the bushing, calculates the values of the elements of the proposed circuit.*

Keywords: *tanδ on-line monitoring, capacitor divider, bushing*

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

ISSN 1311-0829

1. Въведение

Практиката е установила, че периодичният контрол на състоянието на проходните изолатори чрез измерване на tanδ на изолационната им система е неефективен. Процесите, които предшестват електрическите пробиви са много по-кратки от периодите между измерванията и не могат да бъдат прогнозирани. Ето защо единственият начин за предотвратяване на тежки аварии в проходните изолатори е непрекъснатото измерване (on-line monitoring) на tanδ.

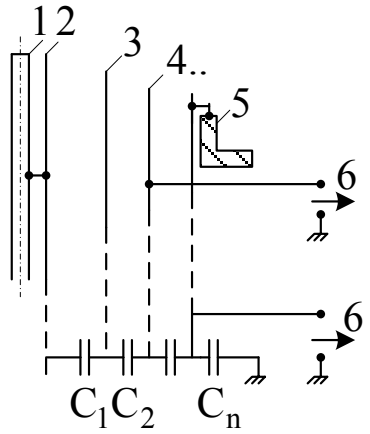
В [2] е дадена авторизирана структурна схема за непрекъснат контрол на tanδ на проходни изолатори, основаваща се на обработка по аналогов и цифров път на физически сигнали, получени от работещия проходен изолатор. Алгоритъмът предвижда да се формират два аналогови сигнала, пропорционални на напрежението върху изолацията му и протичащия през нея капацитивен ток. Сигналите се подлагат на предварителна обработка, за да бъдат пригодени във вид, удобен за непрекъснато измерване на стойността на tanδ, като се използва съответна изчислителна процедура.

Получаването на тези сигнали се основава на вътрешната структура на проходния изолатор. Това може да бъде онагледено чрез по-подробно разглеждане конструкцията на проходен изолатор за напрежение, равно или по-високо от 110 кV. На тази база е предложена капацитивна система, включена към проходния изолатор и посредством която да бъде изведен както напрежителен, така и токов сигнал, от който в крайна сметка, след обработката им, да се получи непрекъсната информация за състоянието на изолацията на проходния изолатор.

2. Формиране на напрежителния сигнал

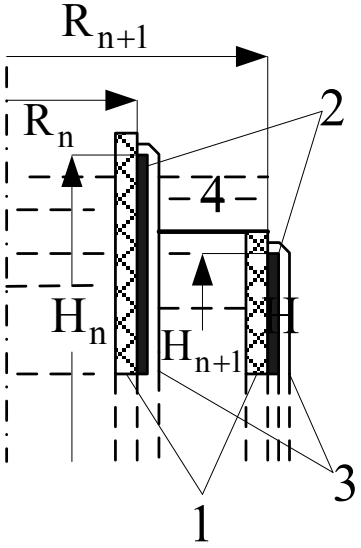
Както е известно, типът на конструкцията на проходните изолатори за напрежения в диапазона над 110 кV включително е установен преди десетилетия. Той е резултат на натрупания дългогодишен опит от производството и експлоатацията на тези съоръжения. Тоководещото жило е разположено аксиално в кухината на оребрено тяло от електропорцелан, който се закрепва към казана на трансформатора чрез фланец. За по-равномерно разпределение на електрическото поле както във вътрешността, така и по външната повърхност на порцелановото тяло, във вътрешността му се разполагат коаксиално, един в друг, множество екрани под формата на тънкостенни метални цилиндри (фиг.1). Те се изработват от метално фолио, което се навива върху коаксиални изолационни цилиндри (от гетинакс, стъклотекстолит и др.), които са част от изолационната система в радиална посока. Тя се подобрява допълнително от хартиен слой, който покрива всяко едно от металните фолия и по този начин възпрепятства развитието на електрическите разряди. Електропроводимите екрани се оразмеряват така, че да се осигури по-благоприятно преразпределение на електрическото поле и значително да се намали напрегнатостта му както вътре в електропорцелановото тяло, така и по външната му повърхност (в зоната на фланеца). Със същата цел, в много от конструкциите, най-вътрешният екран се свързва електрически с тоководещото жило, а най-външният – с фланеца на изолатора. Системата от жило, фланец и екрани, показана схематично на фиг.1, може да се разглежда като ве-

рига от последователно свързани кондензатори C_1, C_2 и т.н. Броят на екраните зависи от номиналното напрежение на проходния изолатор – при 110 kV най-често се използват два екрана, при 220 kV – девет и т.н. Той се ограничава от конструктивни съображения – от вътрешния диаметър на порцелановото тяло в зоната на фланеца и от необходимостта да се осигури достатъчно пространство за свободна конвекция на трансформаторното масло между цилиндрите с метални екрани.



Фиг.1. Схематично изображение на капацитивната верига, образувана от електродите – електропроводими екрани на проходния изолатор. 1 – жило, 2, 3, 4.. – екрани, 5 – фланец, 6 – изход към измервателната апаратура.

На фиг.2 са показани крайните участъци на два съседни концентрично разположени изолационни цилиндъра 1 (№ n и n+1). Закрепените върху тях електропроводими екрани 2 са покрити с хартиена изолация 3. Кухината между цилиндрите е запълнена с трансформаторно масло 4.



Фиг.2. Схематично изображение на краищата на съседни изолационни цилиндри, метални екрани и хартиена изолация от маслено-бариерен тип. 1 – изолационни цилиндри, 2 – електропроводими екрани, 3 – хартиена изолация, 4 – трансформаторно масло. Rn и Rn+1 – радиуси на електропроводимите екрани, Hn и Hn+1 – съответните им височини.

Капацитетът между двата съседни екрана от фиг.2 може да се представи като схема от три последователно свързани кондензатора с различен диелектрик - C_1 – от хартия, C_2 – от масло и C_3 – от диелектрика, от който е изработен изолационният цилиндър (гетинакс, текстолит и др.). Всеки един от тях има формата на два коаксиално разположени електрода – вътрешния и външния екран. Височината им е една и съща и е равна на височината H_{n+1} на външния по-къс екран. При определяне на съответните капацитети на C_1, C_2 и C_3 ролята на краевите потоци може да бъде пренебрегната, тъй като разстоянието между екранните-електроди (R_{n+1}-R_n) е много по-малко от надлъжния размер – височината H_{n+1}.

Капацитетът на кондензатора C_e, между двата съседни екрана може да се разглежда като верига от последователно свързаните кондензатори C_1, C_2 и C_3 и се определя с уравнението:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \qquad (1)$$

Капацитетът C_e, както бе посочено, е общият капацитет между двата екрана. За да бъде определен е необходимо да бъдат изчислени C_1, C_2 и C_3.

Поради малката дебелина на хартиения слой, за капацитета C_1 може да бъде използвана формулата за плосък кондензатор; това важи и за капацитет C_3, съответстващ на изолационния цилиндър. И така:

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{S_1}{h_1} = \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{2\pi R_n H_{n+1}}{h_1} \qquad (2)$$

където ε_1 е относителната диелектрична константа на пропитата с масло хартия;

h_1 - дебелината на хартиения слой;

R_n и H_{n+1} са геометричните размери съгл. фиг.2.

За капацитета на изолационния цилиндър е в сила аналитичния израз:

$$C_3 = \varepsilon_0 \varepsilon_3 \frac{S_3}{h_3} = \varepsilon_0 \varepsilon_3 \frac{2\pi R_{n+1} H_{n+1}}{h_3} \qquad (3),$$

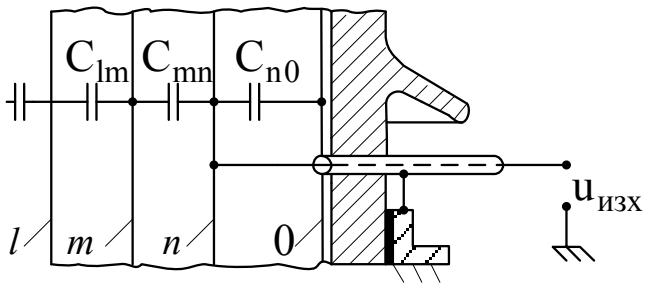
където ε_3 и h_3 са съответните стойности на относителната диелектрична константа и дебелината на изолационния цилиндър.

Капацитетът на масления слой следва да се изчисли по формулата за кондензатор с коаксиално разположени цилиндрични електроди:

$$C_M \cong \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_{rM} H_{n+1}}{\ln \frac{R_{n+1}}{R_n}} \qquad (4)$$

Тъй като радиусите R_{n+1} и R_n са много по-големи от дебелината на хартиения слой h_1 и на изолационния цилиндър h_3. Тези дебелини могат да бъдат пренебрегнати, но при необходимост могат и да бъдат отчетени чрез съответното амаляване на R_{n+1} и увеличаване на R_n: $\ln\frac{R_{n+1}-h_3}{R_n+h_1}$; ε_{rM} е относителната диелектрична константа на маслото.

Нека потенциалът на фланеца на проходния изолатор бъде приет за равен на нула. В такъв случай потенциалът на жилото ще бъде равен на фазовото напрежение, потенциалите на екраните – на напрежението им спрямо фланеца. Те могат да бъдат изчислени чрез капацитетите между тях. Това налага да бъде изчислен капацитетът на кондензатора между свързания с тоководещото жило първи екран и втория екран, между втория и третия екран и т.н. Потенциалът на последния екран е равен на нула, понеже е присъединен електрически към фланеца. Последователно свързаните кондензатори образуват делител, а напрежението на последния кондензатор от веригата C_{n0} се извежда навън. Това е онагледено на фиг.3, на която са представени последните четири екрана *l*,*m*, *n* и 0 в посока към фланеца.



Фиг.3. Участък от капацитивния делител на проходния изолатор и извод за измерване на tanδ

Трудно (а и не е необходимо) е да бъде създаден общ аналитичен модел, свързващ характеристиките на капацивния делител и параметрите на проходния изолатор. Ето защо тази връзка се определя по числен път за всяка зададена конструкция; въз основа на резултатите могат да бъдат направени необходимите корекции. Численото изследване има за цел да се уточнят параметрите на капацитивния делител, необходим за измерване на tanδ Деветте електропроводими цилиндрични екрани образуват осем последователно свързани кондензатора. Общият капацитет C, от тоководещото жило до деветия екран, се определя по формулата

$$\frac{1}{C}=\sum_{i=1}^{8}\frac{1}{C_i}.$$

Напрежението върху всеки отделен екран, спрямо нулевия потенциал на фланеца, е очевидно:

$$U_i = \frac{\frac{1}{C_i}}{\sum_{i=1}^{8}\frac{1}{C_i}} U_H .$$

Така се изчисляват съответните напрежения U_1 на първия екран, U_2 на втория екран и т.н. Напреженията между електродите на кондензаторите C_1, C_2 и т.н. са очевидно разлики между напреженията на съответните екрани: $U_{12} = U_1 - U_2$, $U_{23} = U_2 - U_3$ и т.н.

Тази методика, приложена за проходен изолатор за 220 кV с девет електроизолационни екрани в стурктурата и маслено-хартиена изолация показва, че изходното напрежение е от порядъка на 5 кV. Това е напрежителен сигнал, който следва да бъде допълнително намален до стойност, която да може да бъде използвана за вход на електронна система за непрекъснат контрол на изолационната конструкция на проходния изолатор чрез определяне на tanδ. Необходимият за тази цел сигнал е променливо синусоидално напрежение, чиято амплитудна стойност е препоръчително да бъде в границите на 10V. За да се намали изходното напрежение от проходния изолатор се използва допълнителен външен капацитивен делител. Той трябва да бъде линеен, което означава, че коефициентът на делене не трябва да зависи от големината на напрежението; освен това трябва да бъде и честотно независим. Към този капацитивен делител се предивяват допълнителни изисквания да повтаря точно формата на входното напрежение и да не внася фазови изкривявания. Капацитетът на изграждащите го кондензатори трябва да е устойчив на промените на температурата на околната среда.

От съображения за безопасна работа и за защита на проходния изолатор, се поставя още едно изискване: напрежението, което се получава на ПИН-извода на проходния изолатор да не е по-високо от 100V. Ето защо към извода се включва допълнителен кондензатор C_2.

За разглеждания пример входното напрежение е $U_f = 220.10^3/3^{1/2}$ V , а изходното $U_{pin} = 100$ V . Следователно коефициентът на деление ще бъде

$$к = U_f / U_{pin} = 1270.$$

Известно е, че кондензаторите се избират по следните параметри: номинален капацитет и допустим толеранс; номиналното напрежение – най-голямото напрежение между електродите на кондензатора, при което кондензаторът може да работи произволно дълго време; пробивно напрежение — онова напрежение, при което се получава необратим пробив в диелектрика на кондензатора. Други параметри на кондензаторите са неговите загуби (загуби на електрически ток в активната съставка на импеданса); мощност на кондензатора - максималната реактивна мощност, която може да бъде проведена през кондензатора без да възникне повреда и др.

От изчислените стойности на капацитетите на проходния изолатор $C_{1bushing.}$=3,0960.10^{-10} F и $C_{2bush.}$=6,7089.10^{-9} F, като се отчете че C_2 е паралелно включен на $C_{2bush.}$ за капацитета C_2 се изчислява, че трябва да бъде 386nF.

Необходимо е включването на още един капацитивен делител с коефициент на деление 1:10, за да се намали напрежението до допустими стойности за неговата цифрова обработка, а именно 10V. В този случай $к_2$=(C_{d1} + C_{d2})/ C_{d1}=10. Поставя се условието токът, който протича през този делител да е 50 mA. Това се прави от съображението да бъде възможно неговото отчитане. Тогава като се използват известни от теория на веригите формули се изчисляват C_{d1}=10nF и C_{d2}=90nF.

Необходимо е да се вземат под внимание и следните много важни обстоятелства:

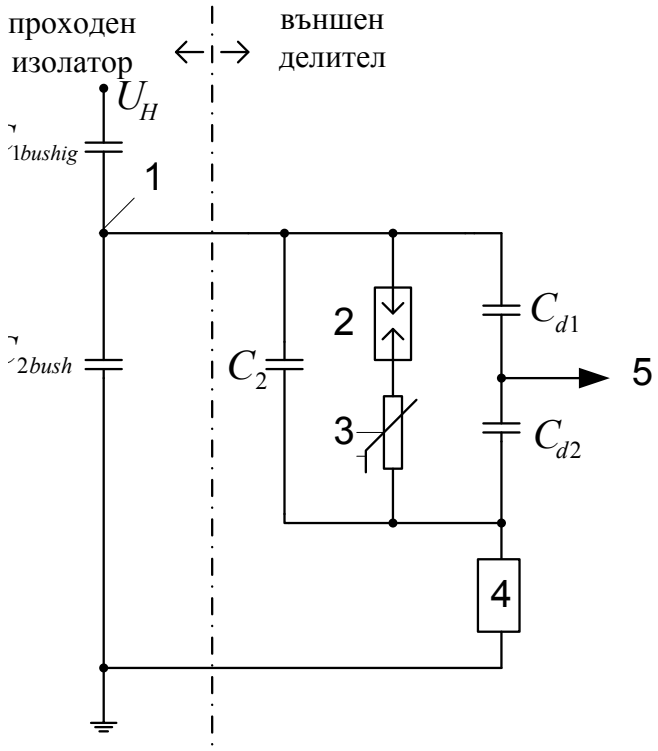
Първо – напреженията на електрическите мрежи никога не са равни на обявената им номинална стойност. Те зависят от мястото на измерване, режимът на натоварване на електропреносните и електроразпределителните мрежи, и дори от температурата на околната среда. Ето защо, въпреки мерките за поддържане на напрежението в определени зададени граници, свързаните към мрежите съоръжения, в разглеждания случай – проходните изолатори, се оразмеряват да работят безопасно и при възможните най-високите отклонения на нарастване на напреженията. Не случайно IEC определя номиналните напрежения за апарати и съоръжения 123 вместо 110kV, вместо 245 вместо 220 kV и т.н.

Второ – горната граница на широко използваният напрежителен постояннотоков сигнал да бъде 10 V. В разглеждания случай напрежителният сигнал е променливо напрежение. Ако се приемат граници от 0 до 10 V (ефективна стойност), електронните схеми трябва да работят без да внасят изкривявания в граници от 0 до 14,14 V.

За да се отчете по-високата стойност на напрежението на жилото на проходния изолатор и се спази изискването за напрежение на извода му не по-високо от 100 V, стойността на капацитета трябва да се коригира; вкарването на максималната стойност на окончателно формирания изходен сигнал в граници ±10 V е по-лесна задача. За тази цел могат да се използват операционни схеми с точно зададен коефициент на затихване.

Така изграденият външен капацитивен делител, съобразен с посочените обстоятелства, се свързва към PIN извода на проходния изолатор. Схемата му трябва да бъде обезопасена срещу пренапрежения, които могат да се окажат опасни не само за електронната апаратура, но и за обслужващия персонал. В такива случаи се използват както искрища, така и нелинейни съпротивления. Посочените елементи не внасят промени в общата структура на външния делител, тъй като при нормален режим могат да бъдат разглеждани като резистори, чиито съпротивления клонят към безкрайност. Техните собствени паразитни капацитети са,

също така, пренебрежимо малки спрямо капацитетите на кондензаторите, от които е съставен външния делител. Неговата схема, заедно със защитните елементи, може да изглежда примерно като тази, показана на фиг.4.



Фиг.4. Външен капацитивен делител със защитни елементи. C1bushig, C2bush – капацитети на проходния изолатор, разгледан като капацитивен делител; C2 – кондензатор, който се включва към PIN-извода на проходния изолатор, за да се намали напрежението до 100V; Cd1, C2d – капацитивен делител, от който се извежда крайният изходен напрежителен сигнал; 1 – извод на проходния изолатор, 2 – искрище, 3 – металооксиден варистор, 4 – система за формиране на токов сигнал, 5 – напрежителен сигнал.

3. Заключение

Уточнена е схема за формиране на напрежителен сигнал за система за непрекъснат котрол на tanδ на изолационната система на проходни изолатори. Предложен е ред за изчисляване на вътрешните потенциали и капацитетите на външен делител на напрежение, както и уточняване на съответните задания с оглед на параметрите на крайния аналогов напрежителен сигнал.

Литература

[1] S. D. Nedelcut, V. Proca, and D. M. Purcaru Monitoring of Dielectric Losses and Use of Ferrofluids for Bushing Cooling World Academy of Science, Engineering and Technology 40 2008, стр.154-159

[2] Райдовска Велислава Хр., Петър Наков. Структура на проходни изолатори за трансформатори като сигнален източник за непрекъснат контрол на надеждността им. Доклад на НК „Смолян – 2012", 30 юни-1 юли 2012

[3] Бабиков М.А., А.С. Комаров, В.С.Сергеев. Техника высоких напрежении. М.-Л., ГЭИ, 1955

[4] Дзербицкий С. Испытания электрических аппаратов, Энергия, Л., 1974 г.

[5] Pritpal Singh. C2 power factor and capacitance of abb type 0 plus C, AB and type T Condenser bushings,
http://library.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/505c994d0af18dd785256ef9007634d2/$file/c1c2%20paper%20doble%20conference%202003.pdf

Автор: маг. инж. Велислава Христова Райдовска, гл. ас., Технически колеж - Смолян, докторант в катедра „Електроенергетика", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *veli45@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** Доц. д-р А. Тодорова

РЕГУЛИРАНЕ И СТАБИЛИЗИРАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЕТО НА ЛОКАЛНИ КОНСУМАТОРИ

Величка Ботева, Георги Тодоров

Резюме: *Анализирани и сравнени са областите на приложение, предимствата и недостатъците на различните методи за регулиране и стабилизиране на напрежението. Обосновани са предимствата при използване на устройства от електромагнитен тип за регулиране на напрежението на локални консуматори със сравнително малки мощности.*

Ключови думи: *регулатор на напрежение, методи за регулиране.*

REGULATING AND STABILIZING THE VOLTAGE OF THE LOCAL CONSUMERS

Velichka Boteva, George Todorov

Abstract: *The area of application, advantages and disadvantages of a different methods for voltage regulation are analyzed in the paper. The profits of the use of electromagnetic type voltage regulation devices for small power local users, are shown.*

Key words: *voltage regulator, methods of regulation.*

1. Увод

Поддържането на показателите за качество на електрическата енергия в определени нормални граници води до ефективна работа на електротехническите устройства [5]. Техническите и икономическите показатели на консуматорите на електрическа енергия рязко се влошават, когато захранващото напрежение се отклонява от номиналното. Например при намаляване на напрежението с 10% въртящият момент на двигателя се намалява с 19 %. Снижава се и скоростта на въртене, в резултат на което се намалява и производителността на съответния агрегат. Същевременно нарастват токовете в ротора и статора и се получава недопустимо прегряване на двигателя. Срокът на работа на електродвигателя може да се намали двукратно.

Много чувствителни към отклонението на напрежението са осветителните уредби. При лампите с нажежаеми жички понижаването на напрежението с 10 % намалява светлинния поток с 30%, а увеличаването на напрежението с 10% намалява живота на лампите около 4 пъти.

Значителни загуби от отклонението на напрежението се получават в промишлените електротермични и електролитни уредби. При недопустимо понижаване на напрежението при тях рязко спада производителността и се удължава продъл-

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

ISSN 1311-0829

жителността на технологичния процес. Нараства разхода на електрическа енергия, а в някои случаи се намалява качеството на продукцията. При някои дъгови електропещи намаляването на напрежението с повече от 8% може да доведе до прекъсване на процеса, което е авариен режим с чувствителни последици [2].
Отклонението на напрежението оказва следните отрицателни въздействия върху консуматорите и елементите на електроснабдителната система: съкращава живота на изолацията; консуматорите и елементите на електроснабдителната система; повишава загубите на електрическа енергия; увеличава продължителността на технологичния процес; намалява производителността и увеличава себестойността на продукцията; разстройва технологичния процес и увеличава разхода на суровини и брак в продукцията [5].
В последните години в промишлените предприятия и в бита непрекъснато нараства броят на консуматорите с нелинейна V-A характеристика. Това са токоизправители, инвертори, преобразователи на честота и електронни регулатори на напрежение. Този вид консуматори са източници на електромагнитна енергия с несинусоидален характер и се разглеждат като източници на хармоници на тока в електроснабдителните системи. Изследвания показват, че хармониците на тока е най-често срещаният проблем свързан с качеството на електрическата енергия [5].
Някои чувствителни товари, като например компютри и микропроцесори, базирани на AC / DC управляващ контролер, които изискват добро качество на електроенергията за да работят правилно и в някои случаи могат да загубят или повредят ценна информация, поради условията на пропадания /повишения на напрежението [9].
Колебанията на напрежението вследствие на изменение режима на работа на консуматорите и мрежата са неизбежни и много често представляват най-сериозния проблем за потребителите. Поради това се налага да се използват подходящи начини и средства за регулирането му.
За разрешаване на проблемите свързани с регулирането на напрежението са разработени и прилагани различни методи и устройства [1], [2], [7], [8], [10]. Чрез тях освен поддържането на техническите и икономическите показатели на консуматорите на електрическа енергия на работно ниво, чрез регулиране на напрежението в електротехниката се решават и редица други задачи. В електроенергетиката тези устройства служат за управление на енергийните потоци в електропреносните системи, в електрифицирания транспорт - за регулиране без загуба на скоростта, в металургията - за поддържане на подходящ режим на агрегатите за топене, електролиза [2]. При системите за вентилация в обществените сгради, подлези, метроспирки и др. - за намаляване на дебита късно вечер, когато потокът от хора е малък. В осветителните уредби - за димиране (притъмняване) на осветеността на паркинги, паркове, обществени сгради, улично осветление през нощта с цел намаляване на консумацията на електрическа енергия.
Напрежението в отделните елементи на електроенергийната система може да се регулира по следните начини:

- В електрическите централи - чрез изменение на възбуждането на генератора.

- При мощните силови трансформатори – регулиране под товар или поставяне на допълнителни волтодобавачни трансформатори.

- В захранващите мрежи – регулиране на напрежението под товар чрез автотрансформатори или посредством включени в линията кондензатори.

- В подстанциите, захранващи разпределителните мрежи - с изменение коефициента на трансформация на понижаващите трансформатори чрез регулиращи устройства, а също и с волтодобавъчни трансформатори или синхронни компенсатори.

- В разпределителните мрежи – чрез регулируеми под товар трансформатори или автотрансформатори с добавъчно ЕДН.

- В трансформаторните подстанции на потребителите - стъпално регулиране на напрежението на трансформаторите (без възбуждане или под товар), а в отделни случаи чрез плавно регулируеми автотрансформатори или индукционни регулатори.

Един от най-разпространените методи за регулиране на напрежението е чрез изменение на коефициента на трансформация на силовите трансформатори посредством стъпални регулатори. При този метод за поддържане на напрежението при необходимост се изменя броя на навивките на една от намотките на трансформатора. За целта тази намотка на трансформатора е снабдена с определен брой отклонения (изводи), изведени през едно стъпало. Чрез последователно превключване на отклоненията се осъществява стъпалното регулиране на напрежението [2]. Стъпалните регулатори са скъпи, трудоемки съоръжения и за това са предназначени за монтаж само в мощните силови трансформатори. Те са капризни изделия, в които много често възникват повреди. Статистиката сочи, че 41% от всички повреди в мощните силови трансформатори са възникнали в стъпалния регулатор.

Обект на нашата работа е осигуряване на необходимото качество на електрозахранването на консуматори с по-малка мощност, наречени в работата локални консуматори.

2. Методи за регулиране и стабилизиране на напрежението

Устройствата, който са разработени за регулиране на напрежението могат да изпълняват и двете функции: регулиране по задание и стабилизиране на напрежението в определени граници.

Тиристорен регулатор

Основните елементи, както на еднофазния, така и на трифазния тиристорен регулатор на променливо напрежение се явяват антипаралелно свързаните тиристори, посредством който товарът се включва към мрежовото напрежение. Изходното напрежение може да се регулира чрез естествена комутация, като се приложи импулсно-фазовия метод или широчинно-импулсния метод [4]. Заради накъсването не синусоидата всички електронни регулатори генерират висши

хармоници. Добро решение за борбата с вредното влияние от хармониците са цифровите филтри. Те позволяват да се реализират практически удобни алгоритми за обработка на информацията, осигуряват точно изпълнение на операциите, имат стабилни характеристики, допускат едновременно и независимо да се обработват няколко сигнали, притежават висока функционална гъвкавост, в резултат на което могат бързо да се пренастройват алгоритмите за работа, структурата на филтъра и неговите характеристики.

Недостатъците на цифровите филтри са:

- Сравнително висока цена на апаратна реализация;
- Източник на електромагнитен шум [6].

Електронен регулатор за стъпално регулиране

Представляват стабилизатори на напрежение от волтодобавъчен тип, състоящ се от автотрансформатор, мощни семистори или насрещно паралелно включени тиристорни ключове за по-големите мощности, контролер с анализатор на напрежението, максималнотокова защита, защита от претоварване. Обикновено мощните типове разполагат с превключвател "стабилизация - байпас". Функционирането им се базира на превключване на секции от намотката на трансформатор или автотрансформатор.

Контролерът следи напрежението на изхода в реално време и в съответствие с резултата на измерването превключва намотките на автотрансформатора посредством семисторите (или други ключове), поддържайки стабилно изходното напрежение. В случай на авария, най-голямото постигнато бързодействие е 20 ms (един период на мрежово напрежение 50 Hz) за изключване на всички семистори. В схемата на апарата е предвидено следене на температурата на семисторите и блокирането им при прегряване, както и автоматично преминаване в „байпас" режим. За удобство повечето производители вграждат в конструкцията на стабилизатора и сигнализация от прегряване и превключване на вентилаторите в интензивен режим. За момента стъпалните електронни стабилизатори на напрежение са сред най-разпространените в световен мащаб.

Тези стабилизатори са характеризират с висока точност, голямо бързодействие, широк диапазон на регулиране, възможност за работа с товар 0 - 100%, както и висок коефициент на полезно действие. Като недостатък на стъпалните електронни стабилизатори би могло да се постави стъпалното изменение на изходното напрежение. [3]

Стабилизатори с дискретно високочестотно регулиране

Съществуват достатъчно основания този тип стабилизатори да се възприемат от редица специалисти като най-перспективните променливотокови стабилизатори на напрежение. Конструктивно са изградени на основата на съвременни силови бързодействащи IGBT транзистори. Представляват изцяло цифрови стабилизатори, в които управлението на IGBT транзисторите се реализира от микроконтролер в реално време. Входното напрежение се изправя и филтрира. Филтрираното напрежение се превключва с висока честота, така че интегрираните правоъгълни импулси образуват синусоида. По този начин изработеното напрежение

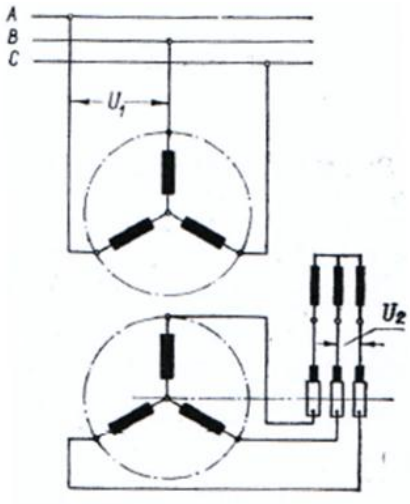
се сумира или изважда с това на входа. Честотата на превключване е постоянна от порядъка на кHz.

Характеристики на този тип стабилизатори са:
- Недостижима за другите типове точност на стабилизация 0,2%;
- Висока относителна енергоемкост S (kVA)/t;
- Плавно регулиране и отсъствие на пререгулиране;
- Изравнява напреженията на отделните фази;
- Високо бързодействие 15000V/s – според лабораторни данни;
- Отсъствие на пререгулиране и отскоци;
- Фактор на мощността близък до единица;
- Възможност за работа с товар от 0-100%;
- Висок КПД (99,5%).

Като недостатък на стабилизаторите с дискретно високочестотно регулиране би могло да се посочи очакваната им по-висока цена в сравнение с други видове регулатори [3].

Индукционни регулатори

Един от първите регулатори за плавно, безконтактно регулиране на напрежението под товар са индукционните регулатори (фиг.1). Те представляват асинхронна машина с неподвижен ротор, който може да се завърта в една или друга посока около оста си с помощта на червячна предавка. Индукционните регулатори се изпълняват както в еднофазен, така и в трифазен вариант, но еднофазния индукционнен регулатор се използва по рядко.



Фиг.1. Индукционен регулатор. [1]

Физическите процеси в индукционния регулатор са аналогични на обикновения трансформатор, обаче тук полето е въртящо и има наличие на по-значителни въздушни междини. Следователно по отношение на основните уравнения и векторните диаграми ще съществува само количествена разлика (по-голям намагнитващ ток, по-големи активни и индуктивни падове на напрежението в намотките). Има недостатък, че не може да работи в паралел с нормални силови

трансформатори поради дефазирането на първичното и вторичното напрежение. Освен това на вала му възниква значителен момент, който трябва да се преодолява от задвижващия механизъм в процеса на регулиране [1].

Стабилизатори с подмагнитване

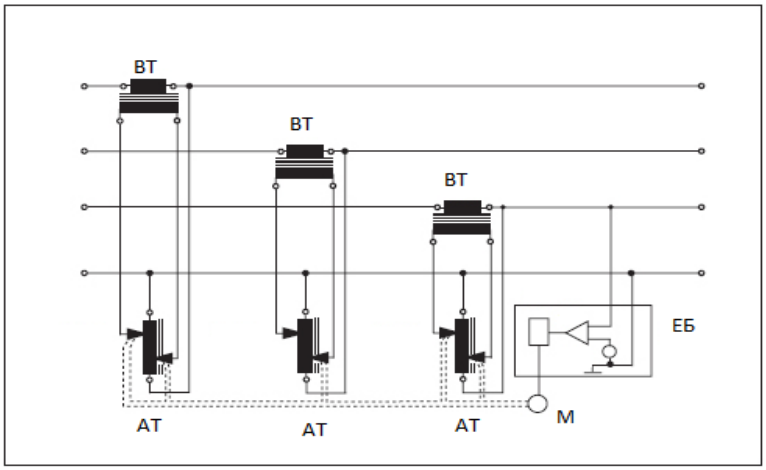
Поддържат постоянно напрежение на изхода, като изменят коефициента на трансформация по пътя на локално подмагнитване на специално бедро от трансформатора. По специален начин е конструирана и намотката върху трансформатора. Характеризират се с висока претоварваща способност. За сметка на това имат тесен диапазон на регулиране и генерират мощни хармоници в сравнение с другите видове променливотокови стабилизатори на напрежение. За момента намират ограничено приложение.

Предимства: високо бързодействие; висока претоварваща способност; относително висока точност на регулиране.

Недостатъци: на стабилизаторите с подмагнитване са: малък диапазон на регулиране; повишен шум и хармоници; значителна маса. [3]

Регулираща електромагнитна система състояща се от трансформатор-автотрансформатор

Системата е изградена от волтодобавъчен (волтоотнемащ) трансформатор, вторичната намотка на който е свързана последователно на товара. Първичната му намотка се захранва от регулируем автотрансформатор, който има за регулиращ елемент сервомотор. Управлението на сервомотора се осъществява от следяща микропроцесорна система - фиг.2. [7], [11]. По този начин се осигурява плавно регулиране на напрежението на товара, без изкривяване на формата му.



Фиг.2. Регулираща електромагнитна система състояща се от трансформатор – автотрансформатор. [7]

Системата може да работи в еднофазно или трифазно изпълнение. При трифазната система регулирането на фазите може да бъде отделно за всяка от тях, тъй като еднофазните товари са разпределени и се изменят по случаен характер

Предимства :

- Плавна работа при изменение на напрежението или тока на консуматора;
- Висока точност на стабилизация;

- Висока скорост на обработка на коригиращото задание;
- Голяма претоварваща способност, около 200% за 4 s и 100% за 8 s, постижима, благодарение на вградения помощен трансформатор и по-малкото натоварване, на което е подложена електромеханичната част. Това позволява да се избере стабилизатор в зависимост от средната мощност на товара и значително да се съкратят разходите за допълнително оборудване. Икономията се дължи на по-малката инсталирана мощност;
- При този тип стабилизатори практически отсъства комутационен процес и възникване на електрически смущения;
- Малки габарити, широк диапазон на стабилизация, стабилна работа и при нулев товар;
- Точността на регулиране е постоянна в целия диапазон, заради следящата система сервомотор- автотрансформатор;
- Фазите се регулират независимо. Ъгълът между тях е винаги постоянен;
- Стабилизаторите работят практически безшумно;
- Регулирането не зависи от честотата на мрежата;
- Електромеханичните стабилизатори показват добри експлоатационни характеристики и при тежки промишлени условия;
- Практически отсъстват хармоници.

Недостатъци:
- Наличието на движещи се части в конструкцията на стабилизатора;
- Необходимост от обслужване на сервопривода - един, два пъти годишно;
- При отрицателни температури е необходимо подгряване с оглед запазване доброто експлоатационно състояние на електрониката и сервопривода.

3. Заключение

Проблемите свързани с качеството на електрическата енергия, породени от краткотрайно или дълготрайно отклонение на напрежението, мотивират търсенето на методи за неговото подходящо стабилизиране и регулиране.

Разработени са и се използват различни електронни устройства, които позволяват да се изпълнят изискванията за конкретното приложения, но в общия случай са източник на висши хармонични и влияят върху нормалната работа на останалите консуматори.

Регулаторите от електромагнитен тип позволяват регулиране в широки граници без да променят хармоничния състав на напрежението и въпреки че имат по-големи размери и маса са предпочитани за локални консуматори, където надеждността и възможността за беззагубно регулиране са решаващи за избора на вида устройство.

Литература

[1] Дачев А. П. „Специални силови трансформатори”, Техника София, 1967

[2] Драгомиров Т. „Стъпални регулатори на високо напрежение”, ННІ-В.

[3] Инженеринг ревю- брой 1, 2008, януари-февруари

[4] Начев Н. А., Г. Г. Кръстев, Н. П. Градинаров, Ев. И. Попов, М. Х. Анчев, „Промишлена електроника”, София, 2000

[5] Цанев Ц., Св. Цветкова „Качество на електрическата енергия”, Авангард прима, София, 2011

[6] Цифрови филтри- Лекция 8

[7] *www.salicru.com*

[8] Ангелов А., Д. А. Димитров „ Елетрически машини - първа част”, Техника, 1976.

[9] Mekri Fatiha, Machmoum Mohamed, Ait-Ahmed Nadia, “New hysteresis control band of an unified power quality conditioner”, Electric Power Systems Research 81, 2011.

[10] *http://www.powersines.com*

[11] *www.lec.hit.bg*

Автори: маг.инж. Величка Руменова Ботева, докторант, катедра “Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *velichka_boteva@abv.bg*; д-р инж. Георги Тодоров, доцент, катедра “Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *gtto@tu-sofia.bg*.

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент**: гл. ас. д-р Адриан Иванов

СЪВРЕМЕННИ ТЕНДЕНЦИИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ОСВЕТИТЕЛНИТЕ УРЕДБИ

Виктор Манов

Резюме: *В доклада са представени конкретни методи за повишаване на енергийната ефективност на външни осветителни уредби. Направено е сравнение между конвенционални и съвременни уредби.*

Ключови думи: *енергийна ефективност, осветление, мезопична видимост*

CONTEMPORARY TENDENCIES ABOUT INCREASING OF EFFICIENCY OF LIGHTING SYSTEMS

Viktor Manov

Abstract: *In the report are presented particular methods for increasing of energy efficiency of the outdoor lighting. A comparison is done between conventional and recent lighting systems.*

Keywords: *energy efficiency, lighting, mesopic vision*

1. Въведение

Повишаването на енергийната ефективност за осветление е задължително условие за подобряването на конкурентоспособността на българския бизнес и за намаляване на публичните разходи за електроенергия. В България от години се наблюдава неблагоприятна тенденция от псевдо-мерки за повишаване на енергийната ефективност. В обосновката си тези проекти сравняват само консумираната електроенергия, без да се проследява светлотехническия ефект и последващите разходи за поддръжка и експлоатация. Няма нормална икономическа логика в електрифицирани селища да се ползват системи за улично осветление с индивидуални фотоволтаични панели за всеки осветител на този етап от развитие на тази технология. Съвременните тенденции са за използване на „бяла светлина” за улично осветление, светлинни източници с повишен светлинен добив, адаптиране нивото на осветеност/яркост в зависимост от непосредствените нужди.

2. Улични осветителни уредби

Уличното осветление има стриктни технически изисквания и предоставя важна добавена стойност към икономиката на градовете. За новите проекти за външно

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

ISSN 1311-0829

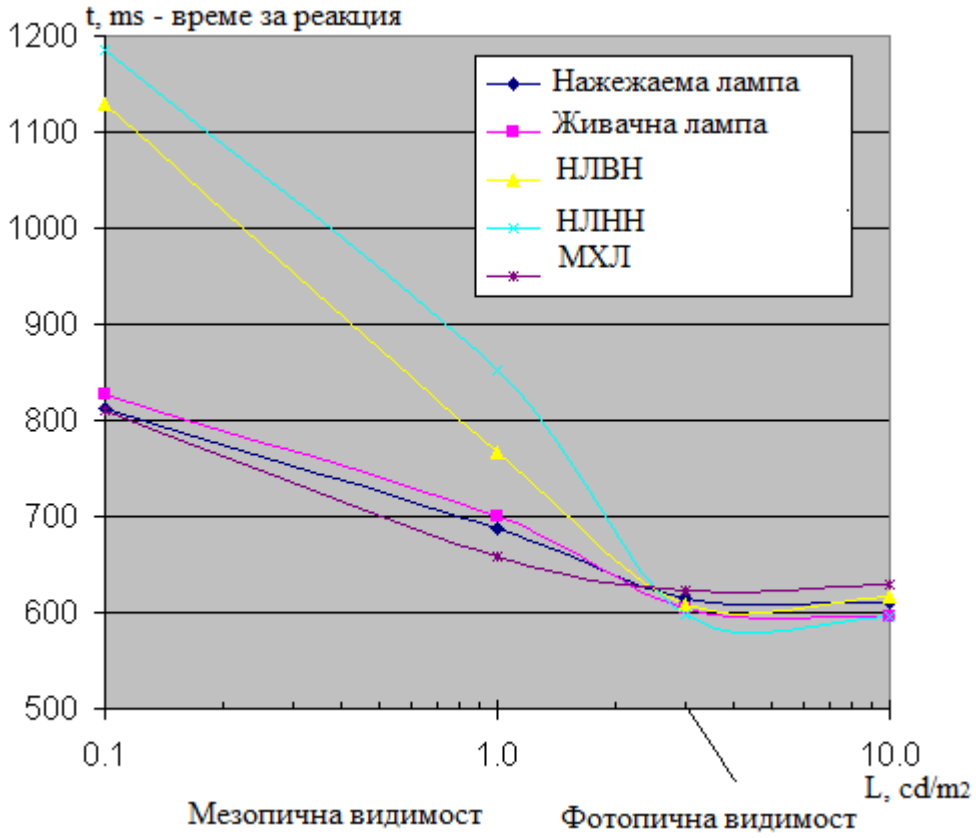
осветление, при които инвеститорът има дълготрайни интереси, качествените светлодиодни осветители с оптимално отвеждане на топлината, с дълготрайно висока степен на защита на оптичната част (IP≥65), с прецизна оптика за специфичните нужди, която не заслепява шофьорите (съгласно БДС EN13201-2), са без алтернатива. В таблична форма (табл.1) са представени светлотехнически изчисления за конкретна задача: Нова улична осветителна уредба (УОУ) с ширина на двупосочното платно 6м и определен светлотехнически клас ME5, дължина на участъка 2260m.

Табл.1.

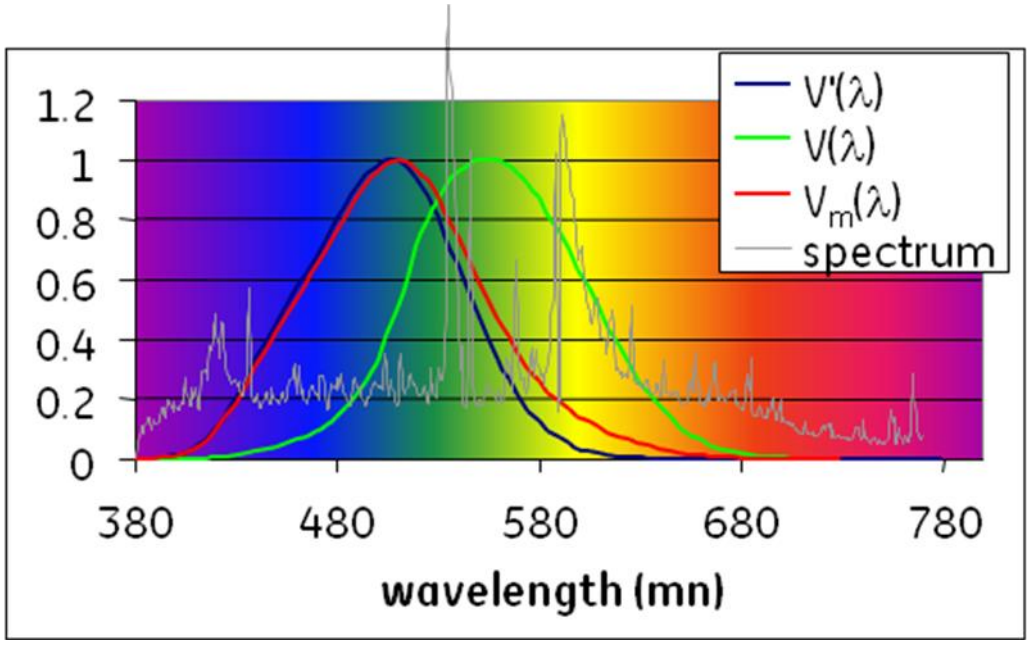
Пътно платно с две ленти и обща ширина 6 m, с дължина на участъка 2260m. Светлотехнически клас ME5.			
Осветител	УО LED AXBX - 4000K	УО-1 50W HPS, η>80%	УО-1 50W HPS, η>80%
Светлинен поток от осветител, lm	3400	3608	3608
Брой осветитители	63	63	78
P, освет. [W]	43	62	62
$P_{УОУ,}$ [W]	2709		4836
Междустълбие, L[m]	36	36	29
Вис. окачване H[m]	6.8	6.8	9.5
L, cd/m^2 >0.5	0.53	0.64	0.5
Uo >0.35	0.39	~~0.04~~	0.41
UI >0.4	0.47	~~0.02~~	0.51
TI <15	15	~~22~~	4
SR >50	50	~~21~~	50
Год. изп., часа	4000	4000	4000
kWh/г за УОУ	**10836**		**19344**

От анализа на резултатите е видно, че базирайки се на перфектната светлодиодна оптика, се намалява броят на необходимите осветители, респективно броят на стълбовете, а също така и тяхната височина, спазвайки светлотехническите изисквания. Годишната консумация на електроенергия за УОУ ще бъде почти **два пъти по-ниска**, при използване на светлодиодни УО, сравнено с конвенционални осветители с НЛВН.

Друга възможност за подобряване на енергийната ефективност на УОУ е прилагането и стандартизирането на съвременни изследвания относно времето за реакция на шофьорите в зависимост от цвета на светлината и околната яркост – фиг.1 [1]. Подобен подход е приложен в препоръките на CIE - Technical Report 191:2010. Цялата светлотехническа индустрия се базира на фотометриране във видимия спектър, като оценката се осъществява спрямо спектралната чувствителност на човешкото око. Досега при фотометриране се е използвала въведената от CIE през 1924г. спектрална зависимост V(λ) – фиг.2. Въведената от CIE през 1951 г. и скотопична спектрална чувствителност V'(λ) не е била използвана до днешни дни в практиката [3].



Фиг.1. Мезопичната видимост обхваща областите между фотопичната ($L>3cd/m^2$) и скотопичната видимост($L<10^{-3}cd/m^2$).



Фиг.2. Скотопична, фотопична и мезопична чувствителност на окото

Също така се промени и технологията за производство на метал-халогенни лампи и сега на пазара се предлагат регулируеми керамични МХЛ с мощност между 50 и 150W, със среден живот 24000ч, ефективност 105-111lm/W, за стандартни фасунги и баласти (StreetWize), които превишават добива на последно поколение НЛВН с около 12% - табл.2.

Табл.2

Мощност на лампата		50W	70W	100W	150W
НЛВН - до 13.04.12	Светлинен поток, lm	3300	5800	9200	14500
НЛВН - Lucalox XO		4400	6600	10700	17500
МХЛ – CMH StreetWise		5000	7640	10900	16200
НЛВН - до 13.04.12, спрямо МХЛ		-34%	-24%	-15.60%	-10.49%
Lucalox XO, спрямо МХЛ		-12%	-13.60%	-1.83%	8.02%

Излъчваният светлинен поток от НЛВН Lucalox и керамичните лампи CMH, приведени към мезопичната крива на CIE V'(λ) ни показват, че при ниски яркости на пътното платно <0.5cd/m^2, УОУ проектирани/изпълнени с НЛВН 150W, могат да бъдат заменени с керамични МХЛ 70W.

3. Тунелни осветителни уредби

Дневната хоризонтална осветеност E извън тунела се изменя в много широки граници в зависимост от дневното часово време, годишния календар, атмосферните условия – практически от 0 до повече от 100 000lx. Също така, в голям диапазон от няколко порядъка варира яркостта на обкръжението на входа на тунела. За да се преодолее ефектът на "черната дупка" и се създадат условия за добра видимост и безопасно преминаване през тунела, трябва да се осигури подходящо осветление в неговите входна, преходна и централна зони. Тунелната осветителна уредба трябва да бъде оразмерена съобразно най-високите дневни осветености и яркости, които очевидно ще се реализират с най-голям брой и мощности на инсталираните осветители. При по-ниски дневни осветености и яркости е целесъобразно да се намали интензивността на осветлението вътре в тунела, като се изключат част от осветителите или се намали тяхната мощност. По този начин може да се реализира значителна икономия на електроенергия.

В България най-широко приложение за регулиране на нивото на яркостта в тунелните тръби са придобили 3, 4-степенно стъпално регулиране. Сравнително с най-малки капиталовложения лесно могат да се осъществят следните нива на яркостта във входната зона на тунела: 100%, 87,5%, 75%, 62,5%, 50%, 37,5%, 25%, 12,5%.

Практикува се отделните нива да се определят, като се разпределят равномерно:

-при 3-степенното регулиране, нивата са 37.5%, 62.5% и 100%;

-при 4-степенното регулиране, нивата са 25%, 50%, 75 и 100%;

-при съобразяване на годишната времева продължителност на адаптационната яркост и съответните необходими мощности за постигане на желаните яркости в тунела [2] се оказва, че можем да постигнем икономия на електроенергия от 10% - табл.3, ако нивата са съответно: 100%, 25% и 12,5 % и 100%, 62,5%, 37,5% и 12,5%.

Табл.3

	три степени	четири степени
Годишна консумация при равномерно разпределени нива kWh/г	63807	56575
Годишна консумация при оптимално разпределени нива kWh/г	57551	50695

3. Заключение

Прилагането на съвременни светлинни източници и техники, адаптирането на последните научни изследвания в областта мезопичната видимост могат да спомогнат за по-ефективното използване на електроенергията и намаляване на вечерният пик в товаровия график на електроенергийната система. Внедряването на посочените и на други подобни мерки могат значително да намалят необходимостта да се правят огромни неефективни държавни инвестиционни разходи в енергетиката.

Литература

[1] GE Lighting, ***Street lighting/Outdoor Lighting-Presentation Aug'13***
[2] Василев Н., В. Манов, ***Повишаване на ефективността на автоматичното управление на тунелното осветление – Истанбул'2002***
[3] Halonen Liisa, Marjukka Puolakka, Chairman & Secretary of CIE TC1-58, CIE and Mesopic Photometry, 2013
[4] *http://www.macular.org/images/normaleye.gif*
[5] *http://www.accessexcellence.org/AE/AEC/CC/vision_background.html*
[6] *http://www.lightinglab.fi/CIETC1-58/mphotometry.html*
[7] *http://www.optics.arizona.edu/Palmer/rpfaq/rpfaq.pdf*
[8] *http://www.cie.co.at/framepublications.html*
[9] *http://www.lightinglab.fi/CIETC1-58/index.html*
[10] *http://www.cie.co.at/framepublications.html*
[11] *http://www.lightinglab.fi/CIETC1-58/index.html*
[12] G. Zissis, S. A. Mucklejohn, IEC Centenary challenge paper, 2006
[13] *www.lrc.rpi.edu/programs/transportation*
[14] CIE expert symposium 05: Vision and lighting in mesopic condition,
[15] *http://vision.vein.hu/CIESYMP05/*

Автор: маг. инж. Виктор Йорданов Манов, докторант, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *vikmann@yahoo.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** Проф. А. Пачаманов

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ ПРИ ДЪГОГАСЕНЕ В РАЗЛИЧНИ ДЪГОГАСИТЕЛНИ СРЕДИ

Галина Чернева, Георги Павлов, Любомир Секулов, Явор Исаев, Тодор Лалев

Резюме: *В настоящата работа са представени резултати от изследване на дъгогасителни процеси в различни газови среди. Изследването е направено на лабораторен стенд, проектиран и създаден от колектив от преподаватели и студенти във Висшето транспортно училище «Тодор Каблешков».*

Ключови думи: *дъгогасителни процеси, преходни процеси, газови среди*

INVESTIGATION AND ANALYSIS OF TRANSITION PROCESSES BY ARC-STILLING IN DIFFERENT GAS ENVIRONMENT

Galina Cherneva, Georgi Pavlov, Lubomir Sekulov, Javor Isaev, Todor Lalev

Abstract: *In this paper are presented the results of research the arc-stilling processes in different gas environments under laboratory conditions. The research was done by stand for laboratory testing at the Todor Kableshkov University of Transport.*

Keywords: *arc-stilling processes, transient processes, gas environments*

1. Въведение

Комутационните апарати за високо и средно напрежение, към които спадат прекъсвачите, трябва да включват и изключват, както при нормални експлоатационни режими, така и при всички аварийни режими, предвидени в стандартите. Токовете на късо съединение, изключвани от съвременните прекъсвачи за високо напрежение, достигат десетки килоампера. Дейонизацията в дъговата междина при такива токове, съпроводена с голямата честота на възстановяващото се напрежение е голям технически проблем. Основна величина е времето, необходимо на релейната защита да сработи и собственото време, нужно на прекъсвачите да изключат (времето от подаване на сигнал от релейната защита на изключващия механизъм до началото на отделяне на контактните тела едно от друго). В повечето случаи това време е по-малко от времето за затихване на апериодичната съставка на тока на късо съединение, така че пълният ток на изключване на прекъсвачите е равен на сумата от периодичната и апериодичната съставка на тока в момента на отделяне на контактите. Дъгогасителната среда в автоматичните прекъсвачи определя основните параметри на апарата в статичен и динамичен режим. В практиката съществува голямо разнообразие от технологии за надеждно гасене на електрически дъги [1, 2].

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

ISSN 1311-0829

В настоящия момент основно се използват прекъсвачи с газова дъгогасителна среда. Новите изследвания в тази посока водят до едновременното разработване главно на елегазови и вакуумни прекъсвачи [3, 4], които успешно заменят старите типове и се налагат като основен елемент от подстанциите средно и високо напрежение.

Основните технически показатели на прекъсвачите са: номинално напрежение, номинален ток, изключвателна мощност еднократна, изключвателна мощност при АПВ, ток на динамична устойчивост, ток на термична устойчивост. Други характерни параметри са времената за сработване на прекъсвача: време за включване, време за прекъсване, време за престой. Времето за изключване е важен номинален параметър и представлява интервала от време от момента на подаване на сигнал за изключване от релейната защита до момента на изгасване на дъгите в трите полюса на прекъсвача. То се състои от собственото време на прекъсвача (от момента на подаване на сигнал за изключване до момента на разделяне на дъгогасителните контакти) и времето за горене на дъгите в трите полюса. Времето за гасене на дъгата $t_{д.г.}$ е съставна част от времето за изключване, т.е.

$$t_{изкл} = t_{рз} + t_{дг}\,, \tag{1}$$

където $t_{рз}$ е време за задействане на релейната защита включващо времето за задействане на изключващата бобина.

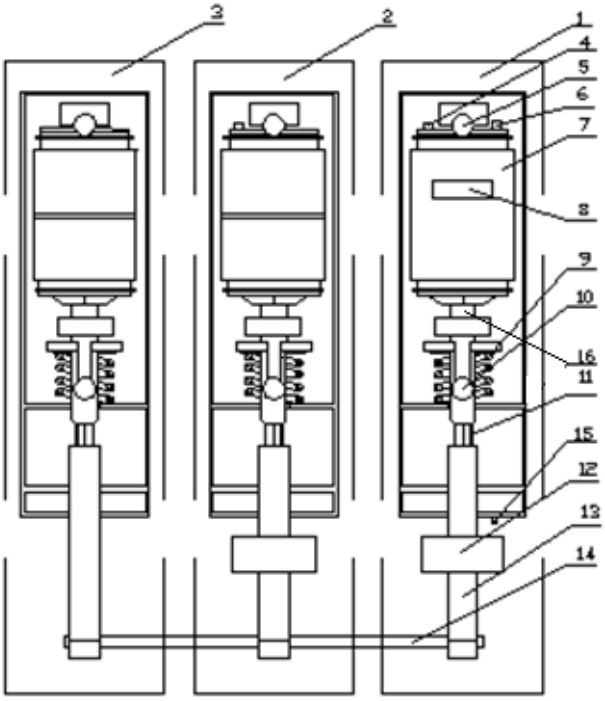
В настоящата работа са представени резултати от изследване на дъгогасителни процеси в различни газови среди в лабораторни условия. Изследването е направено на стенд, проектиран и създаден от колектив от преподаватели и студенти във Висшето транспортно училище «Тодор Каблешков».Обект на изследване е времето за гасене на дъгата $t_{д.г.}$ в различните газови среди, като основен параметър при средномощните и мощни прекъсвачи.

2. Описание на лабораторния стенд

Опитната постановка, която е в основата на лабораторния стенд, представлява модифициран триполюсен вакуумен прекъсвач за напрежение 10 kV/300A. Тя е показана на фиг.1. Камерата на едната фаза 1 на прекъсвача е пригодена за изследванията. В нея са монтирани два щуцера 6 и 15, които служат за подаване на газ и измерване на налягането в дъгогасителната камера 7. Подменен е корпусът на камерата и на него е монтирано закалено наблюдателно стъкло 8.

На подвижната изолационна щанга 13 е монтиран динамометър 12, който измерва силите на опън и натиск, нагоре (изключване) или надолу (включване) от непоказаното пружинно и електромагнитно задвижване чрез вала 14. Горният токов извод 5 е неподвижно свързан електрически с единия полюс на контактната система в дъгогасителна камера. Долният токов извод 10, посредством гъвкава токова връзка, електрически контактува с буталото 16, подпряно от пружина 9. За сравнение на показателите се използва вакуумната камера 2 на прекъсвача.

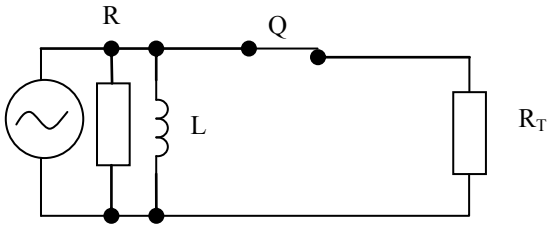
1 –преработена фаза на прекъсвача
2 – втора фаза на прекъсвача
3 – трета фаза на прекъсвача
4 – трансдуктор за налягане
5 – горен токов извод
6 – щуцер
7 – дъгогасителна камера
8 – наблюдателно стъкло
9 – пружина
10 – долен токов извод
11– регулатор
12– динамометър
13– изолационна щанга
14 – вал
15 – щуцер
16 – бутало



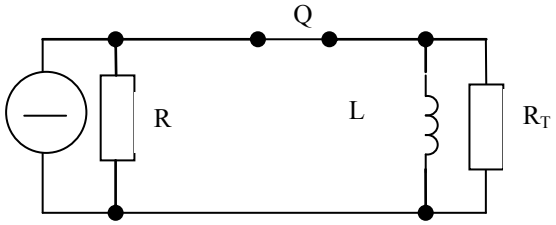
Фиг.1. Общ изглед на лабораторния стенд

Обемът на всяка една камера е 35 cm^3. Междуелектродното разстояние е 8 мм с възможност за регулиране.

Принципната електрическа схема при на свързване на прекъсвача при променливо напрежение е показана на фиг.2, където **Q** е изключващият прекъсвач с изследваните дъгогасителни камери. Индуктивността **L** на генератора е известна. Принципната електрическа схема на свързване при постоянно напрежение е показана на фиг.3. Свързаният товар $\mathbf{R_T}$ е с известна индуктивност **L**, като целта е стендът да се доближи максимално до реалните условия за експлоатация.



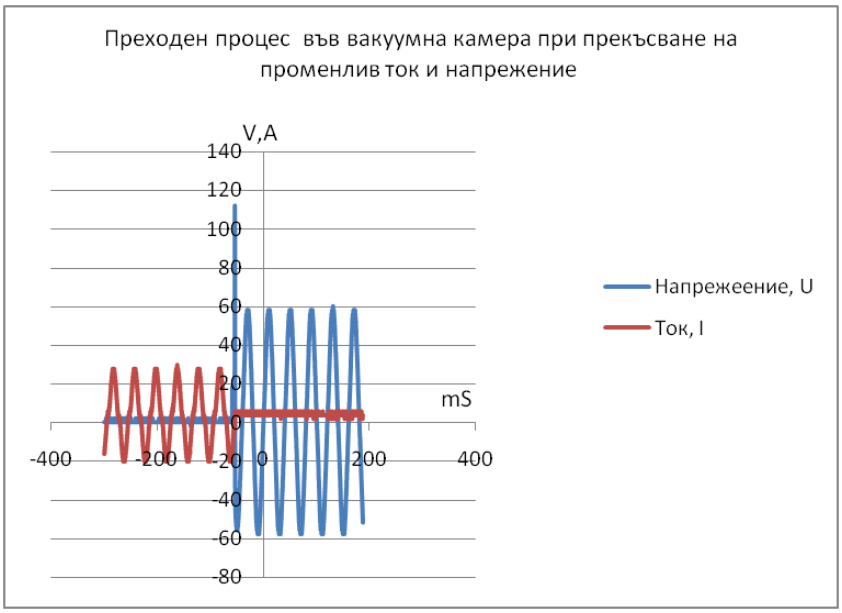
Фиг.2. Принципна схема на свързване при променливо напрежение



Фиг.3 Принципна схема на свързване при постоянно напрежение

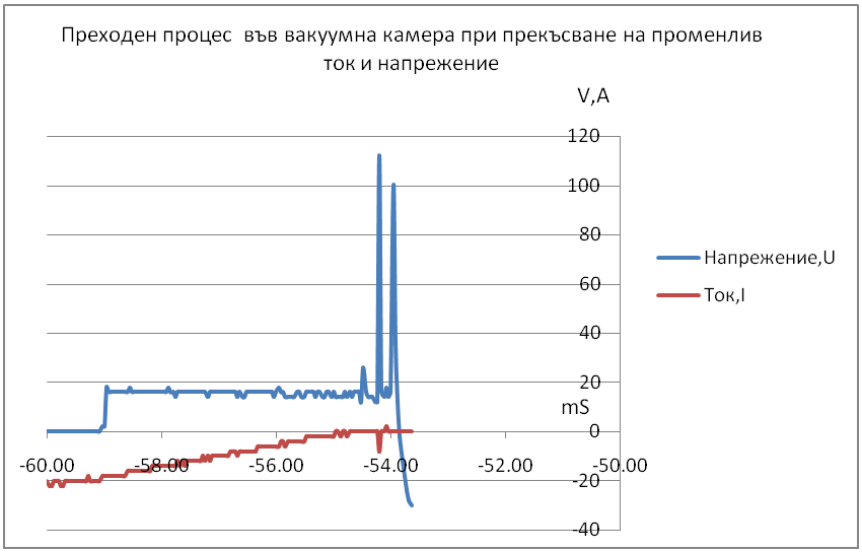
3. Резултати от измерванията

Изключващата способност на дъгогасителното устройство се оценява чрез изменението на напрежението $\frac{du}{dt}$ и скоростта на намаляване на тока $\frac{di}{dt}$. Тези зависимости са изследвани и показани графично както за вакуумната камера 2 фиг.4 и фиг.5, така и за преработената камера 7 на прекъсвача при прекъсване на променливо напрежение 48 V. В преработената камера последователно се осигурява среда с преобладаващо съдържание на кислород фиг.6 и фиг.7 и на азот фиг.8 и фиг.9.



Фиг. 4. Преходен процес при променливо напрежение

На фиг.4 съвсем ясно се вижда пренапрежението, получено при изключване на вакуумния прекъсвач, което надвишава 2 пъти максималната стойност на подадено напрежение от генератора.



Фиг.5. Преходен процес при променливо напрежение

На фиг.5 е изобразен процесът, разгънат по време. При първата максимална стойност има пробив, т.е. налице е разряд на ток. Двете максимални амплитуди са на времеотстояние 40 μs. Това е основният параметър за сравняване и участва при определяне на енергията на дъгата

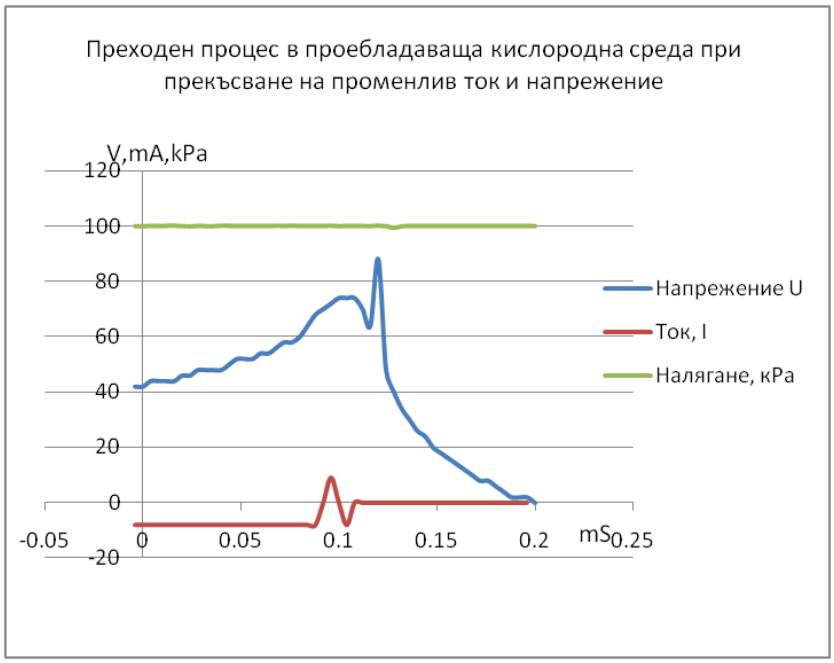
$$W = \int Pdt \text{ , J,} \qquad (2)$$

както и за определяне времето за самото гасене на дъгата. Електрическата якост на дъговата междина се възстановява с висока скорост за много кратко време (10-12 μs), което е изразено с времето на задният фронт на пренапрежението. Това се дължи на интензивната дифузия на заредените частици поради голямата разлика в плътността им в областта на изгасналата дъга и във вакуума в околното пространство.

На фиг.6 графично е изобразен преходният процес в кислородна среда, като от-

четената диалектрична якост при изпитваното напрежение е около 100 μs, както и продължителността на самия процес е 3 ms (фиг.7).

Фиг.6



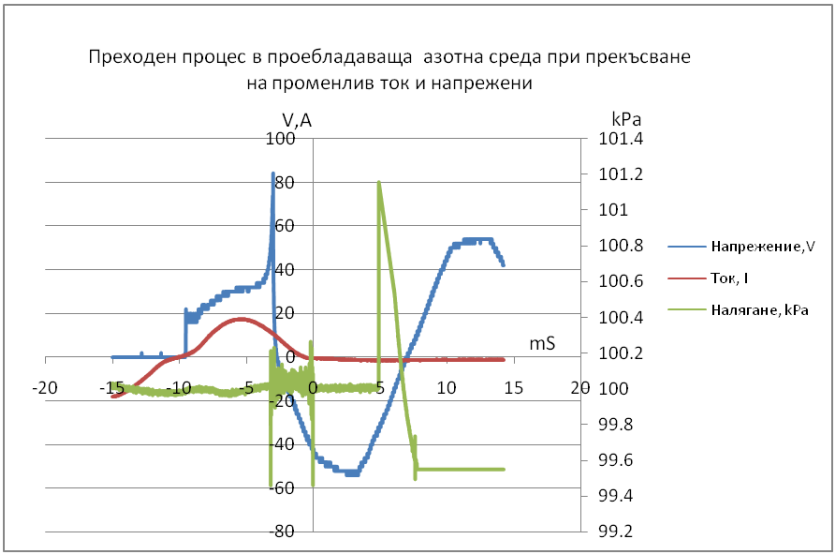
Фиг.7

Налягането почти не се променя, като варира в границите от 98 до 108 kPa. Полученото незначително подналягане в края на преходния процес е вследствие механичното изключване на прекъсвача и увеличаване обемът на газовата среда, за сметка на подвижната контактна система.

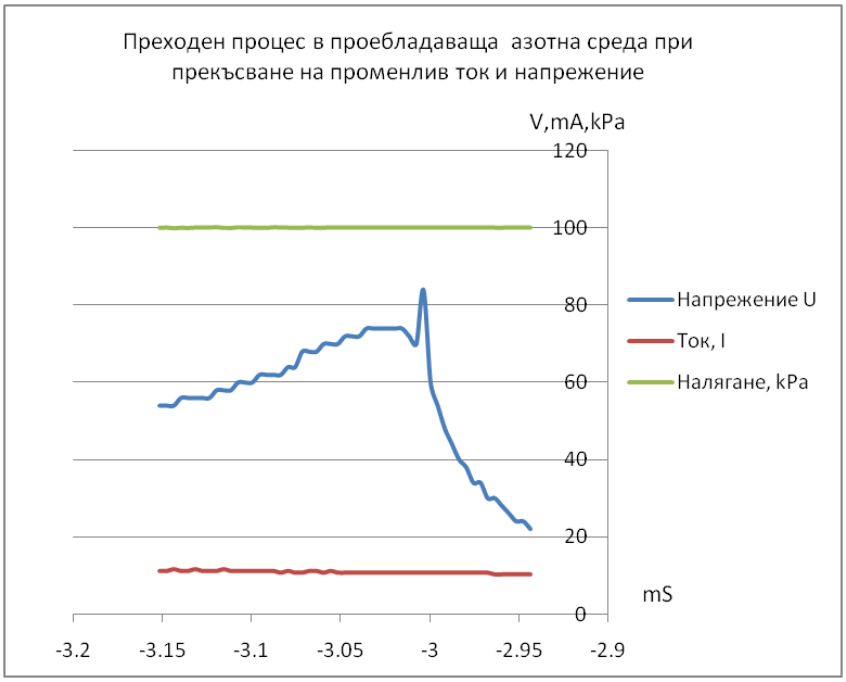
На фиг.8 графично е изобразен преходният процес в азотна среда, като отчетената диалектрична якост при изпитваното напрежение е около 100 μs, а продължителността на самият процес е 5 ms (фиг.9). Налягането почти не се променя като варира в границите от 99 до 101 kPa. Полученото незначително подналягане в края на преходния процес е вследствие механичното изключване на

прекъсвача и увеличаване обемът на газовата среда, за сметка на подвижната контактна система.

Изследвани са преходните процеси и при прекъсване на постоянен ток и напрежение при различни газови среди. Те са показани на съответните графики: за преобладаваща азотна среда, фиг.10 и за кислородна среда, фиг.11.

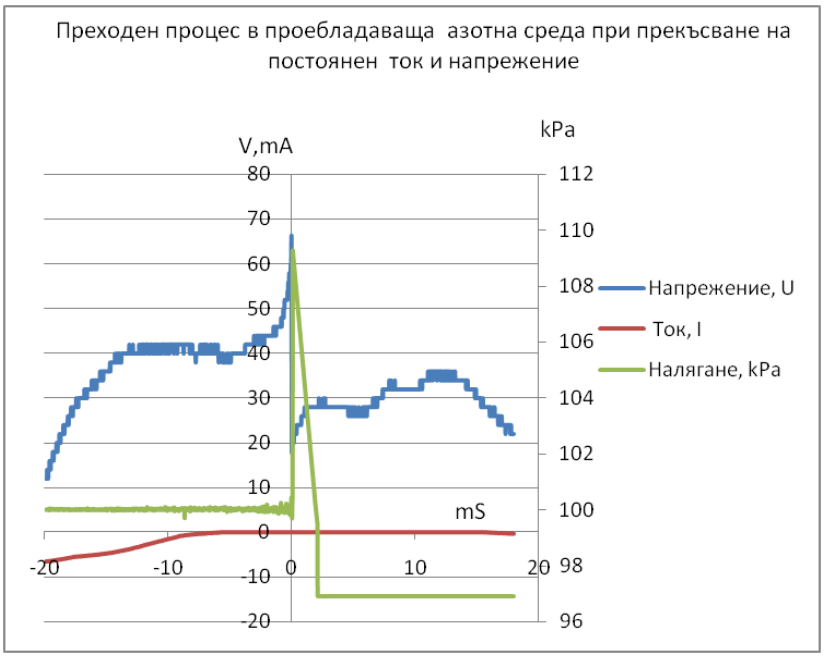


Фиг.8



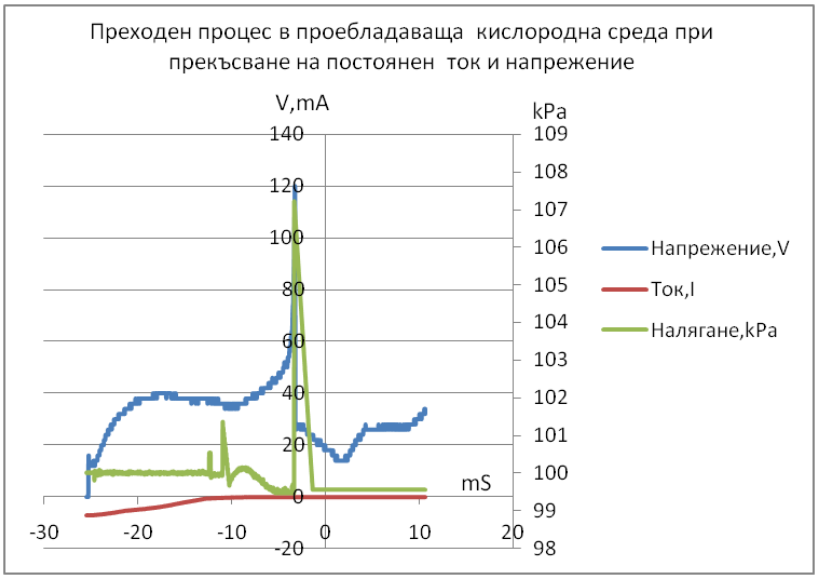
Фиг.9

В азотна среда (фиг.10) преходният процес е с продължителност 20 ms, като възстановяването на диалектричната якост е 1 ms и съвпада по време с повишаване на налягането в камерата. Изменението на налягането е от 97 до 110 кРа.



Фиг. 10

В кислородна среда (фиг.11) преходният процес е 25 ms, като се наблюдава повишаване на налягането преди завършване на процеса, вследствие свойството на кислорода да поддържа горенето.



Фиг.11

4. Заключение

В настоящата работа са изследвани преходни процеси при дъгогасене на променливо и постоянно напрежение в газови среди с преобладаващо съдържание на кислород и на азот. Резултатите от това изследване са сравнени с аналогични показатели за камера с вакуум, която е подходяща за сравнение, тъй като е с най-малко време за гасене на дъгата от познатите маломаслени, елегазови и въздушни прекъсвачи. По-важните изводи от изследванията са следните.

Пренапрежението, получено при изключване на вакуумния прекъсвач при променливо напрежение, дадено на фиг.4, характеризира времето за дъгогасене. То надвишава два пъти максималната стойност на подадено напрежение от генера-

тора. Както се вижда от фиг.6 и фиг.8, пренапреженията в преобладаваща съответно азотна и кислородна среда са значително по-ниски от това на вакуумния прекъсвач. Поради това времето за горене на дъгата в другите газови среди е по-голямо, отколкото във вакуум. Възстановяването на диалектричната якост при вакуумния прекъсвач е няколко стотин пъти по-бързо от това при другите газови среди.

При постоянно напрежение преходният процес е по-силно изразен, поради включения индуктивен товар. Резултатите за преобладаваща азотна и преобладаваща кислородна среда са аналогични както и при променливо напрежение.

Литература

[1] Александров Ал. (2006), ***Електрически апарати и машини***. С. Техника. 2006.

[2] Кукеков Г. А. (1992), ***Выключатели переменного тока высокого напряжения***. Л. Энергия, 1992.

[3] (2011), ***Съвременни прекъсвачи средно напрежение***. Сп. Енергия, 2011г., бр.7

[4] Брандиски К., Ж. Георгиев, В. Младенов, Р. Станчева (2004), ***Теоретична електротехника***, ч. I I, София, 2004г.

[5] Chen B. (2000), ***Intelligent vacuum circuit breaker CN20121229666.*** ELECTRICAL CO LTD. 2000.

[6] Hydrogen properties 2011-11-30. *http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf*

Автори: Галина Чернева, доц. д-р, катедра „Електротехника и физика”, ВТУ „Т. Каблешков”, E-mail address: *cherneva@vtu.bg*; Георги Павлов, проф. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане в транспорта”, ВТУ „Т. Каблешков”, E-mail address: *g_pavlov61@abv.bg*; Любомир Секулов, студент, катедра „Електроенергетика и електрообзавеждане”, ВТУ “Тодор Каблешков”, E-mail address: *res_start@abv.bg;* Явор Исаев, докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане в транспорта”, ВТУ „Т. Каблешков”, E-mail address: *jzi1986@abv.bg*; Тодор Лалев, докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане в транспорта”, ВТУ „Т. Каблешков”, главен енергетик “Метрополитен” ЕААД, E-mail address: *16nakon@gmail.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** проф. д-р инж. Р. Ценева

МЕХАНИЧЕН РЕСУРС НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ В ПЕРИОДИЧНИ РЕЖИМИ НА РАБОТА

Ганчо Божилов

Резюме: *В работата се дава метод за определяне на експлоатационния ресурс (дълготрайността) на търкалящите лагери на асинхронни двигатели с кафезен ротор в преходните периодични режими на работа. Показано е, че в периодите на пускане и спиране ресурсът се намалява, като максималният брой включвания и изключвания до пълното износване на лагерите е много голям за двигателите с малка и средна мощност, докато за двигателите с голяма мощност този брой е много по-малък.*

Ключови думи: *Асинхронни двигатели, ресурс, търкалящи лагери, периодични режими, пускане, спиране*

MECHANICAL DURABILITY OF INDUCTION MOTORS BY PERIODICAL DUTY CYCLES

Gantcho Bojilov

Abstract: *In this paper a method for determination of the durability of the rotational bearings of the induction motors with squirrel cage in the transient regimes is give. Is show that by the periods of start and stop the durability decrease and the maximum number of the starts and stops until the total wearing out is very large for the motors with small and middle power, but for the motors with large power this number is very small.*

Keywords: *Induction motors, durability, rotational bearings, transient regimes, start, stop*

Увод. Постановка на проблема

Надеждността на електрическите машини, апарати и трансформатори в значителна степен се определя от надеждността на техните намотки [1,2]. От друга страна надеждността на въртящите се електрически машини се определя и от надеждността на техните лагери, която в много случаи може да има преобладаващо влияние в сравнение с тази на намотките им, особено при чести пускания [3,4]. В процеса на експлоатация лагерите са подложени на различни въздействия, водещи с течение на времето до влошаване на техните качества. Износването и повредите на лагерите произтичат в резултат на механични причини (въртене, натоварване, вибрации и удари), нагряване, влияние на влага, агресивни среди, проникване на прах и други. Във високоволтовите машини същес-

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

ISSN 1311-0829

твено значение има и въздействието на протичащите през лагерите електрически токове.
Известно е също, че експлоатационният ресурс (дълготрайността) на една електрическа машина намалява не само при стационарните процеси, но и в преходните и периодичните режими, като включване и изключване, пускане, спиране и реверсиране, както и при промяна на товара.
Изчислителния ресурс на механичната система на машината представлява средният, респ. гама-процентният ресурс, до момента на вероятен отказ на лагер, който се определя чрез числено интегриране (натрупване) на степента на износване на лагерите и отработените от тях "механични товаро-часове" с отчитане на променящото се натоварване и изменящата се скорост. Според известната формула за избор на търкалящи лагери по зададена дълготрайност в продължителен режим на работа S1 [6,7], ресурсът T [h] е

$$T = \frac{1}{n}\left(\frac{C}{Q}\right)^{3,333}, \qquad (1)$$

където n [min^{-1}] е скоростта на въртене на ротора, C - коефициентът на работоспособност на лагер (взет от каталог или от подходящи справочници [9]), Q - условното натоварване на лагера, определено по известна методика [6,7] на базата на теглото на ротора, едностранното магнитно привличане на ротора към статора и съпротивителния момент от товара върху предавката. Обикновено при конструирането на машини с общо предназначение се залага проектен ресурс на най-натоварения лагер (предния) T = 15000 - 20000 h. От своя страна условното натоварване може да се представи като $Q = Q_0(1 + k\frac{M}{M_н})$, където Q_0 е условното натоварване от теглото и едностранното магнитно привличане, k – коефициент, зависещ от конфигурацията и размерите на вала и предавката, M - въртящият момент на двигателя, $M_н$ - номиналният му момент.
Съгласно БДС EN 60034-1 [5] основните периодични режими на работа на електродвигателите са: режим на работа с периодични прекъсвания S3, режим на работа с периодични прекъсвания и пускане S4, режим на работа с периодични прекъсвания и с електрическо спиране S5, непрекъснат периодичен режим на работа S6, непрекъснат периодичен режим на работа с електрическо спиране S7 и други, като за всеки от тях трябва да се дефинира относителната продължителност на работа в цикъла ОПР = 15, 25, 40 или 60%. Всеки цикъл се състои от време за пускане (развъртане) $t_П$, период (продължителност) на работа при постоянен товар t_P и време за спиране t_C (пауза) .

Метод на изследване

За определяне на ресурса през времето за пускане и спиране, които представляват нестационарни преходни процеси, трябва да се разбие продължителността на преходния процес на N на брой времеподинтервали с ширина Δt, последвана от числено интегриране (натрупване) на степента на износване на лагерите. От тези две времена по-голям интерес преставлява времето за пускане, тъй като то-

гава лагерите са подложени на по-голямо динамично натоварване, отколкото по време на спирането.
За всеки подинтервал от процеса на пускане ще имаме

$$T_i = \frac{1}{n_i}\left(\frac{C}{Q_i}\right)^{3,333}, \quad (2)$$

където Q_i е условното натоварване на лагера в i-тия подинтервал от време, определено на базата на тока I_i и скоростта на въртене n_i на ротора, изчислени или измервани периодически по цифров метод без изключване на машината от мрежата. От тока I_i се определя електромагнитният момент M_i, а от него по известни методики [6,7] се намират силите на лагерните реакции в опорите и натоварването на лагерите, необходими за заместване в горната зависимост.
Изчислителна степен на износване на лагера в съответния интервал

$$D_i = \frac{\Delta t}{T_i}. \quad (3)$$

Резултантен ресурс (дълготрайност) на лагера

$$T = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^{N} D_i} = \frac{i.\Delta t}{\sum_{i=1}^{N} D_i}, \quad (4)$$

където $t_i = i.\Delta t$ е времето в текущия подинтервал, а $\sum_i D_i$ - степента на износване (деградация) на лагера с натрупване в последователните интервали
За да се приложи този метод към изследване на пускането на един асинхронен двигател в работата се предлага следният алгоритъм.

1. Апроксимация на механичната характеристика

Обикновено асинхронните двигатели с кафезен ротор с малка, средна, а в някои случаи и с голяма мощност, се пускат директно без помощта на спомагателни пускови устройства. Освен това масово произвежданите двигатели с общо предназначение се конструират с дълбоки или двойни роторни канали за да се използва ефекта на токовото изместване с цел намаляване на пусковия ток и повишаване на пусковия момент до стойност, съизмерима с максималния. По тази причина, а и поради насищането на магнитната им система, всички активни и индуктивни съпротивления на намотките не са константни, а са функция на съответните токове и на хлъзгането на ротора s; така че електрическите и магнитните вериги са нелинейни. Следователно за определяне на ресурса трябва да се разполага с реалната зависимост на съпротивителния момент на товара от скоростта или от хлъзгането $M_T = f(s)$ и с реалната механична характеристика на двигателя $M = f(s)$, получена по изчислителен или опитен път, след което да се приложи числен метод с предхождащо дигитализиране на характеристиките.
Целта на апроксимацията е да се намерят подходящи аналитични изрази за механичната характеристика на двигателя, които да позволяват удобно определяне на ресурса. Както е известно, механичната характеристика на асинхронния двигател се състои от два добре изразени участъка - пускова част, простираща се в диапазона на хлъзгането от 1 до критичното (”максималното”) хлъзгане s_m, и работна част в диапазона от s_m до хлъзгането при установен режим на работа s_y,

определено от съпротивителния момент на товара. Като се има пред вид, че максималният и пусковият момент на съвременните двигатели са от един порядък [9], подходящи апроксимации на характеристиката са апроксимация с две прави линии или с една права и една дробно-линейна функция, минаващи между точките с координати (1, s_m') и (s_m',0), където s_m' е стойността на хлъзгането, в което се допират двете функции.

$$s_m' = s_н \frac{M_m}{M_н} = s_н k_m . \tag{5}$$

Тези апроксимации се базират на данни от каталозите или документацията, където се дават хлъзганията $s_н$ и s_m и кратностите на максималния и пусковия момент спрямо номиналния k_m и $k_П$.

а) Работна част - права линия, минаваща през точките с координати (0,0) и (s_m', M_m) с уравнение

$$M = M_m \frac{s}{s_m'} . \tag{6}$$

б) Пускова част - права линия, минаваща през точките с координати (1, $M_П$) и (s_m', M_m) с уравнение

$$M = M_П + (M_m - M_П)\frac{1-s}{1-s_m'} . \tag{7}$$

в) Пускова част - дробно-линейна функция от хиперболичн тип, минаваща през точките с координати (1, $M_П$) и (s_m', M_m) с уравнение

$$M = M_m \frac{b+s_m'}{b+s}, \tag{8}$$

където $b = \dfrac{M_П - M_m s_m'}{M_m - M_П} = \dfrac{k_П - k_m s_m'}{k_m - k_П}$.

Сравнението за реални двигатели с мощности от 5 до 250 kW между апроксимация б) и в), която е по-точна, дава грешка, по-малка от 2%.

2. Средни стойности на моментите

Най-напред трябва да се определи времето за пускане, необходимо за намиране на ресурса, което може да се определи по два начина – приблизителен, на базата на средните моменти от механичните характеристики на двигателя и товара, и точен, от реалните форми на характеристиките.

а) Среден момент на двигателя при апроксимация на механичната характеристика с две прави линии

$$M_{ср} = \int_0^{s_m'} M_m \frac{s}{s_m'} ds + \int_{s_m'}^{1} [M_П + (M_m - M_П)\frac{1-s}{1-s_m'}] ds = \frac{M_m + M_П(1-s_m')}{2} . \tag{9}$$

б) Среден момент на двигателя при апроксимация на механичната характеристика с права линия и хипербола

$$M_{ср} = \int_0^{s_m'} M_m \frac{s}{s_m'} ds + \int_{s_m'}^{1} \frac{M_m(b+s_m')}{b+s} ds = \frac{M_m s_m'}{2} + M_m(b+s_m')\ln\frac{b+1}{b+s_m'} . \tag{10}$$

Грешката между двата е по-малка от 1%.

в) Среден момент на товара

Тъй като характеристиката на товара и неговият инерционен момент не са известни предварително, изследването ще се проведе при два вида товар – статичен и линейно изменящ се, т.е.пропорционален на първата степен на скоростта, които са характерни за подемни механизми, конвейери или механизми с триене (напр. валци). В тези случаи средните моменти на товара ще бъдат съответно $M_{T\text{ср}} = M_T$ и $M_{T\text{ср}} = 0{,}5M_T$, но обикновено двигателите не се натоварват повече от $0{,}7M_н$. Механизмите с вентилаторен момент, пропорционален на втората степен на скоростта (вентилатори, помпи, компресори), рядко са подложени на чести пускания или периодични режими и не представляват интерес. Що се отнася инерционния момент на товара, приведен към оста на ротора, той може да бъде значително по-голям от този на ротора на двигателя; затова ще се ограничим до $J_T = 3J_R$ и $J_T = 6J_R$.

3. Определяне на времето за пускане (развъртане)

От основното уравнение на преходния процес при пускане

$$M = M_T + J\frac{d\omega}{dt}, \tag{11}$$

където ω е ъгловата скорост на ротора, t - времето, а $J = J_R + J_T$ – общият инерционен момент на ротора и товара, чрез въвеждане на връзката $\omega = (1-s)\omega_1$, ще се получи времето от решението на интеграла

$$t = -J\omega_1\int_1^s \frac{ds}{M - M_T}. \tag{12}$$

а) Определяне на времето за пускане чрез средните моменти при апроксимация на механичната характеристика с две прави линии

$$t = -J\omega_1\int_1^s \frac{ds}{M_{cp} - M_{Tcp}} = T_{Ma}(1-s) = T_{Ma}\frac{\omega}{\omega_1}, \tag{13}$$

където $T_{Ma} = \dfrac{J\omega_1}{M_{cp} - M_{Tcp}}$ е механичната времеконстанта на двигателя, определена от горния израз. От него се определя времето, необходимо за достигане на хлъзгането в установен режим s_y

$$t_П = \frac{J\omega_1}{M_{cp} - M_{Tcp}}(1-s_y) = T_{Ma}\frac{\omega_y}{\omega_1}, \tag{14}$$

а също и изменението на ъгловата скорост на ротора $\omega = \omega_1\dfrac{t}{T_{Ma}}$. Последният резултат, който е една линейна зависимост, може да изглежда озадачаващ, но многобройните осцилограми, снети върху различни асинхронни двигатели, го потвърждават с голямо приближение.

б) Определяне на времето за пускане чрез реалните моменти при апроксимация на механичната характеристика с две прави линии

$$t_П = t_1 + t_2 = -J\omega_1\int_1^{s_m'} \frac{ds}{M_П + (M_m - M_П)\dfrac{1-s}{1-s_m'} - M_{Ts}} - J\omega_1\int_{s_m'}^{s_y} \frac{ds}{M_m\dfrac{s}{s_m'} - M_{Ts}}, \tag{15}$$

където $M_{Ts} = M_T$ или $M_{Ts} = (1-s)M_T$ според вида на съпротивителния момент – постоянен или линеен.

Решението на горните интеграли води до следните резултати.

$$t_1 = \frac{J\omega_1(1-s_m')}{M_m - M_{\Pi}} \ln \frac{M_m - M_T}{M_{\Pi} - M_T} = T_{Mb}(1-s_m') \ln \frac{M_m - M_T}{M_{\Pi} - M_T}; \tag{16}$$

$$t_2 = -\frac{J\omega_1 s_m'}{M_m} \ln \frac{\frac{s_y}{s_m'} M_m - M_T}{M_m - M_T} = -T_M s_m' \ln \frac{\frac{s_y}{s_m'} M_m - M_T}{M_m - M_T} \tag{17}$$

$$t_1 = \frac{J\omega_1(1-s_m')}{M_m - M_{\Pi} - M_T(1-s_m')} \ln \frac{M_m + M_T(1-s_m')}{M_{\Pi}} = T_{Mc}(1-s_m') \ln \frac{M_m + M_T(1-s_m')}{M_{\Pi}};$$

$$t_2 = -\frac{J\omega_1 s_m'}{M_m(1+s_m')} \ln \frac{\frac{s_y}{s_m'} M_m - \frac{M_T}{1+s_m'}}{M_m - \frac{M_T}{1+s_m'}} = -T_M \frac{s_m'}{1+s_m'} \ln \frac{\frac{s_y}{s_m'} M_m - \frac{M_T}{1+s_m'}}{M_m - \frac{M_T}{1+s_m'}}.$$

С пресмятания върху реални двигатели се получава, че във всички случаи времето $t_2 << t_1$ и че резултатите за t_{Π}, получени чрез средните моменти, са достатъчно близки до тези, получени чрез реалните моменти.

Определянето на времето за пускане чрез реалните моменти при апроксимация с права линия и хипербола може да не се извършва, поради доброто съвпадение на резултатите с апроксимацията с две прави линии.

4. Определяне на ресурса на лагерите през време на пусковия процес

Условното натоварване на лагера в процеса на пускане се определя от динамичния момент, с който се преодолява инерционния момент на товара, и от неговия съпротивителен момент, следователно натоварващият момент ще бъде $M_L = M_J + M_T$. От своя страна от получената по-горе линейна зависимост следва, че $M_J = J\frac{d\omega}{dt} = J\frac{\omega_y}{t_{\Pi}}$. Като се замести времето за пускане от горните равенства, ще се получи, че $M_L = M_{cp}$, т.е. натоварващият лагерите момент по време на пускането е равен на въртящия момент на двигателя, на базата на който е определено това време. След завършване на пусковия процес натоварващият момент ще стане равен на въртящия момент на двигателя, изравнен със съпротивителния момент на товара. Условното натоварване при пускане ще бъде $Q_{\Pi} = Q_0(1 + k\frac{M_{cp}}{M_н})$, а ресурсът, отговарящ на пусковия процес при линейно изменяща се скорост, ще бъде

$$T_{\Pi} = \frac{i.\Delta t}{\sum_{i=1}^{N} \frac{\Delta t}{T_i}} = \frac{i}{\sum_{i=1}^{N} n_i (\frac{Q_{\Pi}}{C})^{3,333}} = (\frac{C}{Q_{\Pi}})^{3,333} \frac{i}{\sum_{i=1}^{N} n_i}. \tag{18}$$

Тъй като $\omega = \omega_1 \frac{t}{T_{Ma}}$ и $\omega_y = \omega_1 \frac{t_{\Pi}}{T_{Ma}}$, можем да запишем, че $n_i = Ki$.

Тогава $\sum_{i=1}^{N} n_i = \sum_{i=1}^{N} Ki = K\frac{N}{2} = \frac{n_y}{2} = n_{cp}$ и ресурсът ще се получи

$$T_{П} = \frac{1}{n_{cp}}(\frac{C}{Q_{П}})^{3,333} = \frac{1}{0,5n_y}(\frac{C}{Q_{П}})^{3,333}. \quad (19)$$

Ако се сравни този резултат с ресурса при номинално натоварване $T_н$, ще се получи, че $T_{П} = 2T_н(\frac{Q_н}{Q_{П}})^{3,333} < T_н$, тъй като $Q_{П} > Q_н$. Това обаче е един формален резултат. Истинската дълготрайност на лагера, определена от износването през време на пусканията, ще се определи от максималния брой пускания до изчерпване на ресурса, за които степента му на годност ще се анулира, а именно

$$N_{пус} = \frac{T_{П}}{t_{П}} = \frac{3600n_1}{0,5T_{Ma}n_y{}^2}(\frac{C}{Q_{П}})^{3,333}, \quad (20)$$

където n_1 [min^{-1}] е синхронната скорост на ротора, а множителят 3600 идва от това, че дименсията на $T_{П}$ е [h], а на $t_{П}$ - [s].

По аналогичен начин може да се определи ресурса и дълготрайността по време на спирането (паузата) като положим в (11), (12) и (13) въртящият момент $M_{ср} = 0$, а съпротивителният $M_{Tср}$ – равен на съответния момент, при който става спирането (постоянен или линеен), или на момента от механичните загуби на двигателя, ако спира на празен ход, и на тяхна база да определим нови стойности за T_{Ma} и Q.

В такъв случай за изчислителния ресурс, за времето на спиране и за максималния брой спирания до изчерпване на ресурса ще се получи

$$T_C = \frac{1}{0,5n_y}(\frac{C}{Q_C})^{3,333}; \qquad t_C = \frac{J\omega_1}{M_{Tcp}}.\frac{\omega_y}{\omega_1} = T_{Ma}{}'\frac{\omega_y}{\omega_1}; \quad (21)$$

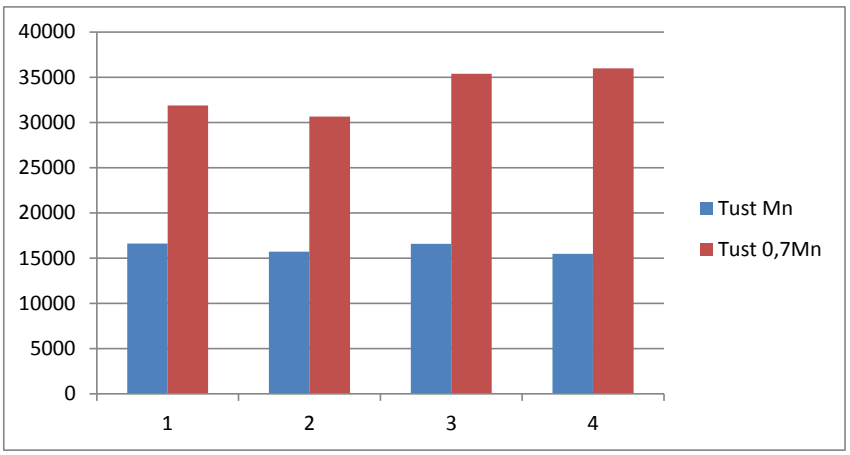
$$\omega = \omega_y - \frac{\omega_1 t}{T_{Ma}{}'}; \qquad N_{спир} = \frac{T_C}{t_C} = \frac{3600n_1}{0,5T_{Ma}{}'n_y{}^2}(\frac{C}{Q_C})^{3,333}. \quad (22)$$

Максималният брой цикли до изчерпване на ресурса през време на работната част от цикъла се определя като изчисления по (1) ресурс в установен режим се раздели на периода на работа при постоянен товар, т.е. $N_{раб} = T_p / t_p$.

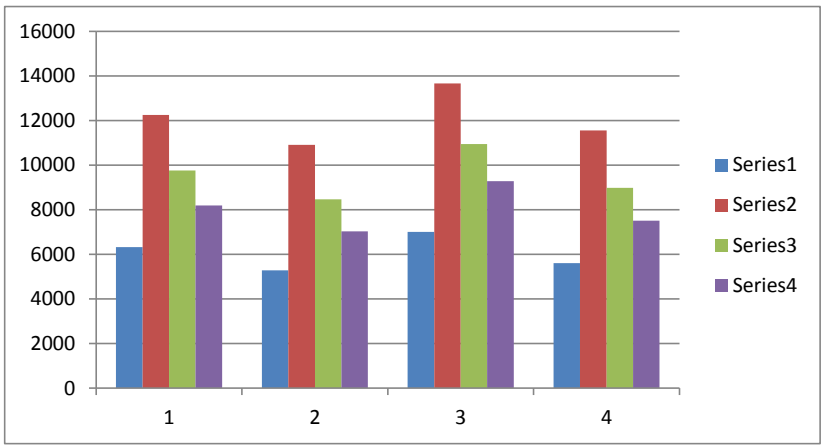
Числен пример

Табл.1.

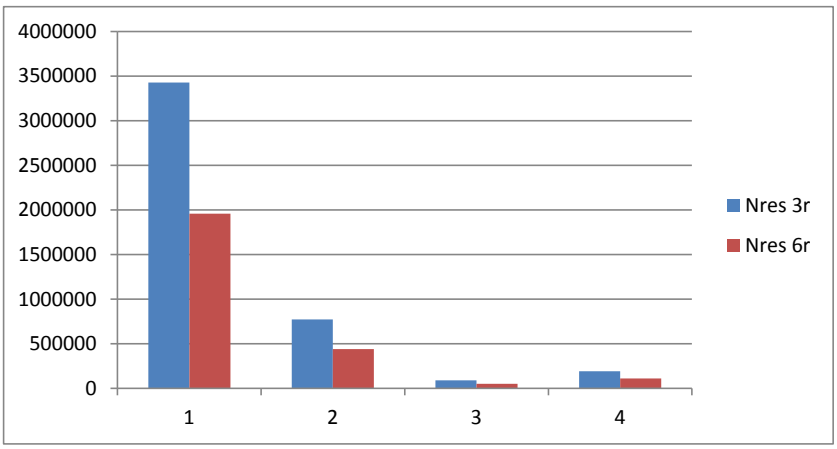
No двиг.	$P_н$	$U_н$	$I_н$	$n_н$	k_m	$k_П$	k_i	J_R	No лагер
-	kW	V	A	min^{-1}	-	-	-	kg.m^2	-
1	4	380	8,6	1435	2,9	2,5	6,4	0,011	306
2	14	380	25	1460	2,1	1,5	5,2	0,078	308
3	110	380	202	2940	2,1	1,7	5,2	1,7	2318
4	250	660	267	984	2,2	1,6	6	15	2320



Фиг.1. Ресурс на лагерите на двигателите в установен режим при различен съпротивителен момент на товара (номинален и70% от номиналния)



Фиг.2. Ресурс на лагерите на двигателите в пусков режим при различни съпротивителен момент (номинален-серия1 и70% от номиналния-серия2) и инерционен момент на товара (3 пъти роторния–серия3 и 6 пъти роторния-серия4)



Фиг.3. Максимален брой пускания на двигателите при номинален съпротивителен и различен инерционен момент на товара (3 пъти роторния–серия3 и 6 пъти роторния-серия4)

Изводи

Максималният брой на пусканията и спиранията, респективно реалният ресурс на двигателите в преходните процеси, изчислен по горните формули, се получава много голям за двигателите с малка мощност, тъй като техните времена на пускане и спиране са малки (от порядъка на секунди), докато за двигателите със средна и голяма мощност този брой се получава много по-малък поради значителните им времена за пускане и спиране (няколко секунди или дори няколко десетки секунди).

Следователно въпросът с ресурса по време на пускане и спиране и въобще в преходните процеси има смисъл главно за големите машини.

Литература

[1] Соколов, Е. Надеждност на електрическите машини, С, Техника, 1985.
[2] Соколов, Е. Изследване и изпитване на електрически машини, С. Техника, 1977.
[3] Божилов, Г., Т. Илиев, В. Димитров. Микропроцесорна система за мониторинг и определяне на ресурса на електрически машини и съоръжения. Енергиен форум, Варна, 2005.
[4] Божилов, Г., Т. Илиев. Метод и микропроцесорна система за определяне на ресурса на електрически машини и трансформатори в реално време. E+E, No 3-4, 2006.
[5] БДС EN 60034-18-1/21/31 2003. Въртящи се електрически машини. Част 18: Функционална оценка на изолационни системи.
[6]. Сергеев, П. и кол. Проектирование электрических машин, Энергия, М., 1969.
[7] Копилов, И. и кол. Проектиране на електрически машини, С., Техника, 1988.
[8] Microsoft Office Excel, 2007.
[9] Фирмени материали и каталози на различни производители на електродвигатели.

Автор: Ганчо Й. Божилов, проф. дтн, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *gjboj@tu-sofia.bg*

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

ПРОЕКТИРАНЕ НА АКТИВЕН КОМПЕНСАТОР НА РЕАКТИВНА МОЩНОСТ ЗА ТИРИСТОРНИ ЕТС ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК

Георги Павлов, Радка Васева, Радослав Кацов, Мартина Томчева

Резюме: *Основният проблем на значителен процент от електрическите транспортни средства (ЕТС), експлоатирани в ЖП транспорт, са ниските стойности на коефициента на мощност. Това е свързано с увеличения разход на реактивна мощност и наличието на висши хармоници от нисък порядък предизвикващи деформация на формата на тяговия ток. Направено е цялостно изследване на енергетичното поведение на експлоатираните в жп транспорт ЕТС. Актуалността му се определя от това, че е необходима комплексна енергетична оценка, свързана с предстоящата категоризация, съобразно съвременните евронорми за количество и качество на потребяваната електрическа енергия от ЕТС. На базата на това е предложен вариант за проектиране на активен компенсатор на реактивна мощност (АКРМ) в тиристорни ЕТС със занижени енергетични параметри.*

Ключови думи: *коефициент на мощност, активен компенсатор реактивна енергия, електрически транспортни средства за променлив ток*

DESIGN OF AN ACTIVE COMPENSATOR OF REACTIVE POWER OF THYRISTOR ELECTRIC VEHICLES OF ALTERNATING CURRENT

Georgi Pavlov, Radka Vaseva, Radoslav Katsov, Martina Tomcheva

Abstract*: The main problem of a considerable number of the electric vehicles (EV) exploited in the railway transport is the low level of the power coefficient. This is related to the increased consumption of reactive power and the presence of superior harmonics of low order causing deformation of the shape of the traction current.A complete study of the energetic behavior of the electric vehicles exploited in the railway transport has been made. Its actuality has been defined by the fact that it is necessary a complete energetic evaluation, related with the upcoming categorization, in accordance with the European standards of quality and quantity of the electric energy consumed by the electric vehicles. An option for designing an active compensator of reactive power in thyristor electric vehicles (ACRP) with lower energetic parameters has been offered.*

Key words: *power coefficient, active compensator of reactive energy, electric vehicles of alternating current*

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

ISSN 1311-0829

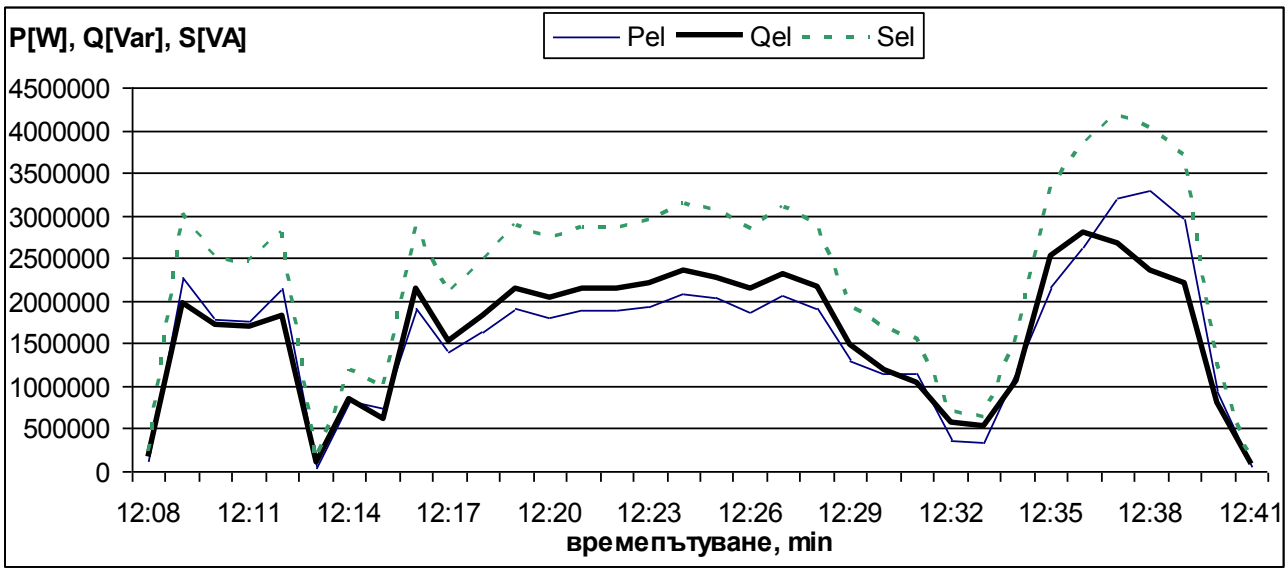
1. Въведение в проблема

Проведените от нас изследвания чрез математическо моделиране и непосредствено измерване за качеството на електропотребление при модернизираните електрически локомотиви (ЕЛ) от сериите 44-001 и 46-200 показват незадоволителни резултати по-отношение на техните енергетични параметри.

В реални експлоатационни условия фактора на мощност PF_{el} се колебае в границите 0,4÷0,8 и е значително по-нисък от дефинираните европейски норми в това отношение. От графиките на мощностите снети експериментално на ЕЛ серия 46-200 (фиг.1) се вижда, че при различните режими на движение консумираната от локомотива реактивна мощност е значителна по стойност, което е и основната причина за влошения коефициент на мощност [2, 3].

Модернизацията на тиристорните локомотиви, експлоатирани в жп транспорт у нас, е задължителна от гледна точка на изпълнение на европейските норми и изисквания по-отношение на качеството на електрическа енергия, потребявана от ЕТС.

Вариантите в това отношение са два – премахване на тиристорните изправители и вграждане на четириквадрантни преобразуватели, реализирани на базата на IGBT. В този случай се постигат идеални енергетични характеристики в целият регулируем диапазон и възможност за реализация на рекуперация. Недостатъка е, че този вариант е икономически неизгоден [2].



Фиг.1. Графики на активна, реактивна и пълна мощност

Вторият вариант е свързан с възможността за проектиране и вграждане в ЕТС на АКРМ, който изисква значително по-малко средства и е по-безпроблемен за изпълнение. Изследванията показват, че в енергетично отношение, постигнатите показатели напълно ще покрият изискванията от въведените евронорми.

2. Проектиране на активен компенсатор на реактивна мощност за локомотив серия 46-200

2.1. Избор на параметри и схеми на включване на АКРМ

Реактивната мощност на кондензаторна батерия (КБ) се определя по формулата:

$$Q_c = \omega.C.U_c^2 \qquad (1)$$

където: U_c - ефективна стойност на напрежението на кондензатора; C - капацитет на КБ; $\omega = 2\pi f$ - ъглова честота.

В условията на експлоатация напрежението на токоприемника се изменя в широки граници от 19 до 29 kV. При това Q_c на КБ ще се променя $(29/19)^2$=2,3 пъти. В тази връзка за получаване на ефективна компенсация на Q_L на локомотива, напрежението (U_c) на КБ трябва да се променя във функция от захранващото напрежение. Освен това Q_c на КБ трябва да се регулира в зависимост от режима на работа на ЕТС. Това може да стане чрез изменение на големината на капацитета или напрежението.

Капацитета на КБ може да се регулира степенно или плавно. Тези начини се използват широко в стационарните устройства в тяговата енергозахранваща система(ТЕС). В силовите схеми на ЕТС с многозоново регулиране, вторичните намотки обикновено имат допълнителни изводи, или се свързват последователно през изправителите, като напрежението им се регулира плавно. То се изменя пропорционално на коефициента на трансформация ($К_{тр}$). Например вторичните намотки на тяговия трансформатор ($ТТ_Л$) на локомотив 46-200 в тягов режим се свързват по две последователно през тиристорните изправители. Те регулират и сумират плавно напрежението им към два последователно свързани тягови двигатели(ТД) и имат напрежение на празен ход $U_{пр.х.}$= 943 V в първа зона и $U_{пр.х.}$= 1880 V на втора зона. Ако кондензатора се включва към различните изводи на ТТ е възможно да се получи необходимата система от напрежения 1900 V и 950 V, което прави възможно изменението на Q_c на степени: $Q_1 : Q_2$ =1 : 0,25. Този начин на компенсиране е подходящ, той ще съдържа източник на Q_c, устройство за комутация и управление [5].

Като се отчетат получените стойности на Q_L от направеното изследване (аналитично и експериментално), за два изправителя на 46.200 свързани в група, Q_c трябва да е от порядъка на :

- $(830 \pm 350)\ kVAr$ при номинална мощност 1650 kW;
- $(640 \pm 380)\ kVAr$ при мощност 60% от номиналната.

Като се има предвид, че в тягов режим при ток 1180 А реактивната мощност консумирана от ЕЛ 46.200 е около 2600 kVAr, мощността на АКРМ може да се приеме $Q_{АКРМ} \approx (600 \div 900)\ kVAr$ за една група изправители [2, 5].

Непосредственото включване на компенсатор в ЕТС състоящ се само от кондензатор е неприемливо. Това е свързано с факта, че пускорегулиращото устройство (ПРУ) е включено към изглаждащ реактор(ИР) и ТД и като цяло представлява генератор на ток с голямо вътрешно съпротивление. Веригата, която включва кондензатор с капацитет С и паралелно включена еквивалентна индуктивност L_E (приведените към вторичната страна на $ТТ_Л$ индуктивност на кон-

тактна мрежа(КМ), тягова подстанция(ТП) и първичната намотка на $ТТ_Л$), образуват колебателен контур със собствена честота на колебание, която може да се изменя в широки граници във фидерната зона:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_E . C_{AKPM}}} \tag{2}$$

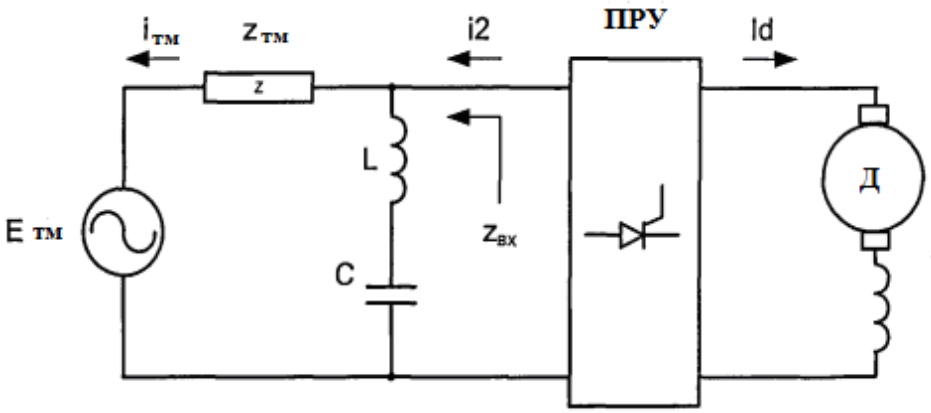
Опасността от възникване на резонансни явления в ТЕС ни задължава да използваме АКРМ от типа последователно свързани кондензатор $C_{АКРМ}$ и реактор с индуктивност $L_{АКРМ}$. При такава LC верига еквивалентното индуктивно съпротивление при честота ω ще се определя от:

$$X_{L_{AKPM}C_{AKPM}} = X_{L_{AKPM}} + X_{C_{AKPM}} = \frac{1}{j\omega C_{AKPM}}\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) \tag{3}$$

където $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{AKPM} . C_{AKPM}}}$ - собствена честота на LC – веригата на АКРМ.

Степента на намаляване ефективността на КРМ зависи от отношението ω_0 / ω. Изборът му се прави на база анализ на честотните свойства на електрическата верига на ЕТС с КРМ. Те се оценяват от показаната заместващата схема на фиг.2. Изправителят с ТД може да се разглежда като източник на ток, въздействащ на електрическата верига, състояща се от LC - верига на КРМ и приведеното към вторичната намотка на $ТТ_Л$ съпротивление на ТЕС [4, 5]. Входното съпротивление за такава верига се определя от израза:

$$Z_{вх} = \frac{Z_{TM} . Z_{LC}}{Z_{TM} + Z_{LC}} \tag{4}$$



Фиг.2. Заместваща схема на система „ЕТС с КРМ – КМ”

Съпротивлението на тяговата мрежа (ТМ) се определя от зависимостта:

$$Z_{TM} = R_{TM} + j\omega L_{TM} \tag{5}$$

Съпротивлението на LC – веригата на КРМ от:

$$Z_{KPM} = R_{KPM} + j\frac{1}{\omega C_{KPM}}\left(\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1\right) \tag{6}$$

Ако се пренебрегне активното съпротивление на ТМ и КРМ, то изразът (4) може да се запише във вида:

$$Z_{вх} = jX_{TM}\frac{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2-\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} \quad (7)$$

където $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{TM}.C_{TM}}}$ е собствената честота на контура, образуван от кондензатора на КРМ и индуктивността на ТМ. От анализа на (7) се вижда, че $Z_{вх}$ в зависимост от ω може да се приеме стойност 0 или ∞:

- $Z_{вх}=0$ при резонанс на напрежението в LC контура на КРМ;
- $Z_{вх}=\infty$ при резонанс на токовете в паралелните вериги на ТМ и LC – веригата на КРМ.

За определяне на параметрите на L-C контура на КРМ определяме предавателната честотна характеристика на тока I_2 в ТМ:

$$W_{I_2}(\omega) = \frac{I_{TM}}{I_2} = \frac{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2-\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} \quad (8)$$

Честотната характеристика има една нула и един полюс. При това собствената честота ω_1 може да се променя от изменението на L_{TM} при движение на ЕТС във фидерната зона. Най-ниската стойност на L_{TM} се получава при работа на електрическия локомотив до ТП, когато:

$$L_{TM} = L'_{TП} + L'_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} \quad (9)$$

където $L'_{ТП}, L'_{\sigma 1}$ - приведени към вторичната намотка на ТТ индуктивности на разсейване на трансформатора в ТП и първичната намотка на $ТТ_Л$; $L_{\sigma 2}$ - индуктивност на вторичната намотка на $ТТ_Л$.

При работа на ЕТС на разстояние от ТП:

$$L_{TM} = L'_{TП} + L'_{KM} + L'_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} \quad (10)$$

L'_{KM} - приведената индуктивност на КМ от ТП до точката на токоснемане на ЕТС към вторичната намотка на $ТТ_Л$.

Ориентировъчните параметри на ТЕС може да се приемат:

- реактивно съпротивление на ТП - $X_{TП} = 7{,}2\ \Omega$ ($L_{TП} = 0{,}229\ H$);
- реактивно съпротивление КМ - $X_{KM} = 0{,}48\ \Omega / km$ ($L_{KM} = 0{,}00153\ H / km$).

Индуктивността на разсейване на първичната и вторичната намотки на $ТТ_Л$ са $L'_{\sigma 1} = 0{,}012\ H$ и $L_{\sigma 2} = 0{,}000038\ (0{,}000058)\ H$ [1].

Коефициентът на трансформация на $ТТ_Л$ в зависимост от мястото на присъединяване по LC веригата на АКРМ може да има стойност:

$$К_{Т1}=25000/943=26{,}51 \text{ и } К_{Т2}=25000/1886=13{,}25.$$

Тогава стойността на $L_{ТМ}$ е:

$$L_{TM\min} = (L_{TП} + L_{\sigma 1})\frac{1}{K_T^2} + L_{\sigma 2} = (0{,}229 + 0{,}012)\frac{1}{26{,}5^2} + 0{,}000038 = 0{,}000381,\ H$$

$$L_{TM\max} = (0{,}229 + 0{,}012)\frac{1}{13{,}25^2} + 0{,}000038 = 0{,}00141,\ H \qquad (11)$$

Вижда се, че приведената индуктивност на ТМ може да варира почти 3 пъти, което съответства на почти директно изменение на ω_1.

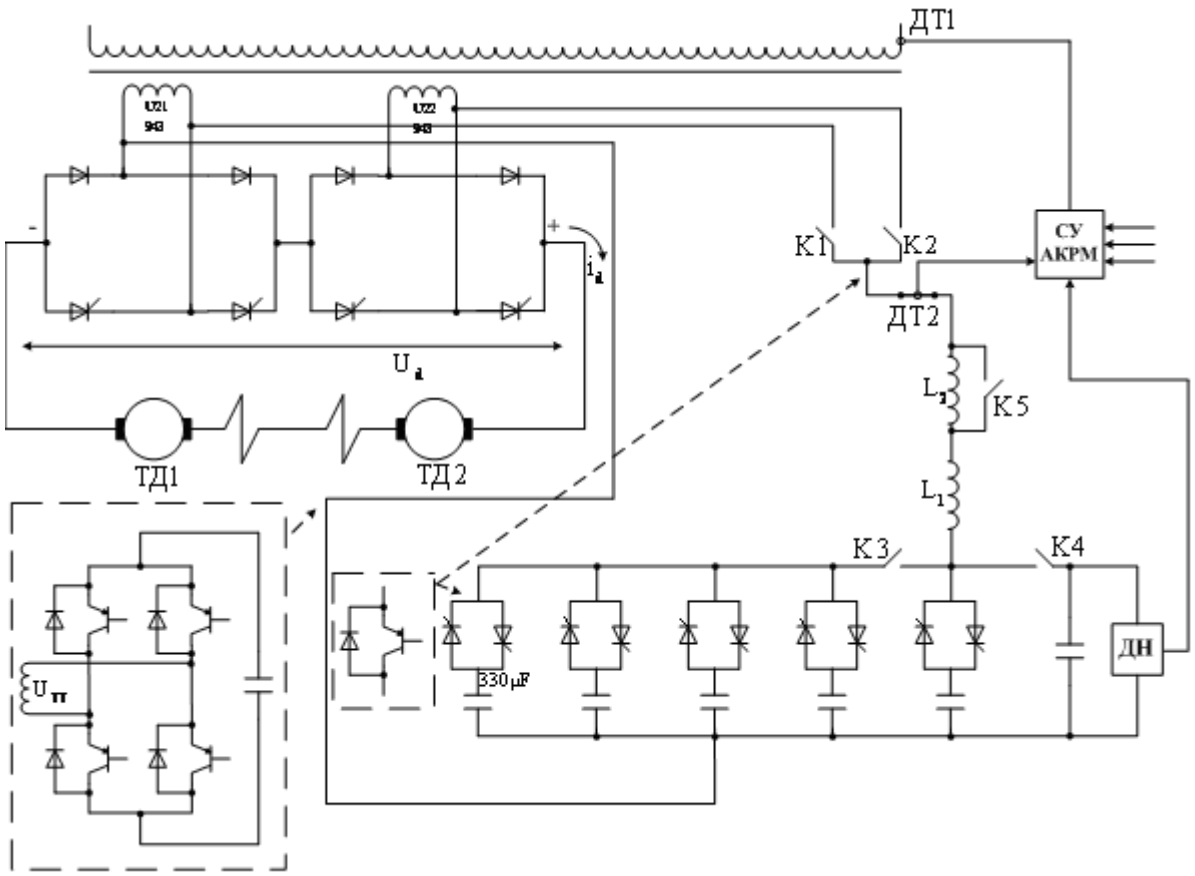
При това положение резонанс на токовете в разглежданата схема настъпва при честота $\omega_{01} < \omega_0$. Затова избора на LC – веригата на КРМ трябва да се прави при условието собствената честота на контура да не съвпада с честотата на хармониците, генерирани от изправителя. При това е необходимо да се отчита фактора, че изделията кондензатор и реактор на КРМ може да имат параметри, различни от номиналните. Освен това в процеса на експлоатация те се променят [4, 5].

Направен е анализ на честотните характеристики за три стойности на капацитета на LC – веригата на КРМ при максимална и минимална индуктивности L_{TMmax} и L_{TMmin}. Отчитайки получените данни, следва при избора на параметри на КРМ да се избере ω_0 по-малка от честотата на третия хармоник на тока i_2, 150 Hz. За да се избегне явлението резонанс, резонансната честота трябва да се определя по:

$$f_0 = \frac{150}{\sqrt{(1+\delta L)(1+\delta C)}} \qquad (12)$$

където $\delta L, \delta C$ - възможни в условията на експлоатация отклонения на параметрите на КРМ от номиналните.

Така, ако приемем $\delta L\% = 10\%$ и $\delta C\% = 10\%$, то резонансната честота f_0=136 Hz. При завишено изискване за отклонение то f_0=140-145 Hz.
Регулирането на реактивната мощност на АКРМ при 46-200 може да стане чрез включването му към двете вторичната намотка на $ТТ_Л$. Например по схемата показана на фиг.3.



Фиг.3. Принципна схема на включване на АКРМ

За постигане на необходимата реактивна мощност АКРМ трябва да се състои от батерия от паралелно свързани кондензатори, като капацитета им се определя от необходимата Q и реактор L_1. Тъй като напрежението на двете тягови намотки за двете зони на регулиране се променя значително в процеса на регулиране, то и необходимия капацитет на кондензаторите в кондензаторната батерия също ще варира в широки граници ($C_{общ}$=2,3 mF (U=943V) и $C_{общ}$=0,5 mF (U=1886 V)), което създава редица неудобства. От изчислените стойности на капацитета, реактивната мощност и напрежението се избират съответния брой и тип кондензатори за $U_н$=2000 V и Q=650 kVar. Схемата реализира двустепенно превключване, като позволява реактивната мощност да се променя по-стойност.

В схемата са предвидени два датчика за напрежението (ДН), които са необходими за измерване на напрежението на кондензатора и на намотката на ТТ. Безударното включване се прави в момент на равенство на тези напрежения. В разработения вариант се предлага използването на ДН, който е включен паралелно на антипаралелния тиристорен регулатор (АТР).

За контрол на тока е предвиден датчик на ток (ДТ). Всички контактори $К_1$, $К_2$, $К_3$, $К_4$ и $К_5$ трябва да са двуполюсни. Управлението на контакторите на АТР се осъществява от СУ. Контакторите могат да бъдат заменени със съвременни IGBT, което ще повиши цената на модернизацията, но ще даде възможност за плавно управление на процесите в АКРМ.

Направено е електрическо оразмеряване на основните елементи на АКРМ за ЕЛ 46-200, като за целта е използвана подходяща методика непоказана в доклада. Напрежението на двете тягови намотки се регулира плавно и последователно към ТД. Избираме кондензатор тип KLS с $U_н$=2000 V и C=340 μF. С цел да се създаде плавно управление на реактивната мощност в необходимия диапазон се свързват паралелно 8 кондензатора, като регулирането се осъществява посредством антипаралелен тиристорен регулатор или IGBT.

Получените резултати от изчисленията за двата режима на работа на АКРМ са показани в табл.1.

Табл.1

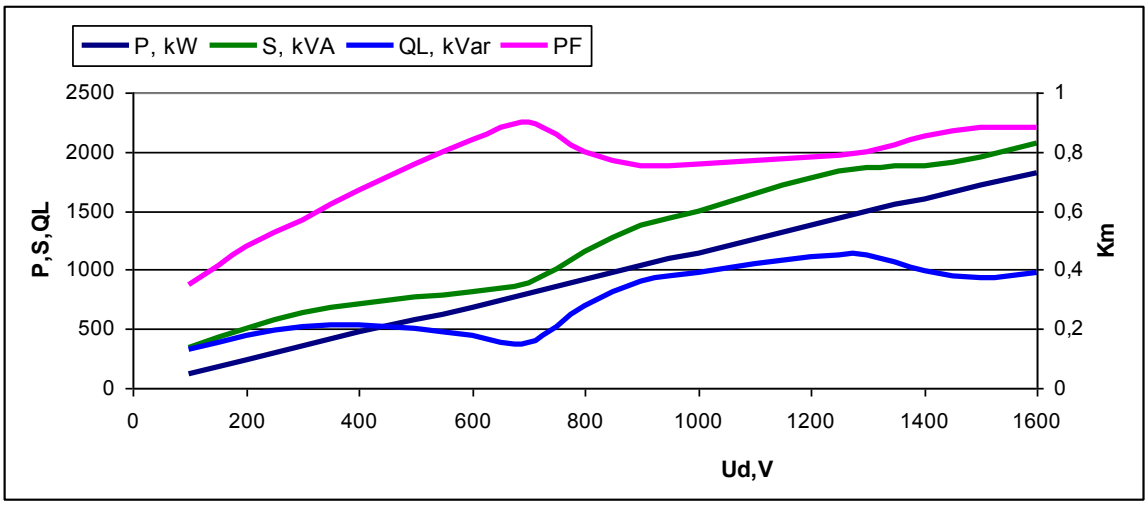
Елемент	**Параметър**	**Стойност**	
		Първа степен	**Втора степен**
Кондензатори	Напрежение, V Ток, A Реактивна мощност, kVar	950 583 640	2000 302 650
Реактор L_1=0,82mH L_2=3,16mH	Напрежение, V Ток, A Реактивна мощност, kVar	150 583 87,4	299 302 90,5
Тиристорен ключ	Напрежение, V Среден ток, A	2879 262,4	5100 136

Резултатите от направените математически изчисления са предварителни и е необходимо да бъдат уточнени с отчитане на реалните процеси в силовата верига на ЕТС в различни режими на работа. В реална схема стойността на реакторите L_1 и L_2 трябва да бъде разпределена последователно на всяка кондензаторна група с цел реализация на плавен преход при превключването им.

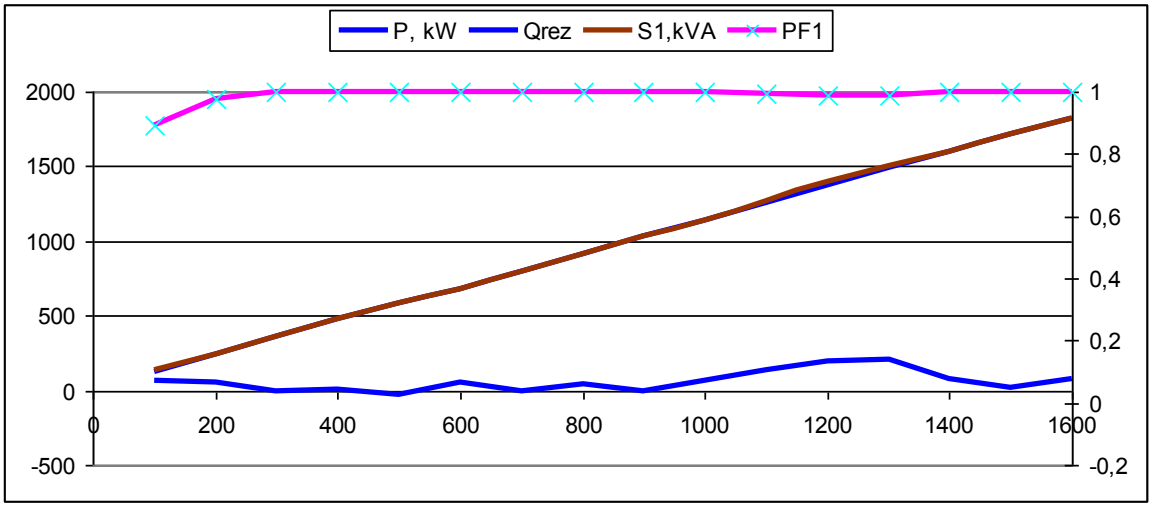
2.2. Характеристики на ЕТС за променлив ток с АКРМ

За оценка на влиянието на АКРМ по-отношение на енергетичните показатели е направено сравнение при режими на работа на ЕТС с и без компенсатор. Получените резултати $P(U_d)$, $Q(U_d)$, $S(U_d)$ и $K_M(U_d)$ за режим на тяга без компенсатор са показани на фиг.4.

На фиг.5 са показани зависимостите P, Q, S, $K_M=f(U_d)$ при използване на АКРМ. Големината на Q_{KPM} се избира при спазване на алгоритъм за минимизиране на Q_{ETC}. За тази цел е необходимо да се определят текущите стойности на реактивната мощност за всички режими на ЕТС. В зависимост от текущата стойност на Q, АКРМ се групира и включва към различни намотки на ТТ (или напрежението се регулира).



Фиг.4. Изменения на мощности и $К_м$ без компенсатор



Фиг.5. Изменение на мощности и енергетични параметри при оптимално управление на АКРМ

Резултатите са показани на фиг.5. Вижда се, че чрез подходящ алгоритъм могат да се постигнат много високи стойности на $К_м$ (0,99), ако не се отчита коефициента на деформация на тока, чието влияние е много по-слабо.

3. Заключение

За подобряване на енергетичните параметри и качеството на потребяваната от състава енергия е необходимо разработване на ново иновативно техническо решение по посока на тяхната модернизация, а именно проектиране на активен компенсатор на реактивна мощност /АКРМ/, който да бъде свързан към вторичните тягови намотки на локомотивния трансформатор. Чрез него до голяма степен ще се реши основният проблем при експлоатация на тези ЕТС, свързан с потреблението на значителна реактивна мощност от тяговата мрежа, като по този начин ще се повиши и енергийната ефективност на специализираната железопътна електроснабдителна система.

Литература

[1] Матов П., Р. Кахърков. Разпределен капацитет на контактни мрежи за променлив ток. XVII международна научна конференция „Транспорт 2007”. Научно списание „Механика, транспорт, комуникации”, бр.3, 2007г., статия 0167.

[2] Павлов Г. Изследване на енергетични показатели и проектиране на активен компенсатор за електрически транспортни средства за променлив ток, IV Научна конференция „ЕФ 2012”, Созопол, 28.09 - 01.10.2012 г.

[3] Павлов Г. Математическо моделиране на системата „тягова мрежа – електрическо транспортно средство (ЕТС)”. IV Научна конференция „ЕФ 2012”, Созопол, 28.09 - 01.10.2012 г.

[4] Фролов С. А., Донской Д. А., Евграфов А. Г., Литовченко В. В. Математическое моделирование электромагнитных процессов в силовых цепях электровозов переменного тока. Тезисы докладов научно-технической конференции "Наука-Транспорту-2005"М.:МИИТ, 2005.

[5] Д. А. Донской. Регулируемый компенсатор реактивной мощности для электровозов еднофазного тока. Научно-технической конференции "Наука-Транспорту-2006", Москва.

Автори: Георги Митков Павлов, проф. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *g_pavlov61@abv.bg*; Радка Кирилова Васева, маг. инж., докторант към катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, ВТУ „Тодор Каблешков”, E-mail address: *dorada_bs@ab.bg*; Радослав Иванов Кацов, студент, катедра „Електроенергетика и електрообзавеждане”, ВТУ „Тодор Каблешков”; Мартина Райчинова Томчева, маг. инж., ВТУ „Тодор Каблешков”

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. П. Матов

ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОСТАТИЧЕН ГЕНЕРАТОР

Георги Павлов, Явор Исаев, Елена Димкина

Резюме: *В доклада е изследвана възможността за производство на електрическа енергия посредством нетрадиционни енергийни източници (електростатични генератори задвижвани от ВЕИ). Разработен и изследван е модел на електростатичен генератор (ЕСГ). Конструкцията и използваните материали са избрани с цел създаване на възможност за оптимално изследване на основните параметри и характеристики на устройството. Основната цел е след успешно проектиране, изграждане и изпитване на генератора да се анализират възможностите за приложението му в сферата на енергетиката, транспорта и образованието.*
Ключови думи: *алтернативни източници на енергия, електростатични генератори, електростатична индукция*

STUDY OF ELECTROSTATIC GENERATORS

Georgi Pavlov, Yvor Isaev, Elena Dimkina

Abstract: *The report investigated the possibility of producing electricity through unconventional energy sources (electrostatic generators powered by RES – renewable energy source). They transform mechanical energy in to electrical. The generation charge is carried out in two ways: a tubular effect or electrostatic induction. This report shows a development of an electrostatic generator (ESG). Through pre-designed and tested model is made generator with higher power. Construction and materials are optimized to in order to allow for optimal examination of the basic parameters and characteristics of the device and its efficiency.*
The main purpose after successfully design, construction and testing the generator has to be analyzed possibilities for its application field of energy, transportation and education.
Keywords: *alternative energy sources, electrostatic generators, electrostatic induction.*

1. Въведение в проблема

Електростатичните генератори работят на принципа на преобразуване на механична енергия в електрическа. Генерирането на свободен електрически заряд се осъществява по два начина: стробоскопичен ефект или електростатична индукция. Електростатични генератори, като Van de Graaff генератор и разновидности на Pelletron намират приложение в сферата на научните лабораторни изследва-

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

ISSN 1311-0829

ния. Електростатичните генератори в зависимост от начина на наелектризиране и създаване на условия за протичане на електрически ток може да се разделят на две категории:

• Машини с триещи се повърхности, използващи стробоскопичния ефект (електрическа енергия произведена чрез контакт или триене);

• Машини използващи електростатична индукция.

На базата на цялостно и задълбочено проучване на развитието на техниката в тази област и отчитане на предимствата и недостатъците на използваните технологии са определени типа и конструкцията на проектирания от нас генератор. Проектираното от нас съоръжение е от типа генератори базирани на използването на електростатична индукция. То се състои от две повърхности, аксиално разположени близо една до друга, въртящи се с еднаква скорост в срещуположни посоки. Вследствие на триенето с въздуха тези повърхности се наелектризират. Всяка повърхност е снабдена с автономен изправител, който служи за разделяне на положителните и отрицателните заряди в две срещуположни полуокръжности на повърхността. Един спрямо друг двата изправителя са дефазирани на 180 градуса, като последното е необходимо за улеснение при едновременното токоснемане на зарядите от двата диска. Процесът на токоснемане се осъществява при контакт на токоснемателите с полюсите аксиално наредени по двете повърхности. Полюсите представляват пластини изработени от метал с ниско съпротивление. Токоснемателите са по един общ за двата диска за положителните и за отрицателните заряди. Честотата на напрежението е в правопропорционална зависимост от броя на чифтовете полюси и честотата на въртене на повърхностите. На фиг.1 е показан изглед на общото устройство на съоръжението, където се виждат дисковете, механичното задвижване, искровата междина, филтровите групи, част от механичния изправител и проводниците на силовата верига [3].

Фиг.1. Общ изглед на ЕСГ

2. Особености при проектирането на ЕСГ

На база на получените резултати от проведени изпитания по съставена от нас методика на проектиран и изработен умален модел на ЕСГ се направиха същес-

твени изводи по отношение на конструктивните особености на основните елементи на устройството. Основната цел, която беше поставена е проектиране на ЕСГ за по-голяма мощност при оптимален избор на всички конструктивни материали. Механичната конструкция и електрообзавеждането на изпитвания ЕСГ са проектирани така, че да позволяват комплексни лабораторни изследвания на основните параметри и характеристики, определящи неговата енергийна ефективност.

За да се постигне поставената цел при проектирането на модела на ЕСГ се създадоха следните конструктивни възможности:

- за промяна на параметрите на устройството чрез внасянето на геометрични промени в конструкцията на генератора. Това включва възможността за промяна на разстоянието между движещите се повърхности, предназначени за наелектризиране, както и промяна на посоките на движение на едната или двете повърхности заедно. Създаване на възможности за монтиране на една или повече повърхности стационарно, позиционирани между или встрани от подвижните повърхности, с цел изследване на промяната на големината на електрическите заряди;

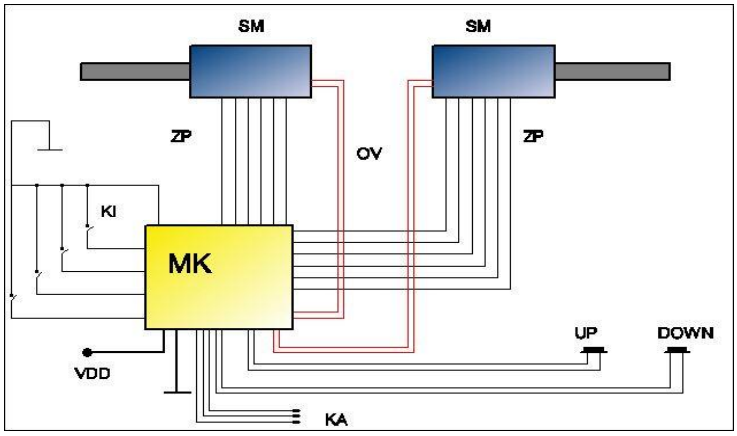
- в един предходен модел на електростатичен генератор за задвижване на двете повърхнини бяха използвани два електродвигателя, което представлява съществен недостатък и намалява КПД на устройството. В усъвършенстван вариант задвижването на двата диска е еднодвигателно, при минимално механично съпротивление, което увеличава енергийната ефективност на ЕСГ и създава възможности за използването на екологични първични източници на енергия, като вятър, вода и др.;

- реализирано е микропроцесорно управление, контрол и защита на основните режими на работа на ЕСГ. За постигане на оптимален режим на работа в енергийно отношение е необходимо прецизно управление на искровите междини във функция от напрежението и честотата. За целта са използвани микроконтролери от серия PIC16F, като схемата на управление е показана на фиг.2.

Като първа стъпка при проектирането е взето под внимание правилното оразмеряване на валовете и основната повърхност, които трябва да издържат тежестта на дисковете и вибрациите от въртенето им. В това число се включва и подбора на подходящ тип лагери. При проектиране на окачването и задвижването устройството на конструкцията е изпълнено, така че двата диска да бъдат електрически изолирани един от друг при спазване на необходимото изолационно разстояние между тях. Използваната методика по-отношение на механичното оразмеряване на ЕСГ не е показана в настоящия материал.

При проектиране на генератора от особено значение е материала, от който са изработени дисковете, тяхната дебелина и диаметър. Колкото по-голяма е дебелината на материала толкова по-добри са изолационните му свойства, респективно и възможността за повишаване на изходящото напрежение. За целта дисковете са изработени от стъкло тип триплекс с диаметър 500 mm и дебелина 10 mm, като оразмеряването е реализирано на база направените изследвания и анализи на умален модел на ЕСГ и изискването за проектиране на съоръжение, от-

даващо по-голяма мощност. Амплитудата на напрежението зависи от броя на чифтовете полюси, а техния брой се определя от диаметъра на дисковете.

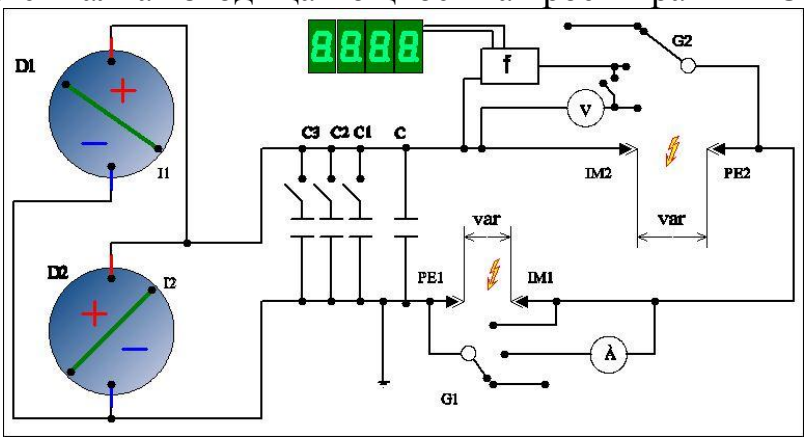


Фиг.2. Схема за управление на ИМ

SM- стъпкови мотори; ZP- захранващи проводници за стъпковите мотори; OV- обратна връзка; MK- микроконтролен блок; KI- крайни изключватели; UP- бутон за повишаване на междината; DOWN- бутон за намаляване на междината; KA- аналогов сигнал от контролната апаратура; VDD- захранване на микроконтролерния блок

От направеното подробно литературно проучване по темата не са намерени теоретични зависимости, даващи пряка връзка между механичните и електрическите параметри на устройството. Големината на изходящата мощност на проектирания генератор ще бъде точно определена при провеждане на експерименталните изпитания на обекта по предварително изготвена от нас методика.

Дисковете се монтирани върху изолационна хоризонтална повърхност посредством метални стойки. Съпътстващата апаратура се състои от въздушни междини, филтрови групи и механика, които са разположени на същата основа. Вида на проводниците, изграждащи електрическата схема е съобразен с предполагаемата максимална изходяща мощност на проектирания ЕСГ.



Фиг.3. Принципна електрическа схема на електростатичния генератор и измервателната апаратура

D1/D2- стъклени дискове; IM1/IM2- искрови междини; C/C1/C2/C3- кондензаторни батерии; I1/I2- механични изправители;PE1/PE2- регулируеми електроди; G1/G2- галетни превключватели

На фиг.3 е показана принципна електрическа силова схема на свързване на основните елементи на ЕСГ, както и част от необходимата измервателна апара-

тура. Изходното напрежение на ЕСГ се определя от разстоянието между електродите в искровата междина. С цел съгласуване режима на работа на двете искрови междини и по-прецизно регулиране на изходната мощност е предвидена възможност за микропроцесорно управление на подвижните електроди в искровите междини. На фиг.4 е показана схема на управление на искровите междини, реализирано на базата на МК тип PIC 16F84 A и стъпкови двигатели SANYO DENKI TYPE 103H6704-0140 3,6V 1A 1,8 DEG. [1, 2]

3. Особености при изследване на параметрите и характеристиките на базовия модел на ЕСГ

Предстоящите изследвания са ориентирани по посока на създаване на възможности за оптимизиране на основните недостатъци, свързани с триенето на токоснемателите спрямо полюсите и намаляване на пулсациите на напрежението. Това ще доведе до увеличаване на експлоатационния период на съоръжението, намаляване на обслужването и разходите за поддръжка, намаляване на габарита и себестойността на вградената апаратура, увеличаване на надеждността.

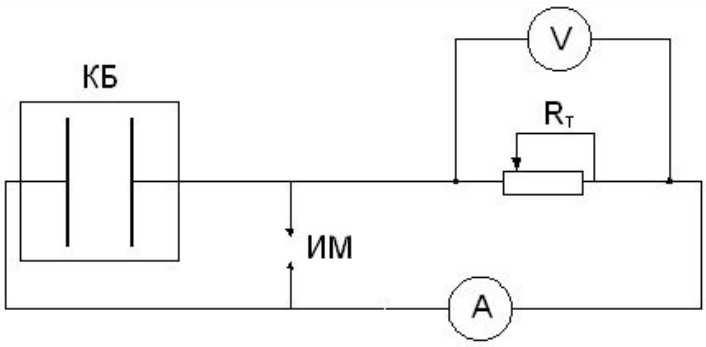
На базата на изследването и анализа на получените резултати ще се проектира и разработи система за безконтактно снемане на зарядите, намаляване на пулсациите чрез промяна на броя полюси, тяхната площ и разположение, корекция на оборотите и др.

Електростатичният генератор е източник на пулсиращо постоянно напрежение. Амплитудната стойност на напрежението се определя от разстоянието на електродите в искрището. Ефективната стойност на мощността на генератора зависи от напрежението, тока и честотата на разрядите. Токът е в правопропорционална зависимост от напрежението. Възпроизвеждането на заряд с дадена стойност на напрежението, освен от разстоянието между електродите в разрядника, зависи и от честотата на въртене на активните повърхности. Честотата на разрядите зависи от капацитета на кондензаторната батерия, честотата на въртене на активните повърхности и от броя и площта на полюсите.

Капацитетът на кондензаторната батерия определя времето за зареждането й, но също така и времето на разряда. Колкото е по-голям капацитетът, толкова по-голямо е времето необходимо за зареждането на батерията, но трябва да се има предвид, че след това при разряда времето на разреждане също се увеличава. С това се повишава и ефективната стойност на мощността на генератора , продължителността на пулсациите се увеличава.

Измерването на каквато и да е електрическа величина на генератора не може да стане чрез директно свързване на измервателната апаратура и без паралелно свързана кондензаторна батерия. Паралелно на кондензаторната батерия се свързва разрядника, а последователно на него се свързва измервателната апаратура. При това положение всички измервания се извършват по време на разряд. Неспазването на тези правила би довело до неутрализирането на зарядите, а от тук и излизане от нормален режим на работа на генератора. Това би довело до протичане на разряди между активните повърхности, което от своя страна води до влошаване на изолацията между тях и значително намаляване на КПД.

Устройството генерира заряди посредством триенето на активните повърхности с въздуха без да се допират взаимно една с друга. От тук се извежда и пряката зависимост на ефективността на генератора от средата в която работи. В атмосферна среда с атмосферно налягане работата на генератора зависи от температурата, тя влияе на влажността и плътността на въздуха. Друго важно нещо е запрашеността на въздуха, типа на частиците и големината им. До известна степен те могат да бъдат полезни но след определена концентрация започват да влошават работата на генератора. От теорията и направените изследвания и експерименти до сега е установено, че зарядът е най-голям, когато повърхностите се трият директно една в друга, но тогава зарядите се неутрализират взаимно и устройството не може да се използва като генератор. Друг фактор който влияе върху работата на генератора е разстоянието между активните повърхности. С увеличаването му се повишава и амплитудната стойност на напрежението, но обратно пропорционално намалява и честотата, което понижава ефективната стойност и КПД.
С оглед на трудностите, свързани с филтрирането на пулсиращия ток и понижаването на високото напрежение, основната цел на настоящия експеримент и измерване е да се изследват възможностите на устройството при ниска честота на въртене която би осигурила необходимото напрежение без да се налага понижаване, по този начин бихме избегнали необходимостта от инвертиране на напрежението. Това намалява значително себестойността на генератора. На фиг.4 е показана схема на свързване на измервателната апаратура за изследване на основните електрически параметри на ЕСГ.

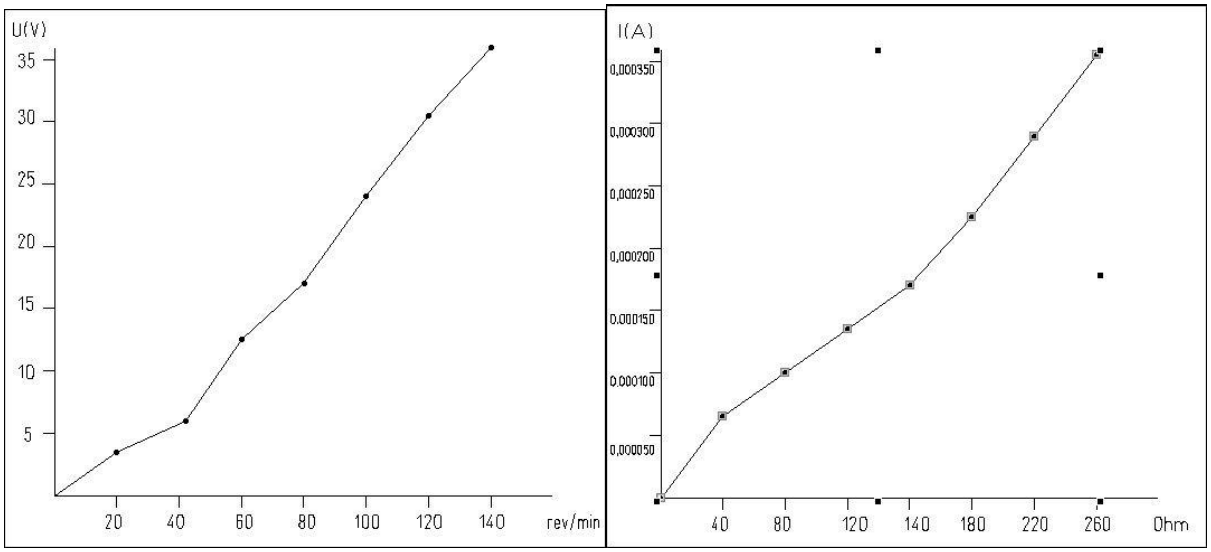


Фиг.4. Схема на свързване на измервателната апаратура

След измерване на ефективните и максималните стойности на тока и напрежението се установи , че е необходима допълнителна апаратура за контрол на честотата на въртене на активните повърхности. Причината за това е нелинейно нарастващата зависимост на мощността спрямо оборотите при различни товари.
На фиг.5 са показани графичните зависимости получени след провеждане на измерванията на този етап.

От направените на този етап измервания може да се направи следният анализ. Отчетените максимални стойности на тока и напрежението на ЕСГ, са както следва: U_{max} = 478.3V, I_{max} = 978.7μA при честота на въртене 140 об/мин.
От тук следва, че максималната (пикова) мощност на ЕСГ е

$$P_{\max}^{ECG} = U_{\max}.I_{\max} = 478,3.978,7.10^{-6} = 0,468,W \qquad (1)$$



Фиг.5. Графики на зависимостите на ефективната стойност на напрежението от оборотите и ефективната стойност на тока в зависимост от товара.

Входящата захранваща мощност на ЕСГ е приблизително 1.44W. Коефициентът на полезно действие на проектирания генератора е

$$\eta = \frac{P_{изх}}{P_{вх}} = \frac{0.468}{1.44} = 0.325 \qquad (2)$$

В предходните изчисления не са включени загубите в зъбно ремъчните предавки за обръщане на посоката на въртене на едната активна повърхност със запазване на същата честота на въртене.

Заключение

Приетата стратегия от Европейската комисия „Европа 2020 година" постави сериозни предизвикателства пред света, свързани с екологията, производството на зелена енергия и намаляване на консумацията на такава. Изпълнението на тези цели са свързани с повишаване на енергийната ефективност и добива на енергия от ВЕИ. Електростатичните генератори представляват екологични и алтернативни източници на зелена енергия поради някои от безспорните си предимства пред известните до този момент ВЕИ. Те са свързани с проста конструкция, ниско ниво на шум, заемат малки площи, не се влияят от климатичните условия и имат лесна и евтина поддръжка.

Предимствата на ЕСГ са свързани и с факта, че режимът на работа на генератора е устойчив, като неговата честота на въртене остава константна величина. Също така константна остава и силата необходима за задвижване на генератора, дължаща се на липсата на електродинамични сили. Поради особености в електрическата схема и спецификата на механичното устройство на генератора няма опасност от пренапрежения и от претоварване.

При постигане на добри показатели се създават възможности за използването на подобен тип генератори в енергийната система или като локален източник на електроенергия. Също така ще се обследват възможностите за приложението му в изпитателни лаборатории, като прибори за изпитване на изолация, симулация на някои природни явления и т.н.

Литература

[1] Кенаров Н. PIC Микроконтролери част 1. Изд-во Млад конструктор, Варна, 2003 г.

[2] Кенаров Н. PIC Микроконтролери част 2. Изд-во Млад конструктор, Варна, 2006 г.

[3] Незлин М. В., В. Д. Шафранов. Введение в нелинейную физику плазмы. Российский научный центр „Курчатовский институт", Москва, Российская Федерация, 1976.

[4] Купалян С. Д. Теоретические основы электротехники, ч. 3. Электромагнитное поле. М., 1970.

[5] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Изд-во Высшая школа, 1967.

[6] Cherneva G. Solution of Energy Crisis in Bulgaria - Challenges and Prospects. 15. medzinárodná vedecká konferencia Riešenie krízových situácií v špecifickom prostredí, ŽU, Žilina, 2. – 3. 06. 2010, p. 261-265

Автори: Георги Митков Павлов, проф. д-р, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков", E-mail address: *g_pavlov61@abv.bg*; Явор Здравко Исаев, маг. инж., докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков"; Елена Николаева Димкина, маг. инж., докторант, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта", ВТУ „Тодор Каблешков"

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

ПОВИШАВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА АСИНХРОННИТЕ ДВИГАТЕЛИ

Георги Тодоров, Божидар Стоев

Резюме: *Анализирани са средствата за повишаване на ефективността на асинхронните двигатели до стойности удовлетворяващи изискванията за клас IE3. Представени са нови проекти на 7.5 kW двигател, с използване на по-качествени и по-скъпи материали, които повишават себестойността му, но позволяват намаляване на общите загуби с 15-20%. Резултатите от анализа показват, че спестените разходи за покриване на тези загуби изплащат допълнително вложените средства за кратък период и убедително доказват предимствата от използването на високоефективни електродвигатели, независимо от повишената им себестойност.*

Ключови думи: *асинхронни двигатели, проектиране, ефективност, загуби, цена.*

INCREASING THE EFFICIENCY OF ASYNCHRONOUS MOTORS

George Todorov, Bojidar Stoev

Abstract: *The ways for improvement the efficiency of the induction motors up to the IE3 requirements have been analyzed. New design projects for 7.5 kW motor with increased use of active materials and costly high-grade steel have been developed. The new designed motor is more expensive, but 15-20% reduction of total losses has been achieved. The analysis shows that the payback time of the increased price is short due to the significant energy savings.*

Key words: *induction motors, design, efficiency, losses, cost.*

1. Увод

Според данни от различни източници [1,2,3] между 40 и 70 % от електрическата енергия в индустрията, инфраструктурата и обществените сгради се консумира от електрическите двигатели. Те се характеризират с висок коефициент на полезно действие, но предвид голямото количество консумирана енергия, дори и малкото му повишаване представлява голям потенциал за икономия на електроенергия. С използване на подходящи методи и практики загубите на двигателите може да бъдат намалени средно с 20% до 30%. В допълнение това оказва голямо потенциалното въздействие върху намаляването на емисиите на парникови газове. По данни на Американското министерство на енергетиката използването на двигатели с висока ефективност (т.н. „premium-efficiency motors") би

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

ISSN 1311-0829

довело до икономия на 5,8 TW (теравата) от загуби и предотвратяване на изпускането на почти 80 милиона метрични тона въглерод в атмосферата през следващите десет години, което е еквивалентно на спиране от движение на 16 милиона автомобила [4]. Според анализ от [1] в Европа намаляването на загубите на двигателите има потенциал за икономия на 1 – 2%, от общата консумация на електроенергия, а в комбинация с честотни преобразуватели за регулиране на скоростта тази икономия може да достигне до 6-7%.

Регламентирането на минимални стойности за ефективността на електрически двигатели започва в САЩ през 1992 г. с приемане на закон за енергийната политика (EPAct) и влизането в сила на стандарти на Асоциацията на националните електрически производители (NEMA) 5 години по-късно. През 1998 г. Европейският комитет на производителите на електрически машини и енергийни системи (CEMEP) издава доброволно споразумение на производителите на електродвигатели за класифициране на ефективността в три класа – стандартни двигатели, двигатели с повишен к.п.д. и двигатели с висок к.п.д. Подобни стандарти са разработени и прилагани в Япония, Китай, Австралия. Регулациите, дефинирани в тези документи, както и начините за определяне на коефициента на полезно действие, се различават [2,5], което създава неудобства на потребителите. Към уеднаквяване на класификацията за ефективност на двигателите се преминава с приемането на разработения от Международната електротехническа комисия (IEC) международния стандарт IEC 60034-30 (2008). Той въвежда нова схема на класификация, за да хармонизира различните регионални и национални стандарти, прилагани досега. Стандартът IEC 60034-30 обхваща асинхронните двигатели с мощности от 0,75 kW до 375 kW, брой на полюсите 2, 4 и 6, честоти на захранващото напрежение 50 Hz и 60 Hz, които представляват преобладаващата част от инсталираните в промишлеността и имат най-голям потенциал за икономия на електроенергия - фиг.1 [6].

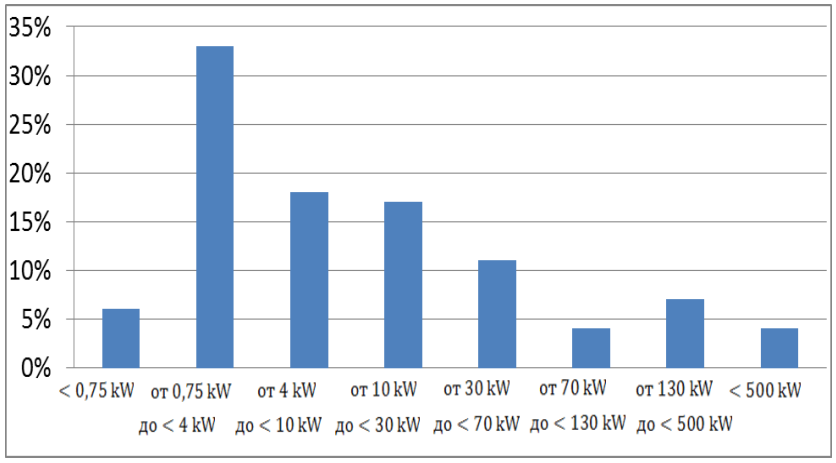
Класовете на енергийна ефективност са както следва:

IE1 (Standard Efficiency);

IE2 (High Efficiency);

IE3 (Premium Efficiency);

За всеки клас са дефинирани минималните стойности на коефициента на полезно действие на дигателите според номиналните им мощност и брой на полюсите.



Фиг.1. Потенциал за икономия на електроенергия на инсталираните в индустрията асинхронни двигатели

От 22.07.2009 г. влиза в сила директива на европейската комисия, според която в Европейския съюз, независимо от това къде и как са проектирани:

- от 16.06.2011 г. всички електродвигатели с изходяща мощност в диапазона от 0,75 kW до 375 kW трябва имат стойност на коефициента на полезно действие не по-ниска от отговарящата на клас IE2;
- от 01.01.2015 г. електродвигателите с изходяща мощност от 7,5 kW до 375 kW, а от 01.01.2017 г. всички електродвигатели от 0,75 kW до 375 kW трябва имат стойност на коефициента на полезно действие не по-ниска от отговарящата на клас IE3.

Постигането на ефективност, отговаряща на IE3 (Premium Efficiency) е възможно с по-добро проектиране на двигателите и използване на по-качествени и по-скъпи материали. В сравнение с двигателите от по-ниските класове те са с по-голямо количество електротехническа стомана и мед, по-тежки и по-скъпи. При проектирането им целта е да се минимизират и балансират загубите, като това да стане без да се променя височината на оста на въртене на двигателя, което изисква специални познания, опит и прецизна екипировка за изпитване и производство.

В настоящата работа са анализирани средствата за повишаване на коефициента на полезно действие на двигателите до стойности удовлетворяващи изискванията за клас IE3, като за количествена илюстрация са показани резултати за четириполюсен двигател с мощност 7.5 kW, произвеждан в съответствие с клас на ефективност IE2.

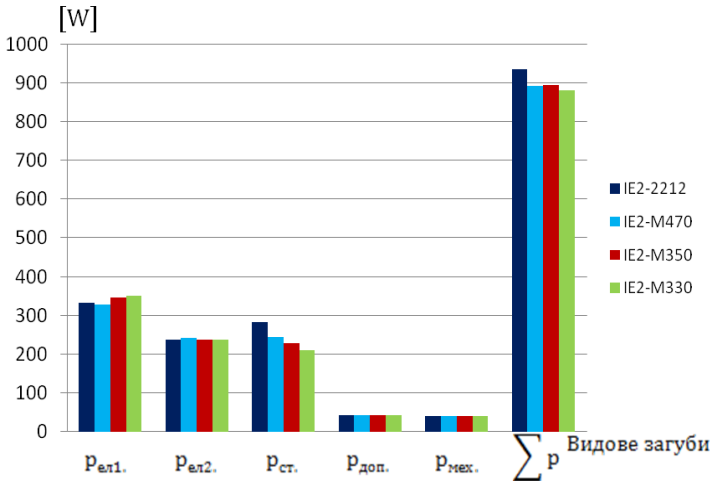
Анализът на загубите в асинхронните двигатели показва, че най-големи стойности имат електрическите загуби в статорната намотка, магнитните загуби (загуби в стоманата) и електрическите загуби в роторната намотка. Влиянието на механичните и допълнителните загуби върху ефективността е малко, а и те зависят слабо от проектните данни. Загубите в роторната намотка могат да бъдат намалени с 15 – 20% при използване на мед вместо алуминий [8], но това изисква въвеждане на нова и по-скъпа технология на производство [9], затова не е обект на настоящия анализ.

2. Влияние на качеството на електротехническата стомана

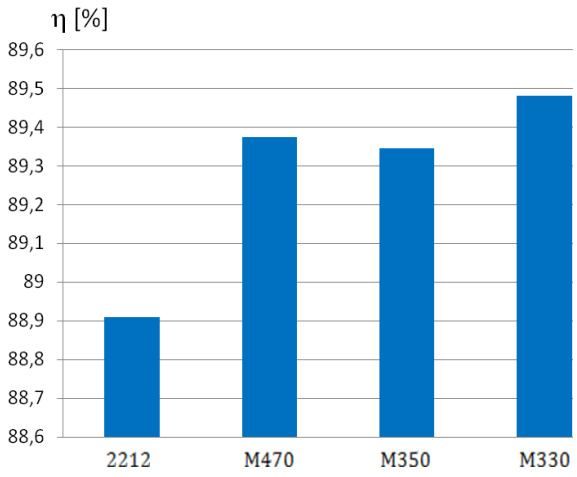
Загубите в стоманата са функция на магнитните натоварвания и на характеристиките на използваната електротехническа стомана. Най-голям потенциал за намаляването им има при използване на по-качествена стомана с по-малки специфични загуби. За оценка на влиянието са проведени поредица изчисления за изследвания двигател с различни стомани за магнитопроводите на статора и ротора. Стоманите са следните:

Тип стомана	Специфични загуби, при индукция 1.5T , W/kg
2212	5,2
M470-50	4,7
M350-50	3,5
M330-50	3,3

Използвани са намотъчни данни и геометрия на проекта, удовлетворяващ изискванията за клас IE2. Резултатите от сравнението на загубите са показани на фиг.2 и от него се вижда, че едновременно с намаляване на магнитните загуби има слабо покачване на електрическите загуби в статорната намотка, дължащо се на различните магнитни характеристики на марките стомани. Общите загуби намаляват и това води до нарастване на коефициента на полезно действие - фиг.3, но недостатъчно за достигане на стойностите, изисквани за клас на ефективност IE3. Същевременно по-качествената и по-скъпа стомана повишава себестойността на двигателя, без да е постигнат необходимия ефект.



Фиг.2. Съставки на загубите при използване на различни стомани



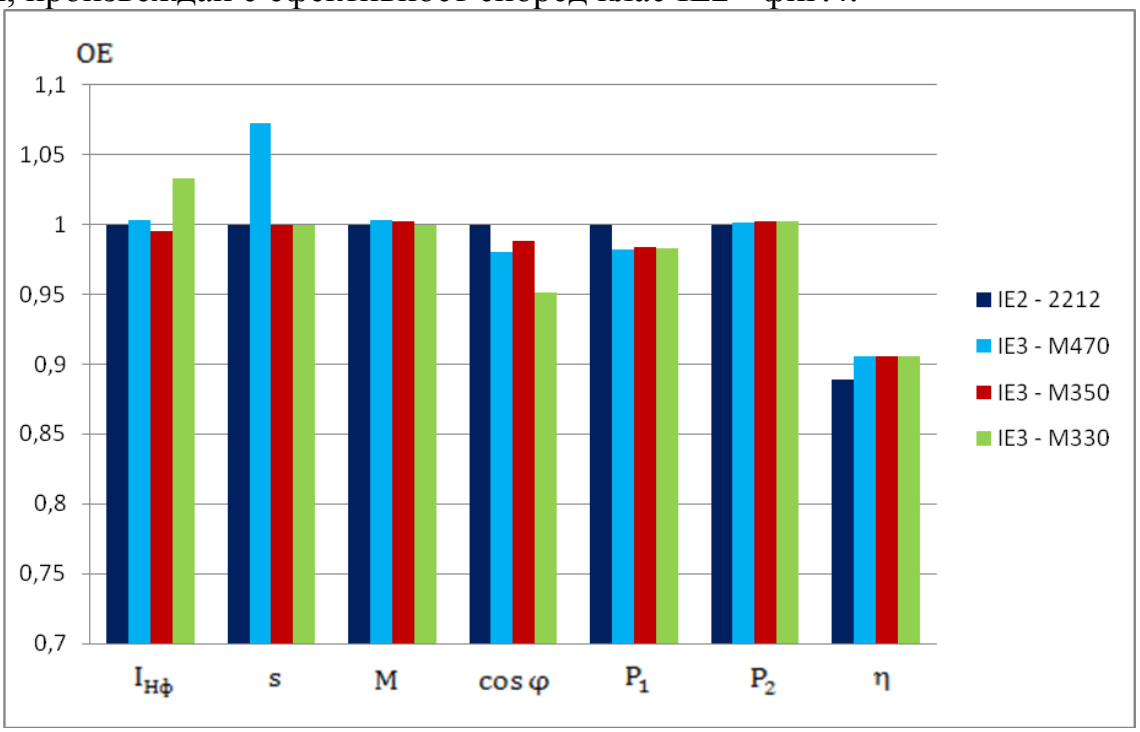
Фиг.3. К.п.д. на двигателя с различни марки електротехническа стомана

Следователно за преминаване към висока ефективност използването на по-качествени материали трябва да се съчетае с разработване на цялостно нов проект на двигателя - нови напречна геометрия на магнитната система и данни на намотките. При това в новия проект трябва да се намери баланс на съставките на загубите, при който необходимия коефициент на полезно действие се постига с най-рационално използване на активните материали.

3. Проект на двигателя за клас на ефективност IE3 (Premium efficiency)

Намаляване на загубите на двигателя може да се получи с намаляване на електромагнитните натоварвания при запазване на напречната му геометрия, а това означава влагане на много по-голямо количество активни материали, увеличаване на масата, размерите и цената. В повечето случаи това не е достатъчно за повишаване на ефективността до стойностите отговарящи на клас IE3.
Когато се използват по-качествени материали съотношението между натоварванията в отделните участъци се променя и за минимизиране на загубите е необходимо да се определят нови размери на магнитната система и намотките. По този начин повишената ефективност може да бъде постигната не само без да е задължително това да е за сметка на увеличеното количество на използваните материали, а дори и с намаляването му. За илюстрация е направено разработване на нови проекти на изследвания 7.5 kW двигател. За клас на ефективност

IE2 той е проектиран с електротехническа стомана 2212 и има коефициент на полезно действие 88.9%. Предложени са варианти на проекти при използване на три вида по-качествени електротехнически стомани – M470-50, M350-50 и M330-50. И при трите е получен коефициент на полезно действие 90.6%, като останалите технически характеристики са приблизително еднакви с тези на двигателя, произвеждан с ефективност според клас IE2 - фиг.4.



Фиг.4. Технически характеристики на анализираните варианти

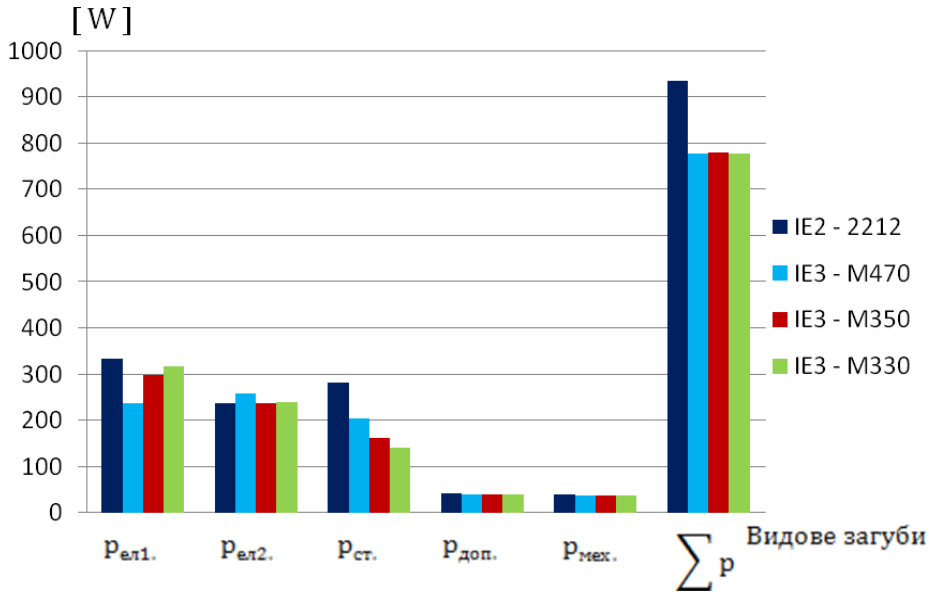
Според спецификата на проекта при всички варианти се използва различно количество активни материали. Между 55 и 75% е увеличена медта за статорната намотка при преминаване към клас IE3, а електротехническата стомана се увеличава или намалява с приблизително 8%, според това дали е с по-големи или по-малки специфични загуби. Масата на активните материали за четирите варианта и цените им са показани в табл.1.

Табл.1

		IE2 - 2212	IE3-M470	IE3- M350	IE3-M330
Fe	маса , kg	55,67	59,8	52,9	51,4
	цена , лв.	100,15	131,56	132,25	143,87
Cu	маса , kg	4,4	7	6,35	6,25
	цена , лв.	65,7	105	95,43	93,87
Al	маса , kg	1,53	1,6	2,45	2,05
	цена , лв.	6,9	7,2	11,07	9,34
Общо	маса , kg	61,5	68,4	61,7	59,7
	цена , лв.	172,8	243,76	238,75	247,08

Трите проекта по IE3 имат еднакъв коефициент на полезно действие, но както съотношението между използваните материали е различно, различни са нато-

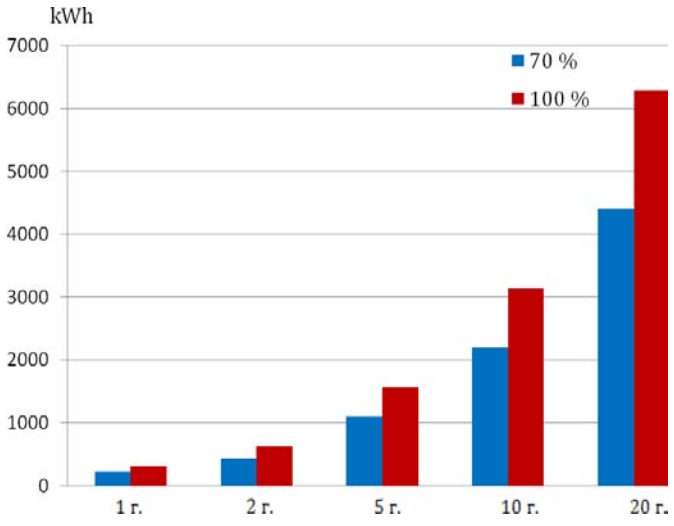
варванията в отделните части на двигателите и разпределението на загубите в тях. Съотношенията между съставките на загубите са показани на фиг.5.



Фиг.5. Съставки на загубите при различните варианти на проекта

4. Анализ на цената и разходите

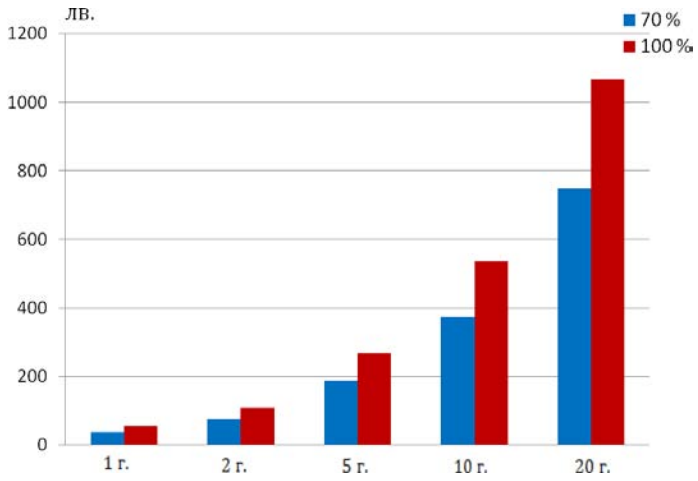
Както се вижда от разглеждания пример, намаляването на загубите на двигателите с клас на ефективност IE3 се постига чрез увеличаване на количеството активни материали и използване на по-висококачествена електротехническа стомана. Тези мерки може да увеличат себестойността и цената на двигателите с 30-40%. Много от купувачите на двигатели не са крайните им потребители, а такива които изграждат и оборудват съоръжения за други клиенти. Те са заинтересувани да предложат по-ниска цена на обекта си и следователно да вложат двигатели с по-малка себестойност. Следователно на дневен ред стои въпросът „*Как да се убедят клиентите, че да заплатят по-голямата цена за електродвигатели с висока ефективност ще се окаже по-изгодно за тях*?”



Фиг.6. Спестена енергия при работа на една смяна

Анализите показват, че покупната цена представлява само около 2.5% от пълните разходи за жизнения цикъл на двигателя [1,3,8]. Около 1.5% са разходи за профилактика и ремонт и 96% са разходите за електроенергия. Изследвания показват, че благодарение на намалените разходи за електроенергия при експлоатацията, по-високата цена на двигателите се изплаща за по-малко от 2 години [1,4].

За разглеждания пример са направени изчисления за количествата електроенергия, която ще се спести от замяната на един двигател от клас на ефективност IE2 с такъв за клас IE3. Тъй като обикновено двигателите не работят през цялото време с номиналното си натоварване, резултатите са показани за натоварване 70% и 100% при работа на една смяна - фиг.6. С прилагане на текущите цени на електроенергията и материалите е изчислена икономията, която ще реализира анализирания 7.5 kW двигател за различен срок на експлоатация - фиг.7 и е направена оценка на срока за изплащане на оскъпяването на използваните материали. При работа на една смяна и средно натоварване 70% той е около 2 години, а ако работи с номиналното си натоварване - само 16 месеца.



Фиг.7. Спестени разходи за електроенергия при работа на една смяна

5. Заключение

Днес повече от всякога икономията на енергия и ефективната работа на съоръженията е актуална задача във всички браншове на индустрията. Това е особено важно за електродвигателите, които са най-големия консуматор на електроенергия. Дори и малко повишаване на тяхната ефективност има за резултат големи икономии на енергия и средства – използването на високоефективни двигатели може да намали общата консумация с 1-2%. Допълнителна екологична изгода е намаляването на емисиите от въглероден диоксид, изхвърляни в атмосферата при производството на електроенергията. Заради намалените загуби загряването на двигателите е по-малко, от което надеждността и дълготрайността на възлите им нараства.

Цената на повишаването на ефективността е проектиране на двигателите с използване на повече и по-скъпи материали. Увеличената себестойност не трябва да бъде пречка за придобиването и внедряването им, защото се изплаща бързо от значително по-икономичната работа. За кратък период на експлоатация те възвръщат допълнително вложените средства в следствие на намалените разходи за покриване на загубите.

В работата е представен анализ на ефекта от проектирането на двигател с повишена ефективност от класа на най-масово произвежданите. Количествените съотношения, показани за него, няма да бъдат съвсем същите за двигатели с други мощности и скорости, но убедително доказват предимствата от използването на високоефективни електродвигатели, независимо от повишената им себестойност.

Благодарности

Авторите благодарят на Фонд "Научни изследвания" за финансовата подкрепа в рамките на договор ДУНК 03/1 „Университетски научно-изследователски комплекс".

Литература

[1] Baggini, A., F. Bua, F. Buratti. Energy efficient motor systems in Europe. *http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2008 /EEMotors_ver000B.pdf*
[2] Boteler, R., C.U. Brunner, A.deAlmeida, M. Doppelbauer, W. Hoyt. Electric motor MEPS guide. Zurich, Switzerland, Feb. 2009. *http://www.leonardo-energy.org/white-peper/electric-motor-meps-guide*
[3] *http://en.wikipedia.org/wiki/Premium_efficiency*
[4] *http://www.nema.org/gov/energy/efficiency/premium*
[5] Jornet, A. Messverfahren zur Wirkungsgradbestimmung von Asynchronmotoren. Antriebstechnik, 38 (1999), No.6, 30-32.
[6] IEC 60034-30, Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code). International Electrotechnical Commission, 2008.
[7] Neumann, K. Energiesparmotoren – Nutzen oder Mehraufwand?, Antriebstechnik 38 (1999), No.9, 75-77.
[8] Ultra efficient motors have copper rotors, Drives and Controls, April 2006, http://www.drives.co.uk/fullstory.asp?id=978.
[9] Manoharan, S., N. Devarajan, S.M. Deivasahayam, G. Ranganathan. Review on efficiency improvement in squirrel cage induction motor by using DCR technology. Journal of Electrical Engineering, Vol.60, No.4, 2009, 227-236.

Автори: инж. Георги Тодоров, - доц. д-р, катедра "Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *gtto@tu-sofia.bg*; бак. инж. Божидар Стоев, студент, катедра "Електрически машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *bozhidarstoev@elprommotors.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент**: гл. ас. д-р Адриан Иванов

ЕЛЕКТРОМАГНИТНО МОДЕЛИРАНЕ И ИЗЧИСЛЕНИЕ НА КОНУСНИ АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ

Георги Тодоров, Димитър Жечев

Резюме: *Разработен е аналитичен модел за електромагнитно изчисление на конусни асинхронни двигатели, в който са отразени конструктивните им особености. С итерационна процедура се определя неравномерното разпределение на магнитния поток по дължината на конусния магнитопровод и различните електромагнитни натоварвания в отделните участъци, които той създава. Така с голяма точност се изчисляват параметрите и характеристиките на двигателите и аксиалната сила, създадена при различните режими на работа.*

Ключови думи: *конусни асинхронни двигатели, магнитна верига, аксиална сила.*

ELECTROMAGNETICAL MODELING AND DESIGN OF CONE ASYNCHRONOUS MOTORS

George Todorov, Dimitar Jetchev

Abstract: *Analytical model for electromagnetic calculation of cone asynchronous motors has been developed. The model takes into account the special features of the motor design. It makes possible to calculate the uneven distribution of the magnetic flux along the length of the cone magnetic core and the uneven electromagnetic quantities in all sections. These quantities are necessary to obtain the correct values of the parameters, characteristics and axial force for all operating modes.*

Key words: *cone asynchronous motors, magnetic circuit, axial force.*

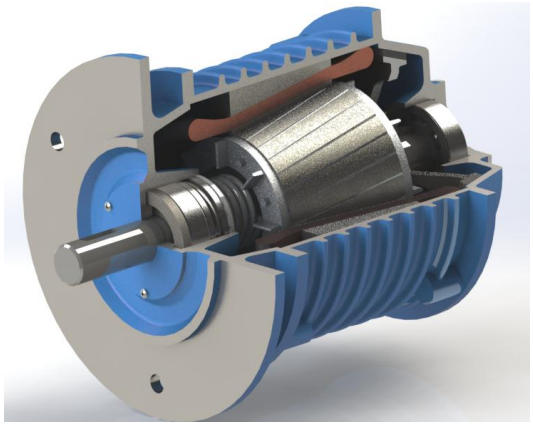
1. Увод

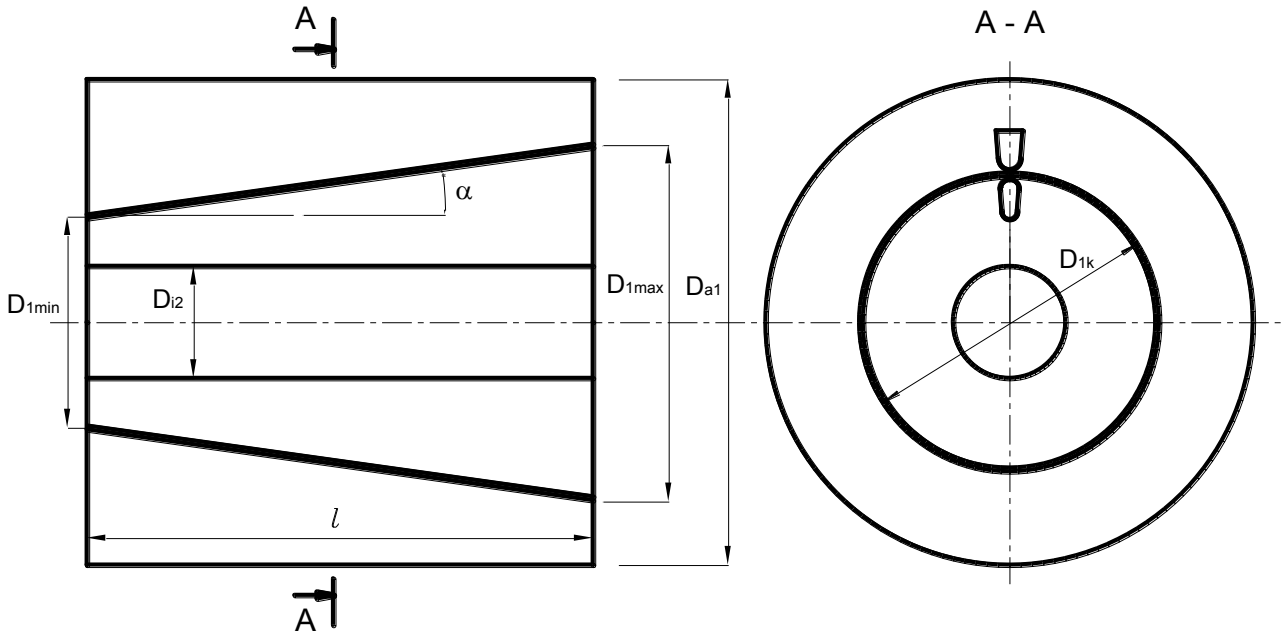
В голяма част от подемно-транспортните механизми се използват конусни електродвигатели със спирачка. Спирачката има предназначение да спре движението на механизма и да го задържа в неподвижно състояние. Обикновено те са двускоростни асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор и разлика в скоростите от 1:3 до 1:6. Конструкцията и технологията на производство на конусните двигатели с вградена спирачка е усложнена в сравнение с тази на двигателите с цилиндричен ротор. При тях една и съща електромагнитна част се използва за създаване на въртящия момент и на електромагнитната сила за освобождаване на спирачката. На фиг.1 са показани основните размери на статорния и роторния магнитопроводи на конусен асинхронен двигател.

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

ISSN 1311-0829

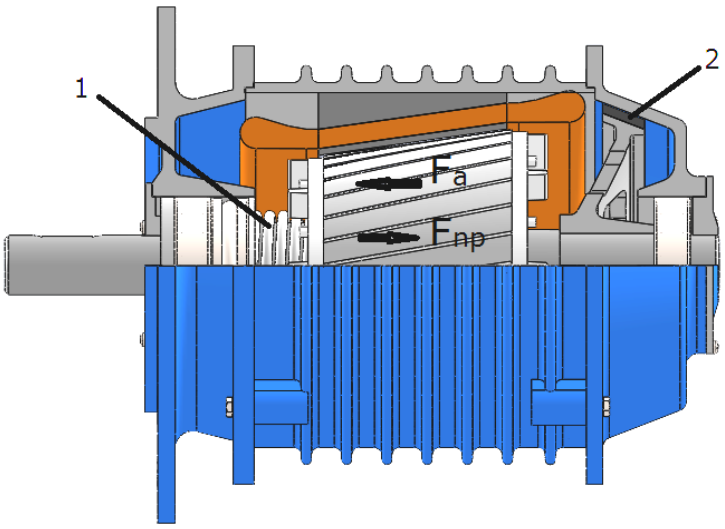
Докато при обикновените електрически машини статорният и роторният магнитопроводи са цилиндрични пакети, то при конусните двигатели те представляват конусни пакети. Статорният пакет е с цилиндрична външна повърхнина (външен диаметър D_{a1}) и вътрешна повърхнина на срязан конус (вътрешен диаметър се мени от D_{1min} до D_{1max}). Роторният пакет е с външна повърхнина на срязан конус (външен диаметър се мени от D_{2min} до D_{2max}) и вътрешна цилиндрична повърхнина с диаметър D_{i2}.





Фиг.1. Основни размери на магнитопровода на конусен асинхронен двигател

Напречното сечение на пакетите показва същото разположение на статорни и роторни канали, както при цилиндричните машини, но при запазени еднакви размери на каналите в аксиална посока, размерите на зъбите и яремите са променливи. Това означава, че магнитопроводите на тези двигатели не са набрани от еднакви статорни и роторни листа, а е необходимо да се щанцоват различни листа, за да се оформят конусните пакети. Основен параметър при оформянето на пакетите е ъгълът на скосяване α - фиг.1. Една от типичните конструктивни схеми на конусен двигател е показана на фиг.2. Въпреки усложнената технология на изработване на пакетите, конусните асинхронни двигатели се произвеждат и намират приложение за задвижване на ходови и подемни механизми на електротелфери и трансманипулатори. Това е заради наличието на аксиална електромагнитна сила F_a която отделя ротора от спирачните дискове при работа на двигателя - фиг.2.



Фиг.2. Конусен асинхронен двигател

Двата радиални лагера осигуряват и малко аксиално изместване. При отсъствие на захранващо напрежение под действието на пружината (1) роторът е притиснат до спирачните дискове (2) и не може да се върти. При включване на двигателя магнитното поле създава сила на привличане насочена по нормалата към конусните повърхнини, която се разлага на радиална и аксиална компоненти. Радиалните компоненти се уравновесяват взаимно по обиколката на ротора, а аксиалните действат в една посока и създават сила, която преодолява силата на пружината и измества вала и роторния пакет в аксиално направление. Спирачният диск се освобождава и роторът се завърта под действие на тангенциалните сили, създаващи въртящия момент. При аксиалното преместване на роторния пакет въздушната междина δ се променя. Нейната стойност е минимална, когато роторът е отцепен от спирачката и се върти и е максимална когато роторът не се върти - $\delta_{max} = \delta + a.\sin\alpha$. Ходът в осево направление a е малък. Това дава основание електромагнитните изчисления да се извършват за стационарни процеси, като за режим на късо съединение се работи с максималната стойност на въздушната междина, а за останалите режими на работа - с минималната стойност на въздушната междина.

2. Електромагнитно моделиране

За цилиндричните асинхронни двигатели електромагнитното поле може да се разглежда като плоско-паралелно и изследването му в едно напречно сечение е достатъчно за изчисляване на магнитната верига, параметрите и геометричните му размери. При конусните двигатели разглеждането на електромагнитното поле като плоско-паралелно би довело до достоверни резултати само при много малки стойности на ъгъла на скосяване, при което напречната геометрия се променя малко и влиянието върху магнитните натоварвания в аксиална посока е незначително. Пълно изследване на разпределението на електромагнитното поле при всякакви ъгли на скосяване може да се проведе с използване на компютърен софтуер за 3D моделиране и анализ. Това е свързано с необходимостта от наличие на съответното техническо и програмно осигуряване и с приемане на определени опростяващи допускания при описване и задаване на тримерната геометрия, което ограничава приложението му при проектирането и конструирането на двигателите.

В настоящата работа е предложен подход, при който се използва познатия модел на електрическа машина, почиващ на Т-образната заместваща схема [3]. Подходът се базира на разглеждането на конусообразните магнитопроводи на статора и ротора като съставени от m-пакета в осево направление, като магнитната верига се изчислява за средното сечение на всеки от пакетите.
Анализирани са следните варианти :

A) m = 1 - изчисляване на плоско-паралелно поле само в средата на магнитопровода;

B) m = 3, като в средния пакет сечението е в средата, а в крайните пакети сечението е на l/3 от края на пакета;

C) Изчисляване на магнитната верига за m пакета (m > 3), като за всеки пакет сечението е в средата му.

При вариант А) изчислението се прави както за цилиндричен магнитопровод, с диаметри и напречна геометрия равни на тази в средното сечение. В табл.1 са показани резултатите от изчисляването на магнитната верига при празен ход за високата скорост на двускоростен двигател 3/0,75 kW, 3000/750 min^{-1}.

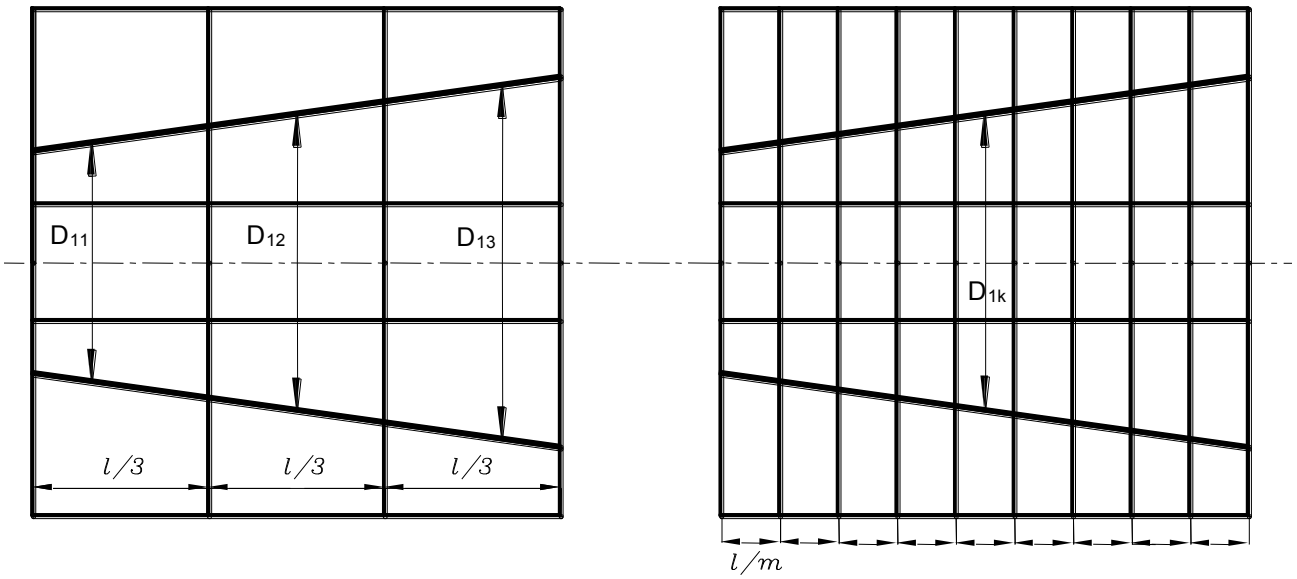
Табл.1

E1	Bdel	Bz1	Bz2	Ba1	Ba2	Bz1m	Bz2m
204.9	0.778	1.334	1.162	2.055	0.701	1.357	1.221
Fo	Fdel	Fz1	Fz2	Fa1	Fa2	Iom	kz
1277.	356.	12.	4.	902.	3.	5.472	1.047

Вижда се, че най-натоварен участък е статорния ярем, където магнитната индукция надхвърля 2 Т и магнитодвижещото напрежение за този участък е много по-голямо от това за въздушната междина. При това трябва да се има предвид, че височината на статорния ярем в десния край на пакета (фиг.1) е по-малка и магнитната индукция там ще е значително по-висока, което при този вариант на изчисление не се отчита. Това означава, че при този вариант магнитодвижещото напрежение и намагнитващия ток на конусния двигател не се определят достатъчно коректно.

При вариант В) се изисква изчисление на 3 плоско-паралелни полета в посочените сечения. Целта е с минимален брой сечения да се направи опит да се отчетат екстремно натоварени сечения в края на пакетите. Резултатите също не са задоволителни.

Вариант С) дава възможност конусният магнитопровод да се апроксимира със стъпаловидна фигура, съставена от m цилиндрични пакети, като плоско-паралалното магнитно поле се анализира в средното сечение на всеки от пакетите. Този подход е възприет в работата за по-точно определяне на електромагнитните натоварвания в отделните участъци и по-точни стойности при изчисляване на параметрите.



вариант B) вариант C)

Фиг.3. Геометрия за изчисляване по вариант B) и вариант C)

За да се постигне това е необходимо да се уточнят:

- броя на пакетите (сеченията) m ;
- всички величини, които се явяват променливи при различните сечения;
- стойностите, които се явяват представителни за целия пакет.

Броят на пакетите, който гарантира достатъчна точност, се определя след провеждане на поредица от изчисления с нарастваща стойност на m. Беше установено, че при реалните стойности на ъгъла на скосяване в конусните двигатели е достатъчно $m = 7 \div 9$.

Променливите величини се дефинират във функция на вътрешния диаметър на статора D_1. При зададен вътрешен диаметър в средата на статорния пакет D_1, минималната му стойност (в края на пакета) е

$$D_{1\min} = D_1 - l.tg\alpha \qquad (1)$$

където l е общата дължина на пакета, а α е ъгъла на скосяване. Тогава за всеки k^{mu} пакет вътрешният диаметър на статора е:

$$D_{1k} = D_{1\min} + (2.k - 1)\frac{l}{m}tg\alpha \qquad , k = 1, 2, \ldots, m \qquad (2)$$

Променливи за отделните пакети са следните величини:

- полюсно деление τ_{1k};
- коефициент на въздушна междина $k_{\delta k}$;
- зъбно деление на статора и ротора t_{z1k}, t_{z2k};
- ширини на статорните и роторните зъби b_{z1jk}, b_{z2jk}, където j е номера на сечението по височина на зъба за съответния вид канал ;
- височини на статорния и роторния яреми h_{a1k}, h_{a2k};
- дължина на силовата линия в статорния и роторния яреми τ_{a1k}, τ_{a2k}.

3. Изчисляване на магнитната верига на конусния двигател

Изчисляването на магнитната верига има за цел точното определяне на магнитните натоварвания в отделните участъци, магнитодвижещото напрежение и намагнитващия ток на двигателя, необходими за създаване на магнитния поток. Поради променливата конфигурация на магнитната система в аксиално направление, разпределението на магнитния поток в конусните двигатели не е равномерно по дължината на магнитопровода. Затова индуктираното е.д.н. ще бъде различно в частите от намотката, разположени във всеки един от елементарните пакети. За точното определяне на разпределението на потока, електродвижещото напрежение и намагнитващия ток се прилага итерационна процедура, основана на определени допускания:

i. Магнитодвижещото напрежение на всички елементарни пакети е еднакво, тъй като се създава от една и съща намотка и един намагнитващ ток.
ii. Общият магнитен поток е аритметична сума от магнитните потоци на отделните пакети.
iii. При стационарен режим магнитният поток през даден елементарен пакет зависи само от неговото магнитното съпротивление. Този магнитен поток индуктира съответното E_{1k}.
iv. Е.д.н. E_1 за цялата намотка е сума от е.д.н. на отделните пакети. Тъй като през отделните пакети преминават магнитни потоци с различна големина, те индуктират различни е.д.н. E_{1k}. Приема се, че индуктираните е.д.н. са съфазни и $E_1 = \sum_{k=1}^{m} E_{1k}$.

Като резултат от нееднаквите магнитни потоци през отделните пакети разпределението на магнитните индукции B_δ, B_{z1}, B_{z2}, B_{a1} и B_{a2} също е различно. Различни са и коефициентите α_δ, k_B, k_z, k_μ. Всички тези стойности са необходими за точното изчисляване на магнитодвижещото напрежение и намагнитващия ток на двигателя. Те се определят в процеса на изчисляване на магнитната верига по следната итерационна процедура:

a) Началните стойности за електродвижещите напрежения на всички пакети се приемат еднакви - $E_{1k} = \frac{E_1}{m}$. Провеждат се m изчисления на магнитни вериги за всеки пакет и се получават m стойности за м.д.н. F_k. Изчислява се средната стойност:

$$F_{cp} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} F_k \tag{3}$$

b) Изчисляват се отклоненията спрямо средната стойност в %:

$$\Delta F_k = \frac{F_{cp} - F_k}{F_{cp}} 100 \tag{4}$$

c) Намира се максималното по абсолютна стойност отклонение:

$$\Delta F_{k\max} = max\left(\left|\Delta F_k\right|\right) \tag{5}$$

d) Проверява се $\Delta F_{k\max} < \Delta F_{\text{dop}}$, където ΔF_{dop} е зададена стойност, дефинираща точността на итеративното изчисление:
   - Ако условието е изпълнено, то изчислението за зададената стойност на е.д.н. E_1 се прекратява.
   - Ако условието не е изпълнено, то итерационният процес продължава като се зададат нови стойности на е.д.н. E'_{1k}:

$$E'_{1k} = E_{1k} + \Delta E_k \tag{6}$$

Промяната на е.д.н. ΔE_k е пропорционална на отклонението на м.д.н. за съответния пакет от средната стойност. Бърза и сигурна сходимост може да се постигне чрез:

$$\Delta E_k = \Delta F_k . \frac{E_1}{m} . k_p \tag{7}$$

Коефициентът k_p отчита нелинейната зависимост между е.д.н. и м.д.н. Препоръчителна стойност на k_p=0.2. При опасност от зацикляне неговата стойност се намалява наполовина.

Изчислява се нова стойност на електродвижещото напрежение на статорната намотка $E_1 = \sum_{k=1}^{m} E'_{1k}$ и процедурата се повтаря до изравняване на м.д.н. на отделните пакети в рамките на зададената точност.

Резултатите от такова изчисление са уточнени стойности на магнитните натоварвания в m сечения на отделните пакети в осово направление, с които се изчислява намагнитващия ток на двигателя.

За пълнота беше разгледана и по-прецизната постановка, отчитаща че общото електродвижещо напрежение E_1 не е аритметична, а векторна сума на е.д.н. E_{1k} на отделните пакети. При това за всеки елементарен пакет се изчислява намагнитващ ток $I_{0\mu}$ и активна съставка I_{0a} , като еднакъв за всички пакети е общият ток I_0. Резултатите показаха пренебрежимо малки разлики, които не промениха електромагнитното изчисление на полето.

4. Аксиална електромагнитна сила

Точното аксиално разпределение на магнитната индукция във въздушната междина B_δ освен за изчисляване на магнитната верига е необходимо и за коректно изчисляване на аксиалната електромагнитна сила при конусните двигатели. Тази сила се получава поради коничната форма на магнитопровода на двигателя и трябва да е с големина, достатъчна да преодолеее силата на пружината, за да освободи спирачните дискове при подаване на захранване към статорната намотка на двигателя.

Аксиалната електромагнитна сила може да се получи чрез диференциране на магнитната енергия във въздушната междина по направлението на оста на двигателя [1, 2] .

$$dP_a = \pm \left(\frac{\partial W_m}{\partial z} \right)_{i=const} \tag{8}$$

При конусните асинхронни двигатели тя се създава както от магнитния поток на главния хармоник, така и от потоците на висшите хармоници на статорния и роторния токове. Върху големината ѝ оказват влияние различни фактори:

- разпределението на магнитната индукция във въздушната междина B_δ в аксиално направление ;
- насищането на стоманата по отношение на главния магнитен поток;
- насищането по отношение на магнитния поток на разсейване на висшите хармоници;
- ъгълът на скосяване на магнитопровода α;
- скосяването на каналите.

За практически изчисления определянето на аксиалната сила се свежда до намиране на две съставки [1]:

- F_{a1} - съставката на аксиалната сила създадена от главния хармоник.

Тя зависи основно от магнитната индукция във въздушната междина. Тъй като индукцията е неравномерно разпределена, общата сила F_{a1} е сума от силите създадени във всеки от елементарните пакети

$$F_{a1} = \sum_{k=1}^{m} F_{a1k} \,, \tag{9}$$

като

$$F_{a1k} = c_A \frac{B_{\delta k}^2}{2} \,. \tag{10}$$

Тук коефициентът

$$c_A = 1.25 D_{1k} \frac{l_1}{m} tg\alpha \tag{11}$$

- F_{a2} - съставката на аксиалната сила, породена от висшите хармоници.

Тя е пропорционална на тока и зависи силно от коефициентите на намотката за висшите хармоници и насищането на коронките на зъбите от потоците на висшите хармоници. Изчислението се провежда еднократно за целия магнитопровод:

$$F_{a2} = 1{,}44.10^{-6} \frac{c_{Ak.s.}}{p^2 \delta^2} c_{00} k_{nhh}^2 w_1^2 \left(I_1^2 \Sigma_\nu + I_2^{'2} . k_{w1}^2 \Sigma_\mu \right) , \tag{12}$$

$$c_{Ak.s.} = 1.25 . D_1 l_1 . tg\alpha \;\; ; \tag{13}$$

c_{00} взема предвид намалената магнитна проводимост на въздушната междина вследствие наличието на отвори на каналите;

k_{nhh} е коефициент за насищане от магнитните потоци на висшите хармоници и се изчислява при късо съединение, заради намаляването на потока на разсейване.

Сумите Σ_ν и Σ_μ отчитат коефициентите на статорната намотка за висшите хармоници на статорното поле (ν) и на роторното поле (μ):

$$\Sigma_\nu = \sum_{\lfloor \nu \rfloor \neq p} \frac{k_{w\nu}^2}{\nu^2} , \qquad \Sigma_\mu = \sum_{\lfloor \mu \rfloor \neq p} \frac{k_{w\mu}^2}{\mu^2} \tag{14}$$

При намотки с q цяло число изчисляването на коефициентите и техните суми се извършва в базовата програма, то за намотки с q дробно число се налага допълнително изчисление. За такива намотки се разглеждат както висшите хармоници $v > p$, така и субхармониците (нисшите хармоници) $v < p$.
Общата аксиална сила на конусния двигател е

$$F_a = F_{a1} + F_{a2} \tag{15}$$

При празен ход тя се формира основно от магнитното поле на главния хармоник и в малка степен от това на висшите хармоници, а при късо съединение висшите хармоници на токовете в статорната и роторната намотка създават значително по-голяма част от аксиалната сила.

5. Заключение

Предложеният модел за електромагнитно изчисление на конусни двигатели отчита всички особености на магнитната верига на двигателя и позволява коректно определяне на неравномерното разпределение на магнитния поток. С него може да се определят по-точно електромагнитните натоварвания във всички сечения на магнитната система, параметрите и характеристиките на двигателя, както и аксиалната сила в различните режими на работа. Моделът е удобен за практическо използване от конструктори и изследователи на електрически машини. Той дава възможност за изчисляване и анализиране на конусни двигатели, като се ползват подход, математичен апарат и алгоритми, познати, проверени и утвърдени при разработване и анализ на двигатели с цилиндрични магнитопроводи.

Литература

[1] Рачев, Д. Телферни електродвигатели, С., Техника, 1980.
[2] Bradford C. E., R. G. Rhudy. Axial magnetic forces on induction machine rotors. Trans AIEE, 1953, P.III-A, Vol.72, 488-494.
[3] Жечев, Д. Методи, алгоритми и програмни продукти за електромагнитни изчисления на променливотокови машини и електрозадвижвания с асинхронни двигатели при честотно регулиране, Дисертация, ТУ-София, 1999.

Автори: инж. Георги Тодоров, доц. д-р, катедра “Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *gtto@tu-sofia.bg*; инж. Димитър Жечев, доц. д-р, катедра “Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *jetch@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент**: гл. ас. д-р Адриан Иванов

МОНИТОРИНГ И АНАЛИЗ НА СТАТОРНИЯ ТОК НА АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ ЗА УСТАНОВЯВАНЕ НА ВЪТРЕШНОНАМОТЪЧНИ НЕСИМЕТРИИ И КЪСИ СЪЕДИНЕНИЯ

Георги Тодоров, Ганчо Божилов

Резюме: *Разгледан е подход за анализ на несиметрична работа на асинхронен двигател и е разработен изчислителен модел за изследване на вътрешнонамотъчни несиметрии. С него е моделирано междунавивково късо съединение и е показано нарастването на токовете с обратна последователност с увеличаване на броя на окъсените навивки. Моделът е приложен за изследване на влиянието на повредата при работа на празен ход и при натоварване. Проведени са експериментални изследвания за потвърждаване на работоспособността на модела. Аналитичните и експериментални резултати показват, че мониторинг на фазните токове на намотката дава възможност да се диагностицират междунавивкови къси съединения или други вътрешнонамотъчни неизправности по нарастването на коефициента на несиметрия.*

Ключови думи: *вътрешнонамотъчни повреди, междунавивково късо съединение, несиметрия, токове с обратна последователност.*

MONITORING AND ANALYSIS OF THE STATOR CURRENT OF AN INDUCTION MOTOR FOR DETECTING THE INTERNAL NON-SYMMETRY OR SHORT CIRCUIT

George Todorov, Gantcho Bojilov

Abstract: *An approach for analysis of non-symmetry in the windings of three-phase induction motors has been used to model an inter-turn short circuit with different number of turns involved into the loop. The analytical model has been applied for no-load and rated load operation of the motor to analyze the effect of the inter-turn fault. It is shown an increase in the negative sequence currents and in the non-symmetry with the depth of the fault. Verification of the calculated results has been done by series of experiments. Both the analytical and experimental results indicate that monitoring of the winding's currents enables to diagnose inter-turn short circuit or other internal faults at the increase of the coefficient of current's non-symmetry.*

Key words: *inter-turn faults, inter-turn short circuit, non-symmetry, negative sequence currents.*

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

ISSN 1311-0829

1. Увод

Асинхронните двигатели са едни от най-разпространените електромеханични преобразуватели в разнообразни задвижващи механизми. По конструкция и принцип на действие те са напълно симетрични, но при експлоатацията им по различни причини е възможно да се получат несиметрични режими на работа. Причините за това може да са външни - несиметрия в системата захранващи напрежения, несиметрични импеданси на захранващите кабели или вътрешни - прекъсване на намотката на някоя фаза, междунавивково късо съединение, прекъсване или шупли в пръчките или накъсосъединяващия пръстен на роторната намотка. Несиметричните режими, предизвикани от външни причини, предизвикват изменение на характеристиките на двигателите, повишаване на загубите и нарушаване на нормалната работа, но обикновено не водят до повреда. За разлика от тях вътрешните причини често причиняват сериозни повреди или излизане от строя ако не бъдат установени и отстранени своевременно. Според анализ на повредите в асинхронните двигатели [1, 2] между 30% и 40% от тях се дължат на междунавивково късо съединение поради влошаване на качествата на изолацията, предизвикано от термични или термо-механични натоварвания. Обикновено късото съединение засяга малко навивки и именението на токовете във външната верига е слабо, затова е трудно да бъде установено в началната си фаза. В последните години много изследвания са ориентирани към разработване на методи и подходи за установяване и моделиране на такива малки повреди [3, 4]. В настоящата работа е използван модел, базиран на метода на симетричните съставки. Той е приложен за аналитично изследване на 250 W двигател при работа на празен ход и с номинално натоварване, като работоспособността му е проверена експериментално.

2. Аналитичен модел на трифазен асинхронен двигател с междунавивково късо съединение

При възникване на междунавивково късо съединение или друга вътрешнонамотъчна повреда в някоя от фазите на трифазен асинхронен двигател, той става несиметрично устройство. Известно е, че според метода на симетричните съставки, всяка несиметрична m-фазна система напрежения и токове може да бъде представена като съвкупност от m симетрични системи. При трифазната система това са системите с права, обратна и нулева последователност. Когато симетричен трифазен асинхронен двигател се захрани от симетрична система напрежения (напрежения с права последователност) в статорната ѝ намотка протичат токове със същата последователност, създават кръгово въртящо магнитно поле и индуктират електродвижещи напрежения с права последователност. Всички падове на напрежение също са с права последователност, защото в симетричните машини падовете на напрежение с дадена последователност се създават само от токовете със същата последователност. За разлика от тях в несиметричните устройства падовете на напрежение с дадена последователност са свързани с токовете с всички последователности [5, 6]:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_1 &= \dot{I}_0\xi_{10} + \dot{I}_1\xi_{11} + \dot{I}_2\xi_{12}\\ \Delta\dot{U}_2 &= \dot{I}_0\xi_{20} + \dot{I}_1\xi_{21} + \dot{I}_2\xi_{22}\\ \Delta\dot{U}_0 &= \dot{I}_0\xi_{00} + \dot{I}_1\xi_{01} + \dot{I}_2\xi_{02}\end{aligned} \quad (1)$$

Индексите 1, 2 и 0 отговарят съответно на съставките с права, обратна и нулева последователност. Коефициентите ξ са функция на импедансите на фазите и имат същата размерност. При пространствено симетрична система:

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \xi_{10} = \xi_{02} = \xi_{21}\\ \xi_2 &= \xi_{01} = \xi_{20} = \xi_{12}\\ \xi_0 &= \xi_{00} = \xi_{11} = \xi_{22}\end{aligned} \quad (2)$$

като

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \frac{1}{3}\left(z_A + a.z_B + a^2.z_C\right)\\ \xi_2 &= \frac{1}{3}\left(z_A + a^2.z_B + a.z_C\right)\\ \xi_0 &= \frac{1}{3}\left(z_A + z_B + z_C\right)\ .\end{aligned} \quad (3)$$

Когато в една от фазите на трифазен асинхронен двигател има междунавивково късо съединение на част от намотката, той може да се разгледа като такъв с последователно свързани две намотки. Едната е симетрична и съответства на незасегнатия от късото съединение брой навивки, а другата е с останалия брой навивки за двете изправни фази и нулев импеданс за фазата с късо съединение. Нека двигателят е с кафезен ротор, със статорна намотка свързана в звезда без изведена неутрала и системата захранващи линейни напрежения е симетрична, т.е. съдържа само права последователност. Тогава токове с нулева последователност няма да има и фазните напрежения няма да съдържат система с обратна последователност. Уравненията на напреженията в този случай ще бъдат:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{I}_1.Z_1 + \dot{I}_1\xi_0 + \dot{I}_2\xi_2\\ 0 &= \dot{I}_2Z_2 + \dot{I}_1\xi_1 + \dot{I}_2\xi_0\\ \dot{U}_0 &= \dot{I}_1\xi_2 + \dot{I}_2\xi_1\end{aligned} \quad (4)$$

където Z_1, Z_2 са импедансите с права и обратна последователност на симетричната намотка. Неизвестните в системата са токовете с права и обратна последователност I_1, I_2 и напрежението с нулева последователност U_0. Решението за токовете е:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1.\left(Z_2 + \xi_0\right)}{\left(Z_1 + \xi_0\right).\left(Z_2 + \xi_0\right) - \xi_1.\xi_2} \quad (5)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{U}_1.\xi_1}{\left(Z_1 + \xi_0\right).\left(Z_2 + \xi_0\right) - \xi_1.\xi_2}\ , \quad (6)$$

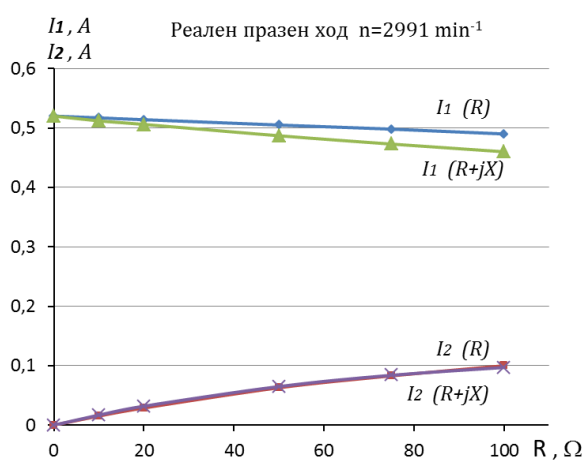
а напрежението с нулева последователност U_0 се намира от третото уравнение на (4). От така определените симетрични съставки по познатите зависимости се намират несиметричните системи на фазните токове и напрежения.

3. Аналитично изследване на степента на междунавивковото късо съединение

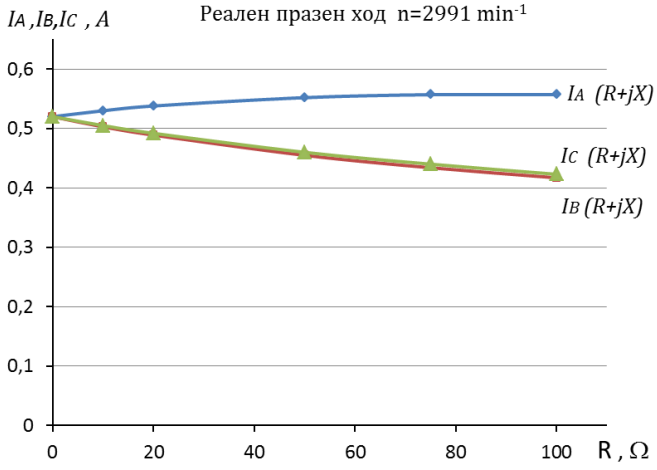
Проведени са аналитични изследвания на асинхронен двигател с мощност 250 W. Когато в една от фазите му (при анализите фаза А) възникне междунавивково късо съединение, нейният импеданс ще бъде по-малък от този на изправните фази.

За да се симулира такова късо съединение с модела, тя се представя като свързана директно към захранващото напрежение, а останалите две фази се захранват през последователно свързани импеданси, които съответстват на импеданса на окъсената част от повредената фаза. Задавайки различни стойности на последователните импеданси се получават зависимости, по които може да се оцени влиянието на степента на късото съединение върху несиметрията на фазните токове и напрежения.

Поредицата изчисления, направени при празен ход и натоварване, показаха, че характерът на зависимостите се запазва при всички режими на работа - при възникване на междунавивково късо съединение се появяват токове с обратна последователност и стойностите им нарастват с увеличаване на броя навивки в накъсосъединения контур.



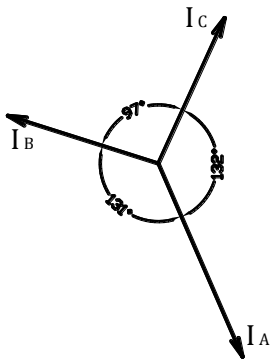
Фиг.1. Токове с права и обратна последователност при междунавивково к.с.



Фиг.2. Фазни токове при междунавивково късо съединение при празен ход

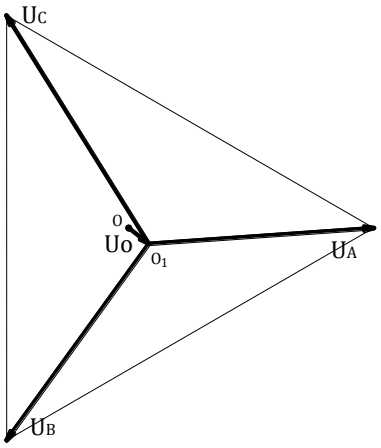
На фиг.1. са показани зависимостите на токовете с права и обратна последователност от дълбочината на дефекта, като в единия случай последователно на изправните фази са свързани импеданси (R+jX), а в другия само резистори (R).

В резултат от появата на токовете с обратна последователност фазните токове на двигателя оформят несиметрична система. Токът на фазата с късо съединение нараства, а на другите две фази намалява (фиг.2.), като ъгълът на дефазиране на фазата с междунавивково късо съединение спрямо двете изправни фази се увеличава. Векторната диаграма на фиг.3. показва системата несиметрични фазни токове при включени последователно на фази В и С импеданси $(100 + j59{,}6)\ \Omega$.



Фиг.3. Фазни токове

Тъй като захранващата система линейни напрежения е симетрична, във фазните напрежения няма обратна последователност. Несиметрията на фазните токове променя потенциала на звездния център – той е равен на напрежението с нулева последователност и се измества от т.О в т.O_1, както това е показано на фиг.4. В резултат от това фазните напрежения представляват несиметрична система. Степента на несиметрията, предизвикана от междунавивковото късо съединение, може да се оценява количествено по стойностите на коефициента на несиметрия на токовете k_i и коефициента на неуравновесеност на напреженията k_u:

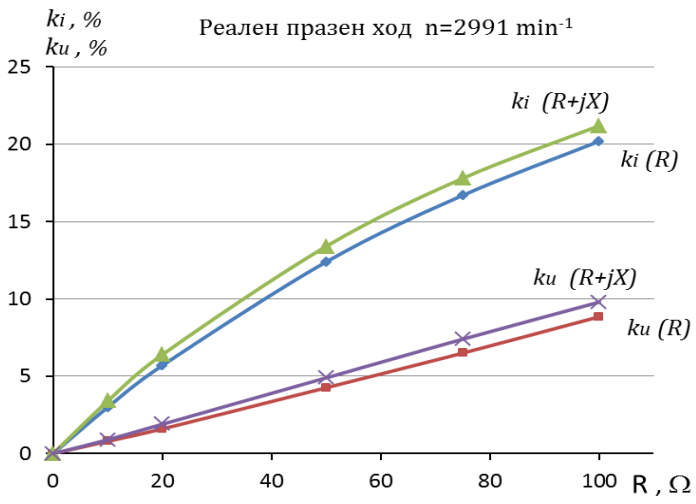


Фиг.4. Фазни напрежения

$$k_i = \frac{I_2}{I_1}.100\% \qquad (7)$$

$$k_u = \frac{U_0}{U_1}.100\% \qquad (8)$$

Техните стойности растат почти линейно с увеличаване на броя на навивките обхванати от накъсосъединения контур – Фиг.5. Този факт дава възможност установяването на междунавивкови къси съединения или други вътрешнонамотъчни повреди на асинхронните двигатели да става на базата на постоянен мониторинг на тока с обратна последователност в трифазната система, като неговото нарастване е индикация за възникнала неизправност.



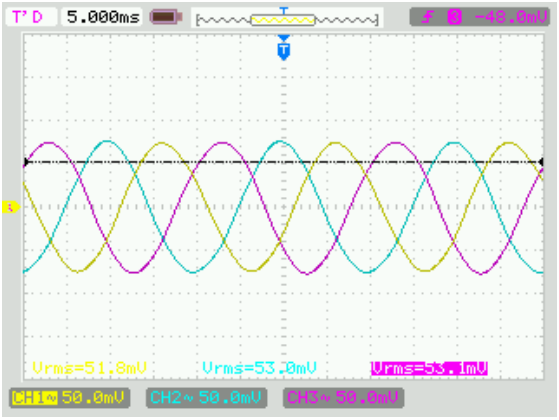
Фиг.5. Коефициенти на несиметрия на токовете и на неуравновесеност на напреженията

4. Експериментални резултати

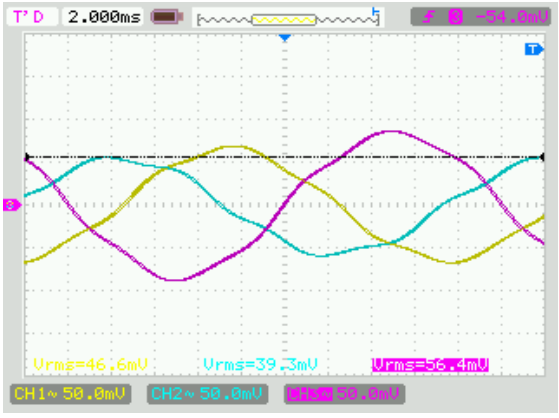
За експериментална проверка на аналитичния модел трифазен асинхронен двигател е захранен от симетрична система линейни напрежения и са проведени измервания на фазните токове при изправни намотки и при симулиране на междунавивково късо съединение в една от фазите му. Фаза А, на която се симулира късото съединение, е захранена директно, а другите две фази - през резистори 100 Ω. Осцилографирани са фазните токовете при работа на празен ход и при номинално натоварване. Дефазирането между тях е определено по аналитичен път от измерените им стойности, като се отчита, че намотката е без изведена неутрала и векторната им сума е равна на 0. За същите режими са направени изчисления с аналитичния модел. Сравнението на резултатите от изчисленията с модела и експериментите е показано в табл.1., а осцилограмите от измерванията - на фиг.6 ÷ фиг.9.

Табл.1

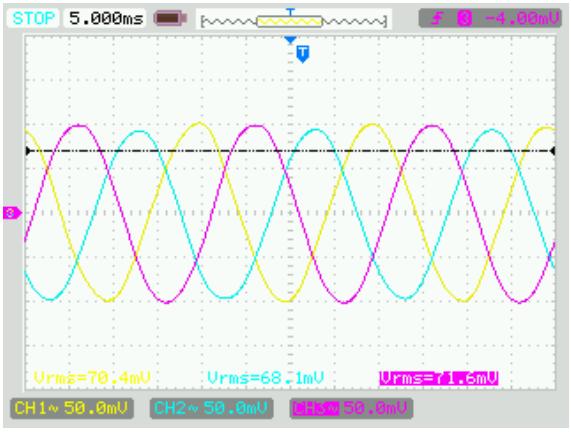
Режим	Празен ход				Номинален товар			
Резултат	Симетр. изчисл.	Симетр. опит	100 Ω изчисл.	100 Ω опит	Симетр. изчисл.	Симетр. опит	100 Ω изчисл.	100 Ω опит
I_A , A	0,52	0,531	0,584	0,564	0,66	0,716	0,684	0,741
I_B , A	0,52	0,53	0,418	0,393	0,66	0,681	0,49	0,487
I_C , A	0,52	0,518	0,485	0,466	0,66	0,704	0,569	0,556



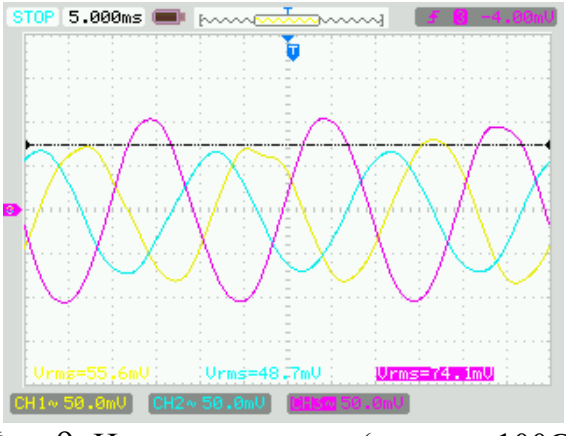
Фиг.6. Празен ход-симетричен



Фиг.7. Празен ход (допълн. 100Ω)



Фиг.8. Номинален товар-симетричен



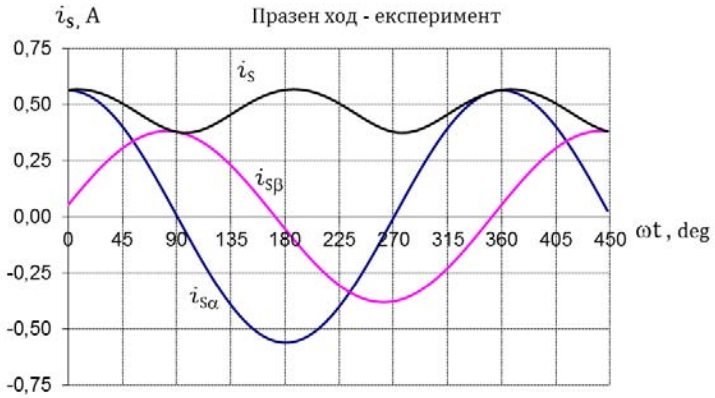
Фиг.9. Номинален товар (допълн. 100Ω)

Вижда се, че несиметрията от симулираното междунавивково късо съединение променя големината и дефазирането на токовете в трите фази, като опитните резултати потвърждават достоверността на изчислените с аналитичния модел. За да се направи количествена оценка на получената несиметрия експерименталните резултати са обработени с координатната трансформация на Парк при допускането, че токовете на фазите са синусоидални [7]. Изменението на амплитудата на изобразяващия вектор на статорния ток показва, че в резултат от несиметрията, породена от наличието на вътрешнонамотъчна повреда, въртящото магнитно поле на двигателя не е кръгово. Токовете с обратна последователност създават обратно въртяща съставка на полето и резултантното става елиптично. За работата на двигателя в режим на празен ход изобразяващите вектори на токовете по координатите α и β и на статорния ток $\boldsymbol{i}_S$ са показани на Фиг.10, а ходографа на вектора на статорния ток на фиг.11. От кривата на изобразяващия вектор $\boldsymbol{i}_S$ коефициентът на несинусоидалност на токовете се определя като

$$k_i = \frac{i_{S\max}}{i_{S\min}}.100\% \qquad (9)$$

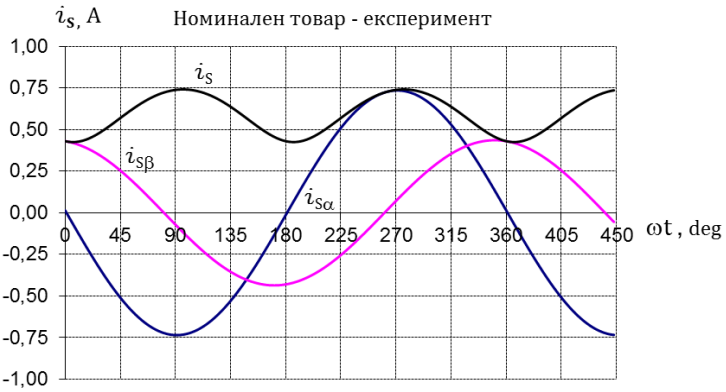
и при празен ход стойността му е k_i=20,56 %.

За работа с номинално натоварване експерименталните резултати са изобразени съответно на фиг.12 и фиг.13 и коефициентът на несинусоидалност на токовете е k_i=27,1 %.



Фиг.10. Изобразяващи вектори при празен ход (резистори 100 Ω)

Фиг.11. Елиптично магн. поле при празен ход (резистори 100 Ω)



Фиг.12. Изобразяващи вектори при номинален товар (резистори 100 Ω)

Фиг.13. Елиптично магн. поле при номинален товар (резистори 100 Ω)

5. Заключение

Междунавивковото късо съединение е повреда, която в началния стадий на възникване обикновено обхваща малък контур, причинява слабо увеличаване на тока в захранващите проводници и трудно може да бъде установена. Разгледаният в работата подход се основава на анализиране на несиметрията предизвикана от късото съединение и появата на токове с обратна последователност. Изчислителният модел, разработен по този подход, позволява анализ на изправността на намотките на асинхронните двигатели при всички режими на работа. Проведените аналитични и експериментални изследвания показват, че мониторингът на фазните токове на трифазната намотка дава възможност да се диагностицира междунавивково късо съединение или друга вътрешнонамотъчна неизправност по нарастване на коефициента на несиметрия, а по стойността му да се оценява степента на повредата.

Литература

[1] Nandi, S., H. A. Toliyat, and L. Xiaodong, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - a review, *IEEE Transactions on Energy Conversion,* Vol. 20, December 2005, pp. 719-729.

[2] Thomson, W. T. A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors – past, present and future, *2-nd IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives – SDEMPED'99,* Gijon, Spain, 1999, pp. 3-17.

[3] Amirat Y., Benbouzid M.E.H., Al-Ahmar E., Bensaker B, Turri S. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), pp. 2629-2636.

[4] Lu Q., T. Breikin, H. Wang. Modelling and Fault Diagnosis of Stator Inter-Turn Short Circuit in Doubly Fed Induction Generators. *18th IFAC World Congress*, Milano (Italy), August 28 - September 2, 2011, pp. 1013-1018.

[5] Важнов, А. И. Электрические машины., Л., Энергия, 1968.

[6] Динов, В. Р. Несиметрични режими и преходни процеси в електрическите машини, С., Техника, 1974.

[7] Божилов Г. Й. Преходни процеси и обобщена теория на електрическите машини, С., Изд. на ТУ-София, 2007.

Автори: инж. Георги Тодоров, доц. д-р, катедра "Електричеки машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *gtto@tu-sofia.bg*; инж. Ганчо Божилов – проф. д.т.н., катедра "Електричеки машини", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *gjboj@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент**: гл. ас. д-р Адриан Иванов

СРЕДСТВА ЗА КОМПЕНСИРАНЕ НА КАПАЦИТИВНА МОЩНОСТ - ЧАСТ 1

Даниел Добрилов

Резюме: *В настоящата статия се разглежда възможността за плавно регулиране на индуктивната мощност на шунтови реактори, без да се използват полупроводникови прибори в силовата част на компенсатора. Направено е предложение за регулиране на реактивната мощност чрез използване на принципа на работа на дроселите с подмагнитване, съвместно с цифрова система за управление. Описан е разработен модел за изследване режимите на работа на плавно регулируеми шунтови реактори.*

Ключови думи: *шунтов реактор, управлениение на реактивната мощност*

MEANS OF REACTIVE POWER COMPENSATION - PART 1

Daniel Dobrilov

Abstract: *In this paper, it is investigated a new possibility for reactive power compensation. The approach achieves a linearly controlled reactive compensation delivered by shunt reactors without the use of semi-conductor elements on the power side of the reactor. The paper suggests a way regulating the reactive power output by adding additional magnetisation to the main magnetic core of the shunt reactor, working in combination with digital control system. Furthermore, it is delivered a model investigating the operational modes of shunt reactors having linearly controlled reactive power output.*

Key words: *shunt reactor, controlled reactive power*

1. Необходимост и цели

След въвеждане на изискването, да се заплаща не само консумираната, но и отдадената реактивна енергия от потребителите с присъединена мощност по-голяма от 100kW [1], започнаха да се монтират компенсатори за реактивна капацитивна енергия. Предвид огромната разлика в цената на статичните компенсатори (STATCOM) и шунтовите реактори (ШР), може да се каже, че у нас изцяло се използват вторите и в близко бъдеще няма изгледи промяна на баланса, освен при специални обстоятелства. Те имат редица предимства, но и един основен недостатък, а именно липсата на възможност за плавно регулиране на консумираната капацитивна мощност. Този недостатък, на този етап се отстранява, чрез

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

ISSN 1311-0829

комплектна кондензаторна (ККУ) уредба монтирана в разпределителната уредба с реактора. По този начин чрез регулиране на мощността на ККУ, индиректно се извършва регулиране на шунтовия реактор. В тази ситуация ШР работи постоянно на номинална мощност, при което постоянно се генерират загуби на активна енергия от него и от ККУ.

Изброените по-горе и в [5] начини за регулиране на реактивната мощност не дават достатъчно добри технико-икономически резултати. В настоящата статия ще бъде разгледана възможност за плавно управление на мощността на ШР, без да се използват полупроводникови прибори в силовата част на съоръжението. За реализиране на управлението ще бъде използван отдавна познатия принцип, при които чрез управление на магнитното състояние на магнитопровода се осъществява регулиране на електрически сигнали. Към настоящата статия е разработен и изследван физически стенд с цифрово управление, в реално време на мощността на използвания шунтов реактор.

2. Управляеми шунтови реактори

За да се компенсира генерираната капацитивна енергия от кабелни мрежи средно напрежение, обикновено се използват неуправляеми ШР с мощност малко по-голяма от тази на електропроводната линия [3]. Предвид различната дължина на електропроводите, които трябва да бъдат компенсирани, шунтовите реактори се произвеждат по-поръчка, за всеки конкретен обект, от стандартни размери електротехническа ламарина и различна намотка. Трябва да се отбележи, че в чужбина се произвеждат стандартни гами мощности от ШР средно напрежение, но за големи единични мощности, които не са приложими в нашите условия на този етап.
На фиг.1 е показан неуправляем шунтов реактор с мощност 320/125 kVAr. Показания реактор има възможност за регулиране на мощността на стъпално само на две степени, чрез подаване на захранващото напрежение в различни точки на намотката (всяка намотка има по-три изведени края).

Липсата на технически ефективно и икономически изгодно решение за регулиране на консумираната мощност от шунтови реактори за компенсиране на кабелни линии средно напрежение, води до търсене на нестандартни решения.

Едно от тях е използването на нелинейния характер на кривата на намагнитване на елктротехническата ламарина. Ако освен променливо токовата, върху магнитопровода се навие още една намотка, на която може да се подава постоянен ток, то чрез подмагнитване на магнитопровода, чрез "постоянното" магнитно поле се променя, стойността на магнитния поток $\boldsymbol{\Phi}$. Предвид че сечението на магнитната система е const, се променя и магнитната индукция $\boldsymbol{B}$, в следствие на което, се променят напрегнатостта на магнитното поле $\boldsymbol{H}$ и магнитната проницаемост $\boldsymbol{\mu}$ на ламарината

Фиг.1

По този начин чрез регулиране на тока в постоянно токовата намотка ***Iy*** се регулира и тока в променливо токовата, респективно и мощността му.
Трябва да се отчете и факта, че за компенсиране на кабелни линии средно напрежение задължително съоръжението се оразмерява спрямо максималната мощност на електропровода. При на което съответната магнитна система, трябва да работи с номиналната стойност на индукцията, за която е проектиран компенсатора. Ако се използва управляем реактор, той ще работи с номиналната стойност на индукцията, само и единствено в режим на максимална мощност. За да се регулира мощността му трябва да се намали, магнитния поток, респективно, индукцията в магнитопровода му. А както е добре известно загубите на активна мощност са в квадратична зависимост от индукцията в магнитната система. Предвид факта, че в управляващата намотка се подава не постоянно, а изправено напрежение, за загубите в магнитопровода може да се запише следната формула [4].

$$P_e = p_{1/50} \cdot B_m^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot k_д \cdot G, \quad \text{W} \quad (1)$$

където:

$p_{1/50}$ – специфични загуби при 1T и $50Hz$

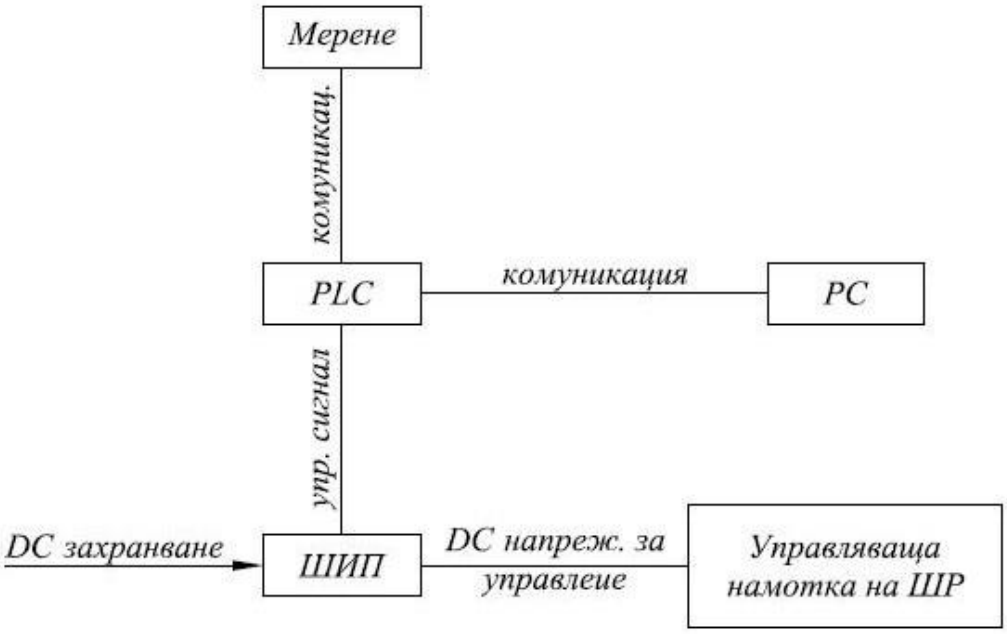
B – индукция в магнитопровода, T

f – честота, Hz

$k_д$ – добавъчен коефициент чрез който се отчитат загубите при обработка на ламарината (1,3÷4, зависи от назъбеността на контура, за магнитопроводи на трансформатори се приема мин. стойност)

G – маса на магнитопровода, kg

Друго много положително качество на разглежданата система е цената. При шунтов реактор със силова и управляваща намотка, съвместно с цифрова система за управление може да се извърши регулиране на реактивната мощност в широки граници, на много по-ниска цена в сравнение със СТАТКОМ.



Фиг.2

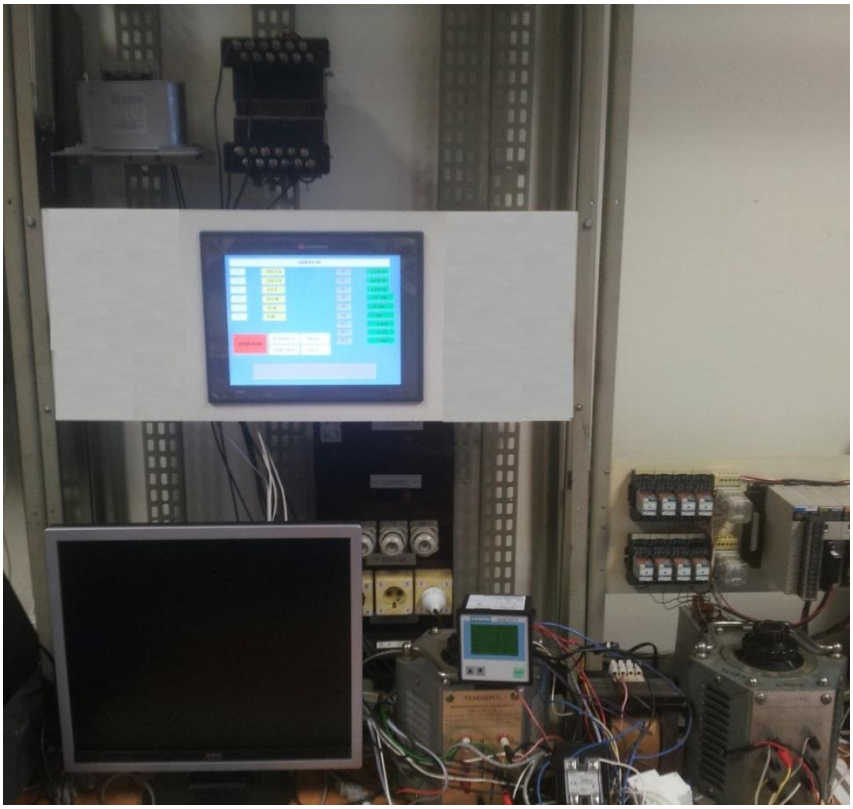
На фиг.2 е показана примерна структурна схема за управление на управляем шунтов реактор. Тя е съставена от блок „мерене“, чрез който се измерват параметрите в точката на присъединяване на потребителя. По комуникационен канал, данните се предават на програмируем логически контролер, който чрез заложеният му алгоритъм за управление генерира управляващ сигнал (ШИМ). Сигналът постъпва в усилвателен блок (ШИП). Предложената цифровата система за управление дава възможност за много гъвкаво и бързо управление реактора.

3. Лабораторен модел

Липсата на управляеми шунтови реактори у нас и какъвто и да било опит от управление или експлоатация на подобни съоръжения, доведе до необходимостта на създаване на лабораторен стенд, върху който да бъдат направени изследвания на съоръжението заедно със системата му за управление.

Разработен е лабораторен стенд (фиг.3) с управляем шунтов реактор и цифрова система за управление. За изменение на реактивния ток на шината се използва силов трансформатор свързан през автотрансформатор (АТ), така че регулирайки напрежението на АТ, се регулира консумираната реактивна мощност в широки граници. За активен товар се използват реостати.
Силовата намотка на реактора е свързана на мрежово напрежение. За управление на съоръжението се управлява по показаната на фиг.2 схема. Мощността на шина (изхода към мрежата) се измерва с цифров измервателен уред, по ко-

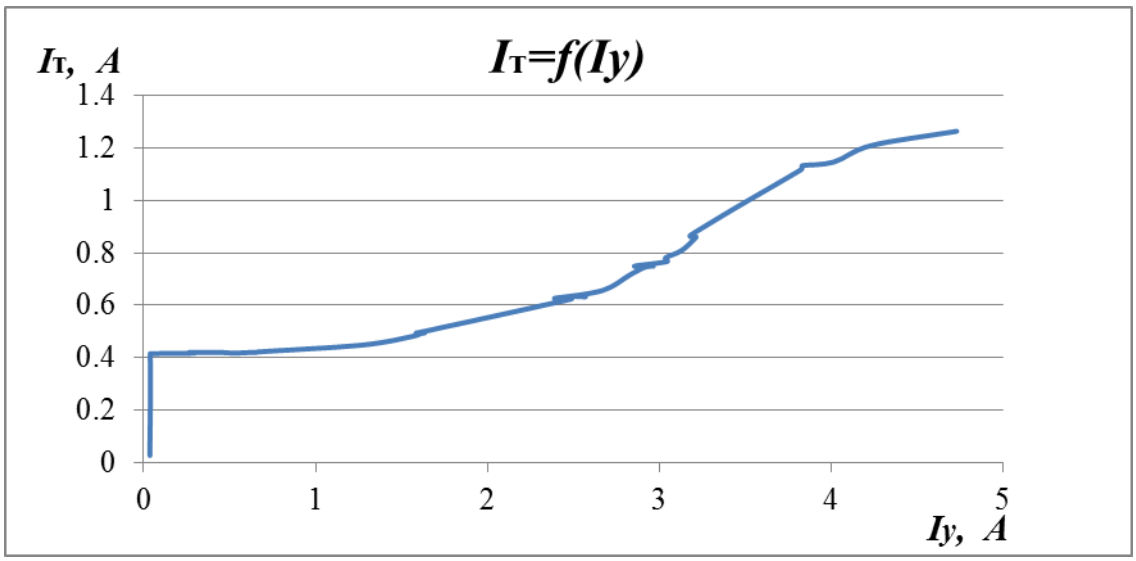
муникационен интерфейс RS485, измерените данни се предават на програмируем логически контролер. В контролера има заложен алгоритъм за управление (използва се ПИ регулатор), който регулира по-отклонението на фактора на мощността, с настройка 0,92. В зависимост от стойността на фактора на мощността, високоскоростен изход на контролера генерира PWM сигнал, който управлява полупроводников ключ. Чрез него се регулира стойността управляващия изправен ток, респективно консумираната реактивна мощност от компенсатора.



Фиг.3

Разработената система за управление, дава възможност да записват измерените данни в паметта на контролера. Те могат да бъдат изтеглени на персонален компютър в *xlsx формат.

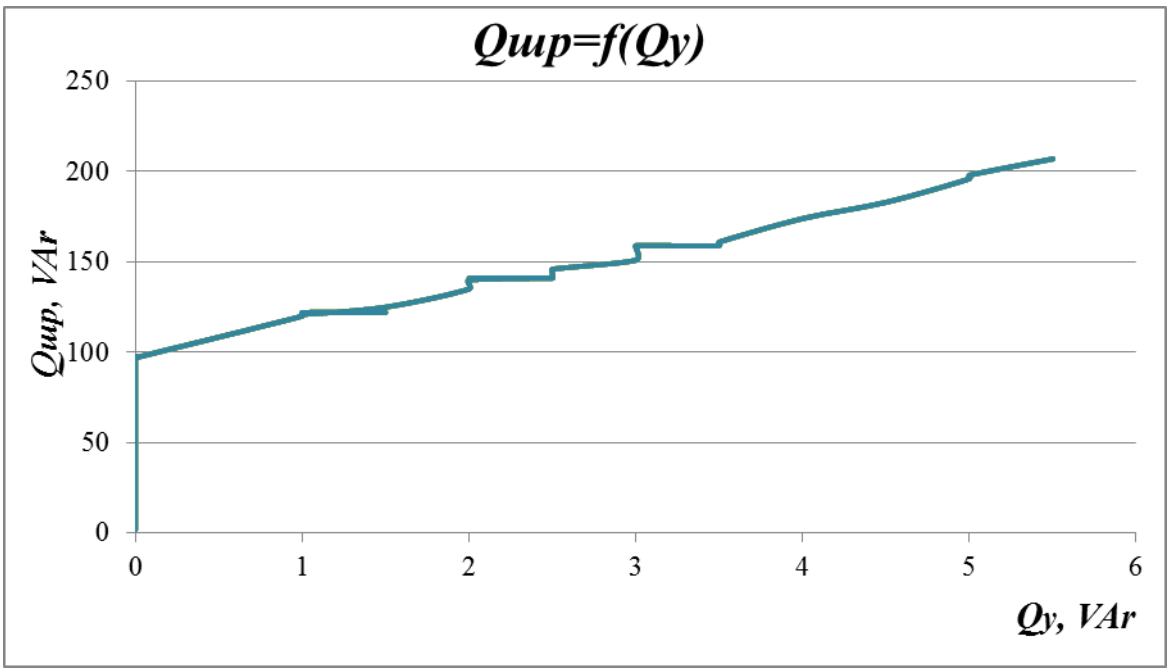
На фиг.4 е показана запис на зависимостта на товарния ток спрямо управляващия. Както се вижда от графиката, при стойности близки до нула, управляващия ток не влияе на товарния. Това е токът който протича през силовата намотка при липса на управление. След което зависимостта следва кривата на намагнитване на материала, $B=f(H)$.



Фиг. 4

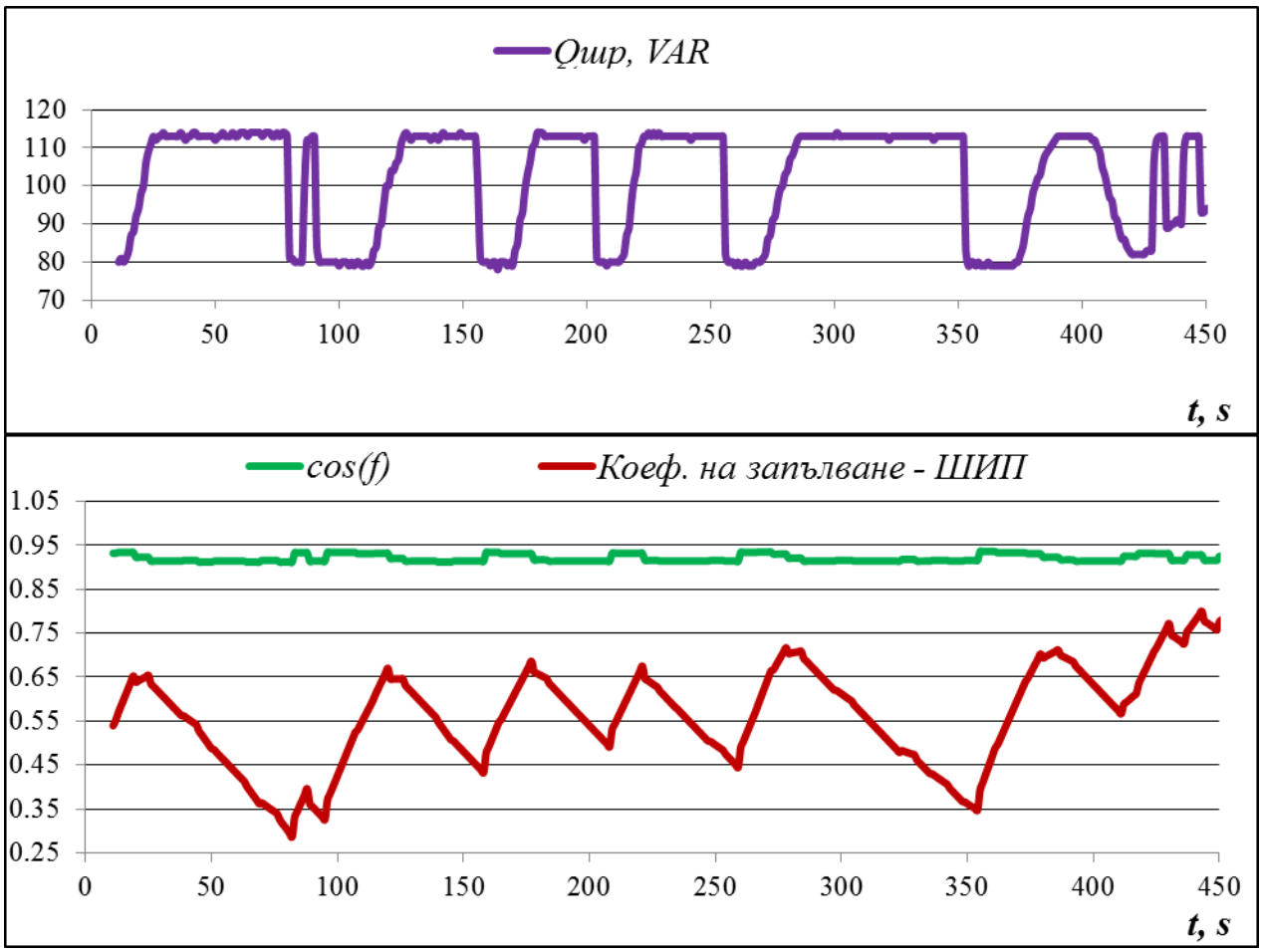
Изследвания лабораторен модел дава възможност за регулиране на реактивната мощност в много широки граници (фиг. 5). По-важното е че регулиращата мощност е практически чисто реактивна. Тя е под 3% от мощността на компенсатора. За сравнение регулиращата мощност (на възбуждането) на синхронен генератор с мощност около 1 MVA е около 2%.

Освен това параметрите на управляем компенсатор със сигурност могат да бъдат подобрени, предвид факта че това е първото подобно съоръжение за компенсация на реактивна мощност изследвано у нас.



Фиг.5

На фиг.6 са показани изменението на коефициента на запълване на ШИП във времето, респективно мощността на компенсатора от фактора на мощността, в точката на присъединяване.



Фиг.6

В следващата част на настоящия доклад ще бъде изследвано хармоничното замърсяване на мрежата от компенсатора и начините за намаляването му в допустимите граници.

4. Изводи и препоръки

Основните предимства на предлаганият вариант за компенсиране са следните:

1. Възможност за регулиране в широки граници на консумираната индуктивна мощност.
2. В пъти по-ниска цена в сравнение със СТАТКОМ.
3. Намаляване на активните загуби на енергия, при един и същ регулиращ ефект, спрямо възможността за компенсация с шунтов реактор и ККУ.
4. И най-голямото предимство, е че тези съоръжения могат да бъдат произвеждани у нас, във всеки един бобинажен цех. При което няма да се налага закупуване на СТАТКОМ, от чужди производители на безумно високи цени и нашите капитали да изтичат зад граница.

Разработения стенд работи много добре. Дори и при скокообразни изменения на мощността в широки граници cos f, не спада под 0,9. Резултатите от процеса на регулиране на реактивната мощност са отлични.

Литература

[1] Наредба № 1 от 18 март 2013 г. за регулиране на цените на електрическата енергия, обн. ДВ. бр.33 от 5 април 2013г.

[2] Долгополов А., Шунтирующие реакторы управляемые подмагничиванием, Новости ЭлектроТехники № 4(64), 2010 г.

[3] Добрилов Д., А. Цолов, Особености при компенсиране на генерираната капацитивна енергия от кабелни линии средно напрежение, Списание Енергетика бр. 3, 2013 г.

[4] Клисаров М., Г. Клисаров, Наръчник на електротехника, С., Техника, 1969 г.

[5] Георгиев В., и др., Компенсатор на знакопроменливи реактивни товари, Годишник на ТУ – София, том 60, кн. 1, 2010 г

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

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. Вълчан Георгиев

СЪПОСТАВКА НА ПОДХОДИ ЗА РЕЗЕРВИРАНЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА ЗАЩИТА

Димитър Богданов

Резюме: *При възникване повреди, системите за защита е възможно да бъдат в състояние което да не ппозволява да изпълняват функциите за кото са предназначени. Разглеждат се два възможни варианта за състояниея на повредаа: незаработване при необходимост (условно режим на отказ тип "1") и подаване на погрешна (излишна) команда за изключване (условно режим на отказ тип "2"). Типичният подход за резервиране на системи за защита е монтиране на защитни ссистеми в паралел "дублиране". Обект на аналаиз е целесъобразността на този метод за близко резервиране. Оценени са други възможни схеми за резервиране, в зависимост от вероятностите за възникване на откази от "тип 1" и "тип 2".*

Ключови думи: *системи за защита, резервиране, откази*

COMPARISON OF APPROACHES FOR REDUNDANT DESIGN IN PROTECTION SCHEMES

Dimitar Bogdanov

Abstract: *In result of failures, the protection systems can fail to perform their design functions. They can fail to operate (to initiate trip command) when necessary (failure mode "type 1") or to maloperate – respond in erroneous way to initiate incorrect tripping or other unnecessary commutation operation (failure mode "type 2"). The typical approach for redundant design is to install systems for protection in parallel. It is subject of analysis when such approach is appropriate and what number of parallel systems is optimal. Calculation model can be created on the basis of the reliability data to estimate which system is optimal. The presented calculation approach is based on the probabilities for failures" type 1" and "type 2".*

Key words: *protection systems, redundancy*

1. Въведение: Обобщение на някои основни положения свързани с надеждността на система за защита

Основните принципи за оценката на работата на система за защита могат да бъдат дефинирани както е показано в табл.1. От посочените в табл.1 типове възможни неправилни действия, може да бъде направено известно обобщение: Ако се разгледат последствията, които биха могли да настъпят от гледна точка на

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

ISSN 1311-0829

възможността за риск от жертви и нараняване на персонала, то типове I и IV могат да бъдат обобщени като група откази с повишена опасност спрямо типове II и III.

Табл.1

Вид и място на повредата	**Правилно действие**	**Неправилно действие**	**Тип**
К.с. в зоната на действие на защитата	Заработване	Отказ на заработване / *Заработване със закъснение*	*I*
К.с. извън зоната на действие на защитата	Незаработване (*Заработване със закъснение, ако защитата изпълнява функции на далечно резервиране*)	Излишно (погрешно) заработване (*Защитата не изпълнява резервиращата си функция, ако има такава*)	*II*
Липса на повреда	Незаработване	Лъжливо заработване	*III*
Липса на повреда	*Незаработване*	*Блокиране на защитното у-во* *Вътрешна повреда водеща до самоблокиране на защитата и не функционалност при необходимост в следващ момент*	*IV*

Особеността на повреди от тип IV е възможността за оповестяване наличието на вътрешна повреда при микропроцесорните устройства за защита, като по този начин могат да бъдат предприети съответните мерки и да бъдат ограничени неблагоприятните последствия. Може да бъдат посочени 3 основни възможни режима на работа на системите за защита:

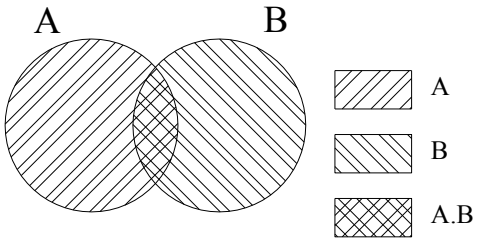
- Нормален режим на работа. Релейната защита заработва своевременно и селективно при повреди в защитаваната от нея зона и заработва със съответните закъснения или не заработва при външни повреди (Отсъстват неправилни действия от тип I, II, II и IV съгласно табл. 1).
- Режим на отказ “тип 1”. Защитата не заработва при повреди в защитаваната зоната. Този режим може да се нарече “Незаработване” (Неправилни действия от тип I и IV съгласно табл. 1).
- Режим на отказ “тип 2”. Защитата заработва излишно, без да има повреда или при външни повреди, при които не следва да заработва. Този режим може да се нарече “Грешно заработване” (Неправилни действия от тип II и III съгласно табл. 1).

Кой от двата режима може да бъде разгледан като “опасен” зависи от конкретното приложение. Режимът на отказ 1 в класическите приложения на системите за защита е “опасен” и режим на отказ 2 може да бъде разгледан като “безопасен”, с известни условности. При погрешно заработване на системата за защита на претоварен електропровод или системна подстанция последствията за ЕЕС може да бъдат много сериозни. В такъв случай режим на отказ 2 води до неблагоприятни последствия - до финансови загуби от непроизводство на ел. енергия,

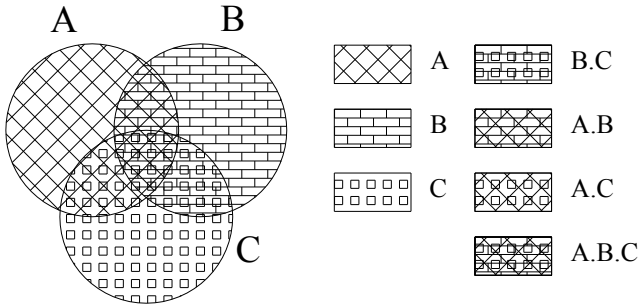
смущения в ЕЕС, но тъй като режим на отказ 1 може да доведе до разрастване на повредата и продължителен престой за ремонт на съоръжения, както и за създаване на опасност за персонала, се счита че именно той е по-неблагоприятен.

В определени специфични случаи режим 2 може да бъде по-опасен не само от икономическа, но и от технологична гледна точка. Такъв е случаят при релейните защити на ДГА за надеждно захранване на системите за безопасност на блокове в АЕЦ. Най честият подход за резервиране на системите за защита е монтирането на два, взаимно резервиращи се комплекта устройства.

За избор на оптимална конфигурация на системата за защита следва да бъде анализирана логиката на комбиниране на двете системи за защита (на двете взаимно резервиращи се групи защити) на главна схема.

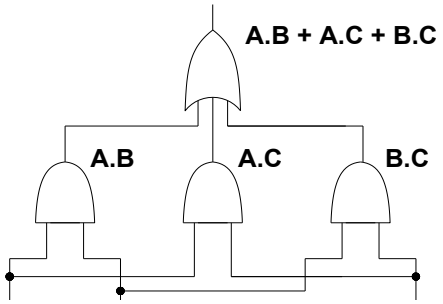


Фиг.1



Фиг.2

С оглед на това, че вероятностите за откази на системите, работещи в паралел (логика на изходите "ИЛИ") или комбинирани в някаква друга логика на изходните сигнали ("И", "2от3) не са взаимно изключващи се, то за множествата на откази характеризиращи системите, може да се направи графично представяне както следва: За логика "И" и "ИЛИ" посредством фиг.1, за логика "2 от 3" посредством фиг.2.



Фиг.3

За графичното представяне и за логиката, която ще бъде използвана, е прието че системите, комбинирани в определена логика са еднакви, като системите помежду си имат равни стойности съответно за q_1 и q_2, без да се прави допускане че $q_1 = q_2$. Физически логика на обединяване на изходните сигнали на 3 еднакви системи в логика "2 от 3" може да бъде представена със схемата на фиг.3.

Обобщение на вероятностите за откази от тип 1 или тип 2 е представено в табл. 2. От посочените в табл. 2 изрази за надеждността на 3 различни схеми на

свързване може да се направи изводът, че в апаратно отношение схема “2 от 3” при $q_1=q_2$ е с еднаква надеждност по отношение вероятността за проявяване на откази Тип 1 и Тип 2.

За вероятността за настъпване на отказ да заработи (отказ “тип 1”) може да се запише:

$$F_{1(2om3)} = A.B + B.C + C.A - 2(A.B.C) \qquad (1)$$

С оглед това, че системите са еднакви, като A = B = C = q_1, може да се запише:

$$F_{1(2om3)} = 3q_1^{\,2} - 2q_1^{\,3} \qquad (2)$$

или преобразувано:

$$F_{1(2om3)} = q_1^{\,2}(3 - 2q_1) \qquad (3)$$

По аналогичен начин за “2 от 3” за отказ от тип 2 може да се изведе и зависимостта:

$$F_{2(2om3)} = q_2^{\,2}(3 - 2q_2) \qquad (4)$$

За графично представяне на зависимостите от табл.2 са построени графиките представени на фиг.4. Те са построени за $q_1=q_2$, $q_1=10.q_2$ и $10.q_1=q_2$. За да бъдат построени на обща координатна система, за всяка точка от кривите за 3-те случая по оста “x” стойността съответства на q_1+q_2, т.е. представени са три варианта на всяка схема на свързване, за които сумарната вероятност за възникване на откази от “тип 1” и “тип 2” е равна, но разпределението на дяла на q_1 и q_2 в общата вероятност за отказ е различно.

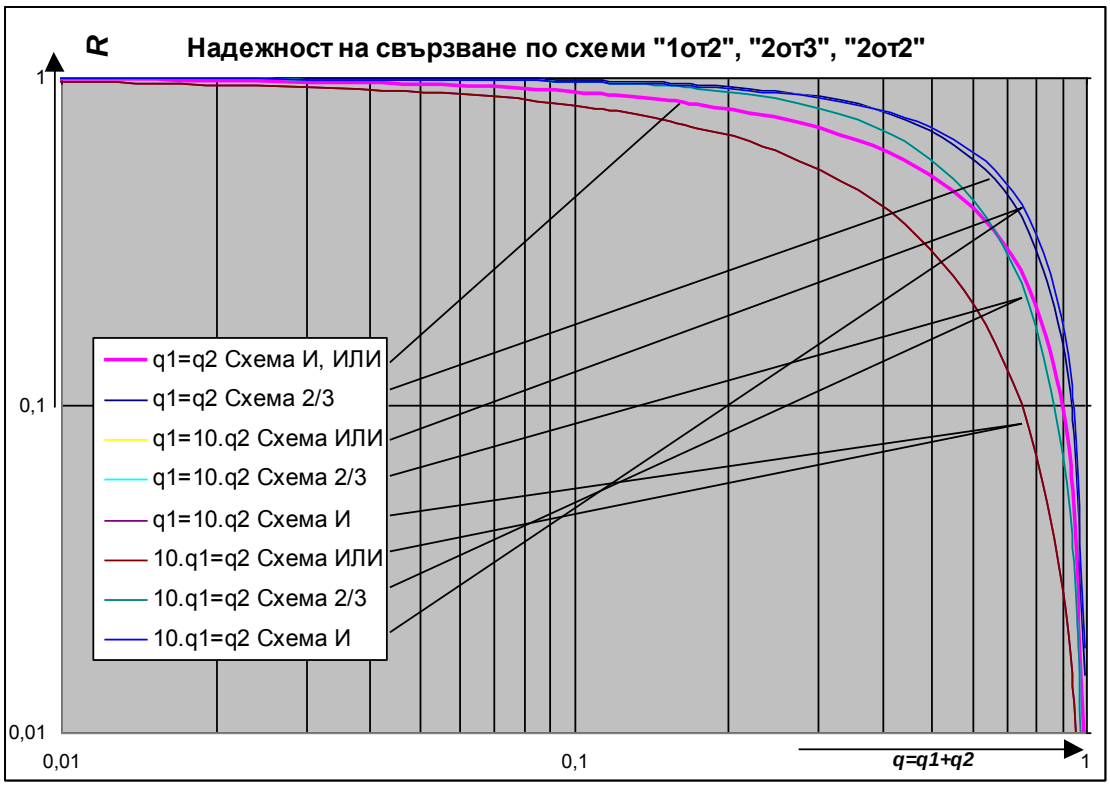
Стойности от изчисленията направени за построяване на кривите от фиг. 4 са представени в табл.3. В първите две колони са представени стойностите на q1 и q2, като за случая на равни вероятности за откази за тип 1 и тип 2 е изчислена стойност (q1 + q2)/2, която е използвана за изчисляване на общата надеждност и е заместена за q1 и q2 във формулите.

Табл.2

Тип отказ	Логика на комбиниране		
	ИЛИ (1 от 2)	**2/3**	**И (2 от 2)**
F_1	$q_1^{\,2}$	$3q_1^{\,2} - 2q_1^{\,3}$	$2q_1 - q_1^{\,2}$
F_2	$2q_2 - q_2^{\,2}$	$3q_2^{\,2} - 2q_2^{\,3}$	$q_2^{\,2}$
$R=1-(F_1+F_2)$	$R = (1-q_2)^2 - q_1^{\,2}$	$R = 1 - 3q_1^{\,2} + 2q_1^{\,3} - 3q_2^{\,2} + 2q_2^{\,3}$	$R = (1-q_1)^2 - q_2^{\,2}$

От резултатите от изчисленията и от графичното представяне се получава припокриване на случаите:

- за схема “И” (2от2) при $q_1=10.q_2$ и схема “ИЛИ” (1от2) при $10.q_1=q_2$;
- за схема “И” (2от2) при $10.q_1=q_2$ и схема “ИЛИ” (1от2) при $q_1=10.q_2$;
- за схема “2/3” при $q_1=10.q_2$ и схема “2/3” при $10.q_1=q_2$.



Фиг. 4

Въз основа на получените резултати се счита, че изборът на схема “ИЛИ” (1 от 2) е оптимален за системата за защита на главна схема, при съотношение $q_1=10.q_2$. Кривата за този случай е най- високо разположена спрямо останалите. От практическа гледна точка, в такъв случай на свързване се намалява максимално вероятността за незаработване на резервираната система за защита.

Табл.3.

				$q_1 = q_2$		$q_1 = 10.q_2$			$10.q_1 = q_2$		
q_1 , q_2 или q_2 , q_1		$(q_1 + q_2)/2$	$q_2 + q_1$	“1от2”	“2от3”	“1от2”	“2от3”	“2от2”	“1от2”	“2от3”	“2от2”
0,9	0,09	0,495	0,99	0,01	0,0149995	0,0181	0,005158	0,0019	0,0019	0,005158	0,0181
0,8	0,08	0,44	0,88	0,12	0,179136	0,2064	0,085824	0,0336	0,0336	0,085824	0,2064
0,7	0,07	0,385	0,77	0,23	0,3389165	0,3749	0,201986	0,0851	0,0851	0,201986	0,3749
0,6	0,06	0,33	0,66	0,34	0,490348	0,5236	0,341632	0,1564	0,1564	0,341632	0,5236
0,5	0,05	0,275	0,55	0,45	0,6294375	0,6525	0,49275	0,2475	0,2475	0,49275	0,6525
0,4	0,04	0,22	0,44	0,56	0,752192	0,7616	0,643328	0,3584	0,3584	0,643328	0,7616
0,3	0,03	0,165	0,33	0,67	0,8546185	0,8509	0,781354	0,4891	0,4891	0,781354	0,8509
0,2	0,02	0,11	0,22	0,78	0,932724	0,9204	0,894816	0,6396	0,6396	0,894816	0,9204
0,1	0,01	0,055	0,11	0,89	0,9825155	0,9701	0,971702	0,8099	0,8099	0,971702	0,9701
0,05	0,005	0,0275	0,055	0,945	0,995545688	0,987525	0,99267525	0,902475	0,902475	0,99267525	0,987525
0,01	0,001	0,0055	0,011	0,989	0,999819166	0,997901	0,999699002	0,980099	0,980099	0,999699002	0,997901
5E-03	5E-04	0,00275	0,0055	0,9945	0,999954708	0,99897525	0,9999245	0,99002475	0,99002475	0,9999245	0,99897525
1E-03	1E-04	0,00055	0,0011	0,9989	0,999998186	0,99979901	0,999996972	0,99800099	0,99800099	0,999996972	0,99979901
5E-04	5E-05	0,000275	0,00055	0,99945	0,999999546	0,999899753	0,999999243	0,999000248	0,999000248	0,999999243	0,999899753
1E-04	1E-05	0,000055	0,00011	0,99989	0,999999982	0,99997999	0,99999997	0,99980001	0,99980001	0,99999997	0,99997999
5E-05	5E-06	2,75E-05	0,000055	0,999945	0,999999995	0,999989998	0,999999992	0,999900002	0,999900002	0,999999992	0,999989998
1E-05	1E-06	5,5E-06	0,000011	0,999989	1	0,999998	1	0,99998	0,99998	1	0,999998
5E-06	5E-07	2,75E-06	5,5E-06	0,9999945	1	0,999999	1	0,99999	0,99999	1	0,999999
1E-06	1E-07	5,5E-07	1,1E-06	0,9999989	1	0,9999998	1	0,999998	0,999998	1	0,9999998
5E-07	5E-08	2,75E-07	5,5E-07	0,99999945	1	0,9999999	1	0,999999	0,999999	1	0,9999999
1E-07	1E-08	5,5E-08	1,1E-07	0,99999989	1	0,99999998	1	0,9999998	0,9999998	1	0,99999998
5E-08	5E-09	2,75E-08	5,5E-08	0,999999945	1	0,99999999	1	0,9999999	0,9999999	1	0,99999999
1E-08	1E-09	5,5E-09	1,1E-08	0,999999989	1	0,999999998	1	0,99999998	0,99999998	1	0,999999998
5E-09	5E-10	2,75E-09	5,5E-09	0,999999995	1	0,999999999	1	0,99999999	0,99999999	1	0,999999999
1E-09	1E-10	5,5E-10	1,1E-09	0,999999999	1	1	1	0,999999998	0,999999998	1	1

Заключение

Резултатите от изчисленията и графичното представяне налагат извода, че при системи за защита с висока надеждност не е целесъобразно многократното резервиране. За системи, за които е в сила вероятността за незаработване – проя-

вяване на отказ тип 1 да бъде на порядък по-голяма от вероятността за погрешно заработване – проявяване на отказ тип 2, е целесъобразно да се предвидят 2 подсистеми работещи в паралел (под логика “ИЛИ”).
Практическият опит от експлоатацията на системи за защита показва, че при работа с електромеханични устройства вероятността за отказ “тип 2” е по-голяма от тази за “тип 1”, което обуславя нецелесъобразността да се монтират в паралел 2 електромеханични системи.
Представените изчисления обуславят необходимостта от монтиране на 2 резервиращи се по принципа на близкото резервиране (паралелни) подсистеми за защита, изпълнени с микропроцесорни устройства със самодиагностика и самоблокиране при вътрешна повреда.

Литература

[1] Anderson P. M. (1999) ***Power system protection***. New York, John Wiley & sons, 1999.
[2] Wierman T.E. и др. (2001) ***Reliability Study: Babcock & Wilcox reactor protection system***1984 – 1999. INEEL, Idaxo.
[3] Богданов Д. (2003) ***Повишаване надеждността на дизел-генераторните агрегати за аварийно захранване и техните защити като част от програмата за модернизация на блокове 5 и 6 на АЕЦ Козлодуй.*** Сборник доклади от форум на Булатом – 2003 (Издадени на електронен носител – CD).
[4] Богданов Д. (2007) ***Формиране на критерии за комплексна оценка на функционалността на система за релейна защита.*** Сборник доклади на Енергиен форум 2007, стр. 279-284.
[5] Малчев К., Д. Богданов. (2007) ***Модел на функционалната надеждност на релейните защити***. Сборник доклади от научна конференция CIELA 2007, стр. 77-83.
[6] Малчев К. (2009). ***Надеждност в енергетиката.*** Учебен курс по дисциплината, ТУ-София, 2009.
[7] Богданов Д. (2008) ***Модел за оценка влиянието на релейните защити върху надеждността на защитавания обект***. Сп. Енергетика, N8/2008, стр. 42-46.
[8] Богданов Д. (2008) ***Модел за оценка влиянието на система за релейна защита върху надеждността на работа на агрегат за резервно захранване.*** сп. “Енергетика” – бр. 1/2 2010, стр. 50 – 54.
[9] Д. Богданов. (2011) ***Оценка на резервирането на системи за защита***. Сборник доклади на Енергиен Форум 2011.
[10] Д. Богданов. V. Terzija. (2011) ***Модел за надеждност на система за релейна защита***. Сборник доклади от конференция на PAC World 2011, Dublin, Ireland /издадени на CD/.

Автор: доц. д-р инж. Димитър Христов Богданов - катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *dbogdanov@tu-sofia.bg , dimitar_bogdanov@hotmail.com*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. К. Малчев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СВЕТЛОТЕХНИЧЕСКИТЕ ПАРАМЕТРИ И ЕНЕРГЕТИЧНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ НА LED ОСВЕТИТЕЛИ ЗА ВЪТРЕШНО ОСВЕТЛЕНИЕ

Димитър Матев, Валентин Гюров, Никола Македонски

Резюме: *В последните години LED осветителите намират все по-широко приложение във вътрешното осветление. Налагането им като основен източник на светлина е свързано с някои проблеми, породени от енергийната ефективност и съответствието със стандартите за електромагнитна съвместимост. Докладът разглежда изследване на светлотехнически и енергетични параметри на LED осветители и ретрофитни LED - източници на светлина. Получените експериментални зависимости отразяват естеството на проблематиката.*

Ключови думи: *Вътрешно осветление, LED, електромагнитна съвместимост*

STUDY ON LIGHTING PARAMETERS AND ENERGETIC INDEXES FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF LED LUMINAIRES FOR INDOOR LIGHTING

Dimitar Matev, Valentin Gyurov, Nikola Makedonski

Abstract: *In recent years, LED luminaires are becoming more widely used in interior lighting. Imposing them as the main light source is associated with some problems caused by energy efficiency and compliance with standards for electromagnetic compatibility. Paper examines lighting and energetic parameters of LED luminaires and retrofit LED sources. Received experimental dependences reflect the nature of the problems.*

Keywords: *Indoor lighting, LED, electromagnetic compatibility*

1. Въведение

Приложението на светлодиодните източници на светлина (LED) е свързано с тяхната светлотехническа и енергийна ефективност, начални капиталовложения и срок на възвръщаемост на инвестицията, в съответствие с нормативната база. Темата за масово внедряване на LED изделията в някои аспекти е преекспонирана. Водещите фирми от световен и европейски мащаб вложиха значителни средства и усилия, вследствие на което на пазара се появиха изделия с много добри технико-икономически показатели. Наред с това, отворилата се пазарна

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

ISSN 1311-0829

ниша, съпроводена с търсенето на по-ниски ценови решения, които по-лесно да заемат пазарен дял, доведе до бурно развитие на бранш, базиращ се на пълни или частични разработки, ползващи опростени схемни решения и евтина елементна база, а това поставя съществени въпроси за ефективността и съответствието с нормативните изисквания.

В настоящата разработка е показано изследване на гама нискоценови осветители и ретрофитни източници на светлина за вътрешно осветление, базирани на LED, като е акцентирано върху съответствието на изделията със стандартите за електромагнитна съвместимост (EMC) - БДС EN 61000-3-2:2006+A1:2009+A2: 2009. Настоящата разработка има за цел не толкова доказване на съответствие на определени изделия със стандарта, колкото - установяване на определени тенденции, произтичащи от проведения експеримент.

2. Изисквания за EMC по стандарт БДС EN 61000-3-2:2006

В съответствие със стандарта, осветителите за вътрешно осветление се причисляват към клас C. В зависимост от номиналната им мощност, се делят на две групи [1]:

1. Осветители с мощност 25W или по-голяма. При тях стойностите на хармоничните токове не трябва да превишават нормативните от табл.1 (таблица за клас C). Изключение са нажежаемите лампи, управлявани от електронни димери;
2. Оцветители с мощност по-малка от 25W. При тях трябва да бъде удовлетворено **поне едно** от двете условия:
    - Стойностите на хармоничните токове не трябва да превишават нормативните от табл.2, колона 2 (таблица за клас D);
    - Трети хармоник на тока, изразен в проценти спрямо фундаменталния хармоник, не трябва да превишава 86%. Пети хармоник на тока не трябва да превишава 61%. Формата на кривата на тока трябва да бъде такава, че да започва преди 60°, да има най-голям максимум (ако има няколко максимума) преди 65° и да не спира да протича преди 90°. Като отправна точка 0° е прието преминаването на напрежението през нулата (zero crossing).

Табл.1 Допустими нива за клас C

Номер на хармоника n	**Максимално допустима стойност на хармоничният ток, изразен в проценти спрямо основния хармоник** [%]
2	2
3	30. λ*
5	10
7	7
9	5
13≤n≤39 (само нечетни)	3
*λ фактор на мощността	

Табл.2 Допустими нива за клас D

Номер на хармоника n	**Максимално допустим хармоничен ток за ват** [mA/W]	**Максимално допустим хармоничен ток** [A]
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13≤n≤39 (само нечетни)	3,85/n	от табл. за клас A (виж стандарта)

3. Експериментално изследване

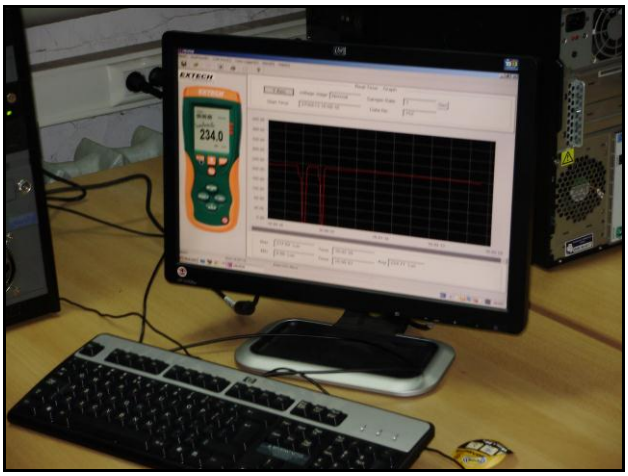
3.1. Обект на изследването

Обект на изследването са гама LED осветители и ретрофитни LED – източници на светлина за вътрешно осветление. Информация за моделите и производителите не е посочена, тъй като това може да повлияе върху търговската дейност. Избрани са тринадесет изделия от различен вид и с различна мощност (панели за вграждане в окачен таван, прожектори, ретрофитни източници за замяна на ЛЛНН и др.).

3.2. Измервателна апаратура

Изискванията за схемата на измерване и техническите характеристики на измервателните средства са представени в стандарта. Тъй като в случая се цели едновременно изследване на енергетични показатели за EMC и светлотехнически показатели, то измерването е проведено в комбинация с интегрален фотометър на Ulbricht (фиг.1), снабден с луксметър с комуникация и софтуер за връзка с персонален компютър (фиг.2).

Фиг.1



Фиг.2

Основна измервателна апаратура за отчитане на енергетични показатели:

- ABB Power Plus Meter + ABB Power T&D Software, class 0,1(fundamental), 0,5 (total)

- Velleman Digital Oscilloscope PCS500

3.3. Практическо изследване

В съответствие с изискванията на стандарта, изследваните осветители (из-точници) са разделени на две групи - с мощност 25W или по-голяма и с мощност до 25W.

Група 1 (осветители с мощност над 25W)

Общи показатели

№	Осветител	Pn [W]	Ф [lm]	F [Hz]	U [V]	I [A]	PF [-]	P [W]	S [VA]	THD I [%]	к [lm/W]
1	LED панел 600/600	36	2136,11	50	230	0,16	0,96	35,53	37,11	10,6	59,34
2	LED панел 300/1200	40	2716,92	50	230	0,18	0,91	38,33	41,94	15,3	67,92
3	LED панел 300/1200 2R	40	2444,59	50	230	0,16	0,98	35,94	36,83	19,3	61,11

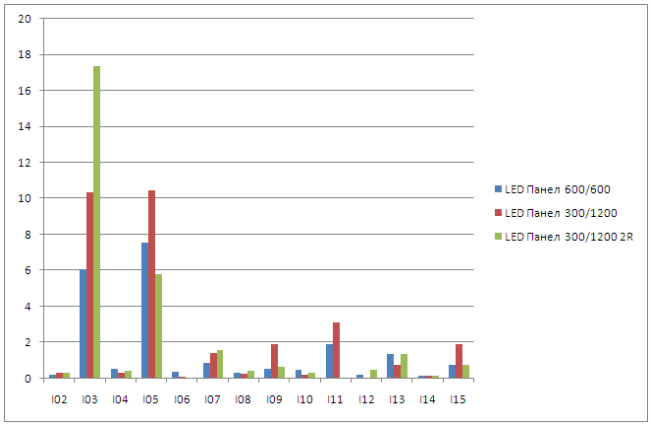
Хармоничен състав

№	I01	I02	I03	I04	I05	I06	I07	I08	I09	I10	I11	I12	I13	I14	I15
1	100	0,21	6,09	0,53	7,58	0,37	0,9	0,35	0,54	0,5	1,91	0,22	1,35	0,18	0,77
2	100	0,3	10,36	0,3	10,48	0,13	1,44	0,25	1,9	0,22	3,14	0,05	0,75	0,15	1,93
3	100	0,3	17,38	0,46	5,79	0,05	1,57	0,41	0,63	0,3	0,07	0,48	1,37	0,14	0,74

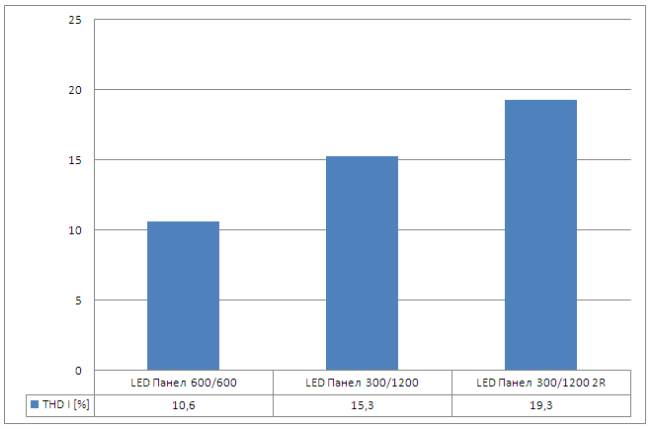
Нормата за трети хармоник се различава, тъй като $I3\% < 30.\lambda$ по стандарт (т.е. зависи от стойността на λ или PF). Въпреки че са налице високи нива за THD (по-високи от препоръчителната практика на IEEE 519), в зависимост от мощността, PF и нивото на индивидуалните хармоници е възможно изделията да удоволетворяват стандарта, тъй като изискванията са обвързани не само с абсолютните величини, а и с тяхната относителна тежест - енергетично въздействие. Изследваните изделия са с еднакъв диапазон на мощностите и са сравними.

Съответствие със стандарта

Осветител	LED Панел 600/600			LED Панел 300/1200			LED Панел 300/1200 2R		
n	%	Измерено	Статус	%	Измерено	Статус	%	Измерено	Статус
2	2	0,21	да	2	0,30	да	2,00	0,30	да
3	28,8	6,09	да	27,3	10,36	да	29,40	17,38	да
5	10	7,58	да	10	10,48	не	10,00	5,79	да
7	7	0,9	да	7	1,44	да	7,00	1,57	да
9	5	0,54	да	5	1,90	да	5,00	0,63	да
11≤n≤30	3	1,91	да	3	3,14	не	3,00	0,07	да



Фиг.3



Фиг.4

В случая, осветител който има по-нисък THD I (LED 300/1200) от друг (LED 300/1200 2R), не отговаря по изисквания за 5-ти и хармоници от висок ред. Отклоненията от стандартните стойности са малки (под 0,5%), т.е. това може да бъде отстранено чрез подобряване на схемното решение на LED - драйвера и толеранса на елементите.

Група 2 (осветители с мощност под 25W)

Подгрупа 2.1 (осветители №1 до №5)

Общи показатели

№	Осветител	Pn [W]	Ф [lm]	F [Hz]	U [V]	I [A]	PF [-]	P [W]	S [VA]	THD I [%]	к [lm/W]
1	LED прожектор 20W	20	1134.83	50	230	0.179	0.52	21.42	41.33	124	56.74
2	LED 3,5W GU10	3.5	250.58	50	230	0.030	0.48	3.15	6.53	97.5	71.59
3	LED 10W E27	10	421.79	49.96	230	0.049	0.57	7.20	12.65	127	42.18
4	913WH CuZn	3	177.48	50	230	0.030	0.53	3.67	6.92	129	59.16
5	LED 7X1W	7	445.72	49.96	230	0.060	0.55	7.30	13.29	130	63.67

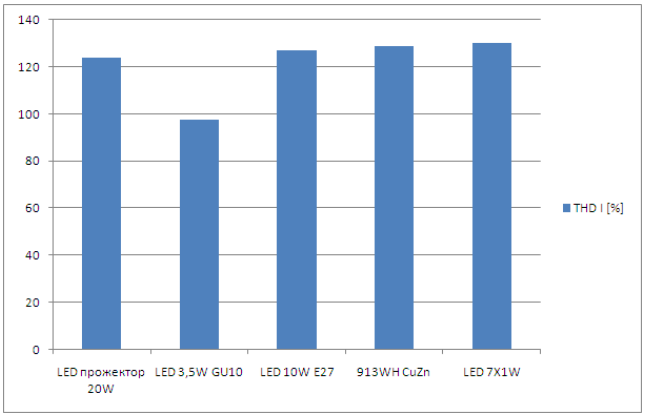
Хармоничен състав

№	I01	I02	I03	I04	I05	I06	I07	I08	I09	I10	I11	I12	I13	I14	I15
1	100	3.01	75.98	1.9	46.17	2.87	35.79	3.38	43.09	3.32	44.97	3.08	39.76	2.95	40.65
2	100	1.61	69.65	0.88	45.27	2.43	24.76	2.66	8.86	0.08	10.43	1.63	12.44	1.05	5.7
3	100	1.09	78.36	2.54	48.81	2.02	35.74	1.92	36.22	1.67	34.14	2.32	31.3	1.24	21.03
4	100	4.11	77.35	0.89	48.01	3.85	2.04	1.81	1.81	2.11	1	1.09	0.73	0.95	0.97
5	100	1.49	76.87	1.85	45.71	2.19	40.01	2.29	41.51	3.13	40.3	2.41	28.95	1.65	38.49

Съответствие със стандарта

Осветител		LED прож. 20W		LED 3,5W GU10		LED 10W E27		913WH CuZn		LED 7X1W	
n	max I/P [mA/W]	Измерено In/P [mA/W]	Статус	Измерено In/P [mA/W]	Статус	Измерено In/P [mA/W]	Статус	Измерено In/P [mA/W]	Статус	Измерено In/P [mA/W]	Статус
3	3.4	6.34	не	5.90	не	3.85	не	7.72	не	6.60	не
5	1.9	3.85	не	3.84	не	2.40	не	4.79	не	3.92	не
7	1	2.99	не	2.10	не	1.76	не	0.20	да	3.43	не
9	0.5	3.59	не	0.75	не	1.78	не	0.18	да	2.14	не
11	0.35	3.75	не	0.88	не	1.68	не	0.10	да	3.46	не
13	0.3	3.32	не	1.05	не	1.54	не	0.02	да	2.48	не
15	0.26	3.39	не	0.48	не	1.03	не	0.10	да	3.30	не

Фиг.5



Фиг.6

Подгрупа 2.2 (осветители №6 до №10)

Хармоничен състав

№	I01	I02	I03	I04	I05	I06	I07	I08	I09	I10	I11	I12	I13	I14	I15
6	100	1.73	72.64	1.57	46.92	1.96	30.13	0.97	34.55	0.71	33.19	1.68	23.37	0.94	40.65
7	100	0.75	18.15	0.41	11.67	0.68	4.58	0.39	2.65	0.68	6.84	0.16	7.32	0.73	5.7
8	100	1.22	10.09	1.32	10.68	1.42	8.13	1.44	8.11	0.74	4.61	0.9	1.03	1.06	21.03
9	100	1.17	24.8	1.73	12.95	0.08	0.05	0.08	0.75	0.01	0.22	0.48	0.53	0.46	0.97
10	100	4.58	75.15	1.84	47.73	1.85	37.88	2.43	38.11	2.32	36.27	3.05	27.85	2.91	38.49

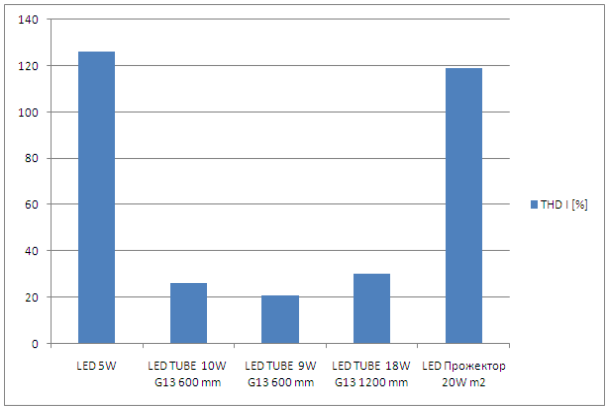
Общи показатели

№	Осветител	Pn [W]	Ф [lm]	F [Hz]	U [V]	I [A]	PF [-]	P [W]	S [VA]	THD I [%]	к [lm/W]
6	LED 5W	5	172.71	50	230	0.040	0.56	5.57	9.87	126	34.54
7	LED TUBE 10W G13 600 mm	10	695.80	49.96	230	0.050	0.95	10.92	11.50	26	69.58
8	LED TUBE 9W G13 600 mm	9	611.68	50	230	0.039	0.93	8.38	9.07	20.6	67.96
9	LED TUBE 18W G13 1200 mm	18	1229.94	49.96	230	0.089	0.94	18.67	19.76	30	68.33
10	LED прожек-тор 20W m2	20	955.39	50	230	0.159	0.54	20.21	37.43	119	47.77

Съответствие със стандарта

Осветител		LED 5W		LED TUBE 10W G13 600 mm		LED TUBE 9W G13 600 mm		LED TUBE 18W G13 1200 mm		LED Прожектор 20W m2	
n	max I/P [mA/W]	Измерено In/P [mA/W]	Статус	Измерено In/P [mA/W]	Статус	Измерено In/P [mA/W]	Статус	Измерено In/P [mA/W]	Статус	Измерено In/P [mA/W]	Статус
3	3.4	5.76	не	0.90	да	0.44	да	1.22	да	5.97	не
5	1.9	3.72	не	0.58	да	0.47	да	0.64	да	3.79	не
7	1	2.39	не	0.23	да	0.36	да	0.00	да	3.01	не
9	0.5	2.74	не	0.13	да	0.36	да	0.04	да	3.03	не
11	0.35	2.63	не	0.34	да	0.20	да	0.01	да	2.88	не
13	0.3	1.85	не	0.36	не	0.05	да	0.03	да	2.21	не
15	0.26	1.75	не	0.20	да	0.11	да	0.01	да	2.82	не

Фиг.7



Фиг.8

Първото условие за EMC се покрива само от осветителя (№8 LED Tube 9W и №9 LED Tube 18W). Много близо до нормативните изисквания е осветител №7 (LED Tube 10W). По отношение на второто условие – I3<86% и I5<61%, при спазване на изискванията за форма на кривата на тока, **всички осветители** отговарят на изискванията на стандарта.

Особеност в случая е, че дори за осветители с висок общ THD I (близо до 100% - фиг.6 и фиг.8), може да се окаже, че отговарят на нормите за EMC. Осветите-

лите с нисък общ THD I отговарят и на двата критерия, което ги прави по-качествени изделия.

По отношение на светлотехнически показатели - достигнати светлинен по-ток и светлинен добив, резултатите са различни.

Някои от изделията са крайно неефективни с **к**=35-40 lm/W. Те обаче имат по-скоро декоративно, а не функционално предназначение и такива показатели са допустими. Повечето осветители имат светлинен добив в границите 60-70 lm/W, което ги прави слабо конкурентоспособни на масово използваните решения с ЛЛНН, които имат **к** в границите 90-105 lm/W [2].

4. Заключение

1. Изследванията за ЕМС са наложителни при проверка за съответствие на LED източниците на светлина със стандартите. Характерно при тях е наличието на електронна пусково-регулираща апаратура (LED - драйвер), което предполага високи стойности на хармоничните изкривявания. Стандартът разглежда проблема комплексно - освен количествените показатели (ниво на THD, ниво на хармониците), се контролират и качествените такива - енергетично въздействие (различие на нормени нива и методики, в зависимост от мощността на източниците).

2. Изследването показва наличието на предизвикателства и възможности за намиране на оптимални решения при конструирането на LED - източници на светлина, тъй като постигането на високи показатели е свързано с употреба на сложни схемни решения и значителни капиталовложения, повишаване крайната цена на продукта и ограничаване на пазарната реализация.

3. Резултатите от изследването на нискоценови клас продукти в по-голямата си част показват съответствие със стандарта за ЕМС, въпреки възприетите относително евтини решения. Недостатък на изпитваните образци са сравнително ниските стойности на светлотехническите показатели.

Литература

[1] БДС EN 61000-3-2:2006, A1 2009, A2 2009 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). ч. 3.2. Гранични стойности. Гранични стойности за излъчвания на хармонични съставящи на тока (входен ток на устройства/съоръжения до 16А на фаза)., БИС, ICS33.100.10

[2] Philips Product Catalogue, Master TL5 High Efficiency Super 80, 2010

Автори: Димитър Матев, доц. д-р, катедра "Електроснабдяване и електрообзаеждане", Технически университет - Варна, E-mail address: *dmlight@ms.ieee.bg;* Валентин Гюров, гл. ас. д-р, катедра "Електроснабдяване и електрообзаеждане",Технически Университет - Варна, E-mail address: *vgiurov@yahoo.com;* Никола Македонски, ас., катедра "Електроснабдяване и електрообзаеждане", Технически университет - Варна, E-mail address: *nikola.makedonski@gmail.com*

Постъпила на: 02.09.2013 г. **Рецензент:** доц. д-р Вълчан Георгиев

ПИЛОТЕН ПРОЕКТ "ИНТЕЛИГЕНТНО УЛИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ГР. ВАРНА"- ЕНЕРГЕТИЧНИ ПОКАЗАТЕЛИ

Димитър Матев, Валентин Гюров, Румен Киров, Никола Македонски

Резюме: *Ефективността и приложимостта на системите за интелигентно улично осветление се оценяват по постигания енергиен ефект и крайните енергетични показатели на осветителните уредби. Разнообразието от технически средства и системи за управление е предпоставка за реализиране на икономия на електрическа енергия в часовете с нисък трафик на движението на превозни средства и пешеходци. В настоящия доклад са разгледани концепции и методики за съставяне на сценарии за управление, с цел постигане на висок енергиен ефект, на конкретен обект – уличното осветление на гр. Варна. Показани са резултати за част от пилотен проект "ИНТЕЛИГЕНТНО УЛИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ГР. ВАРНА", финансиран по Мярка 5, Международен фонд Козлодуй (2010-2013).*

Ключови думи: *Интелигентно улично осветление, адаптивно външно осветление, управление на улично осветление, енергийна ефективност.*

PILOT PROJECT "INTELLIGENT STREET LIGHTING OF VARNA"- ENERGETIC PARAMETERS

Dimitar Matev, Valentin Gyurov, Rumen Kirov, Nikola Makedonski

Abstract: *Efficiency and applicability of smart street lighting are evaluated in achieving the energy effect and final energetic performance of lighting systems. Diversity of devices and control systems is a prerequisite for the realization of saving electricity at times of low traffic movement of vehicles and pedestrians. This report reviewed the concepts and methods for the compilation of management scenarios, in order to achieve high energy effect on a particular object - street lighting in Varna. Below are part of the results for pilot project "INTELLIGENT STREET LIGHTING OF VARNA", funded under Operation No 5, "Project pipelines identification to support from KIDSF for the period 2010-2013".*

Keywords: *Intelligent street lighting, adaptive outdoor lighting, street lighting telemanagement, energy efficiency*

1. Въведение

Съвременните тенденции в управлението на уличното осветление (УО), като част от системите за интелигентно осветление, са свързани с използване на димиране на осветителните уредби (ОУ) - планово намаляване на светлинния по-

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

ISSN 1311-0829

ток, респективно консумираната електрическа енергия (ЕЕ) в часовете с нисък трафик на движението на превозни средства и пешеходци през тъмната част от денонощието. За постигане на максимален енергиен ефект е необходимо разработване на адекватни статични и динамични сценарии за управление (товарови графици), които да съответстват на даденостите и спецификата на конкретния обект и да позволяват максимална икономия на ЕЕ, без нарушаване на нормите за светлинната среда. Дефинирането на правилен подход до голяма степен предопределя концепциите, възприетите технически решения и крайния технико-икономически ефект. Понастоящем методологията за решаване на оптимизационната задача – максимален енергиен ефект, качество и надеждност, при запазва-не параметрите на светлинната среда с минимални инвестиции, е недостатъчно разработена.

2. Подходи за реализиране на максимален енергиен ефект

Обикновено УО на един град се разглежда като единна инфраструктурна единица, съставена от подсистеми, обединени на топологичен принцип с определена йерархия (булеварди, главни улици, събирателни улици и т.н.). Практиката показва, че в болшинството случаи проектите, свързани с реконструкция на УО, се разработват, като се възприема определено техническо решение и то се мултиплицира, без гаранции за оптималност.

За решаване на гореописаната оптимизационна задача, при разработването на пилотния проект "ИНТЕЛИГЕНТНО УЛИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ГР. ВАРНА" [3] е възприет дедуктивен подход - от общия случай за постигане на икономия на ЕЕ чрез димиране, се дефинират частните случаи - определяне на оптимални статични сценарии за управление на всяко подзвено от системата (улици, участъци от улици и др.). На база решенията по подобекти (които могат да се различават съществено), се разработва цялостното техническо решение (проект), с желания технико-икономически ефект.

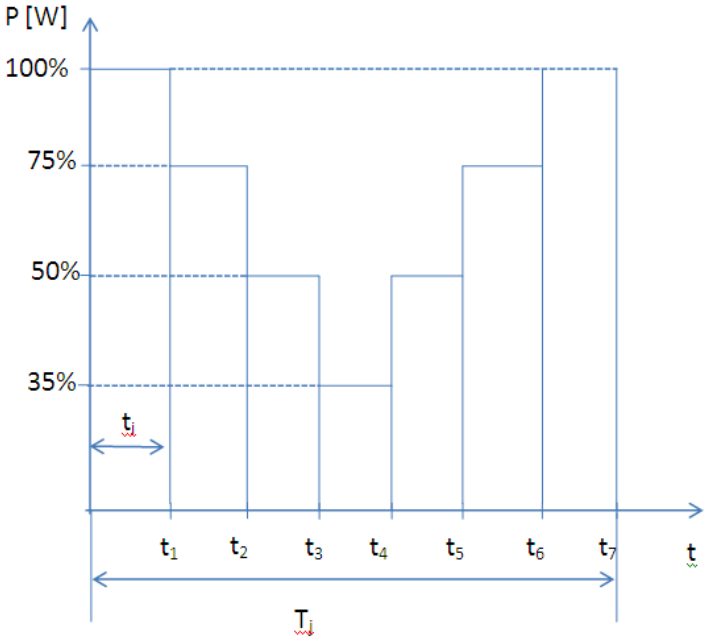
3. Методика за определяне на икономията на електрическа енергия в зависимост от сценариите за управление

Сценариите за управление могат да бъдат симетрични или асиметрични. Нискобюджетните решения за управление на УО се базират на двустепенно димиране (100%-50%) и симетричен сценарий, като това се определя най-вече от използваните технически средства - Bi Power баласти или сдвоени дросели. Такъв подход има редица недостатъци, най-съществените от които са:

- Рязка промяна на светлинната среда в момента на превключване, която може да предизвика дискомфорт у водачите на моторно-превозни средства (МПС) и повишаване на риска от пътно-транспортни произшествия (ПТП), особено за осветителни уредби на улици с висока допустима скорост на движение (50 km/ч. или по-висока);
- Несъответствие на параметрите на светлинната среда със стандартните изисквания - динамичната промяна на класовете улици не в пряка връзка с изменението на трафика.

- Неоптимизиран енергиен ефект - изменението на светлинния поток (консумираната ЕЕ) не следва естественото изменение на трафика.

Оптимален резултат може да бъде постигнат чрез димиране по непрекъснат закон, с използване на електронни драйвери (баласти). На практика също може да се приложи дискретизация, но с много повече нива, плавни преходи, из-ползване на технологиите VPO (Virtual Power Output) и CLO (Constant Light Output).
В този случай задачата се състои в определяне на оптималния брой интервали, тяхната продължителност и степен на димиране.
В някои случаи сценариите за управление са симетрични (фиг.1). В други случаи е целесъобразно използването на несиметрични сценарии.



Фиг.1. Симетричен сценарий за управление

където:
T_j – продължителност на нощта за j-тия ден от годината;
t_i – продължителност на i-ия период;
n – брой степени на димиране;
k – брой интервали на димиране.
При симетрично димиране k=2n-1, като за разглеждания пример n=4, k=7

$$T_j = \sum_{i=1}^{k} t_i \; ; \; E_{kj} = \sum_{i=1}^{k} P_i t_i \; ; \; E_{И\,j} = P_H \cdot T_j - \sum_{i=1}^{k} P_i t_i \qquad (1)$$

където:
E_{kj} – консумирана ЕЕ за j-ия ден [kWh];
P_H – номинална мощност на осветителната уредба [kW];
$E_{Иj}$ – икономия на ЕЕ за j-ия ден [kWh].
Ако се използва коефициент d, показващ степента на димиране (%), то :

$$E_{И\,j} = P_H \cdot T_j - P_H \cdot \sum_{i=1}^{k} \frac{d_i}{100} t_i = P_H \cdot \left(T_j - \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{k} d_i \cdot t_i \right) \qquad (2)$$

Икономията на ЕЕ за една календарна година се определя като:

$$E_{И\,год} = \sum_{i=1}^{365} P_H \cdot \left(T_j - \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{k} d_i \cdot t_i \right) \qquad (3)$$

Ако T_1 е продължителност на деня/нощта при равноденствие (зимно/лятно) равно на 12 часа, а k_{cj} - коефициент на изменение на продължителността на периодите, спрямо деня на равноденствие (поради удължаване или намаляване продължителността на нощта в денонощието), то:

$$k_{cj} = \frac{T_j}{T_1} \text{ ; } k_{cj} > 1 \text{ – лятно полугодие ; } k_{cj} < 1 \text{ – зимно полугодие} \qquad (4)$$

При константно съотношение между продължителността на отделните периоди: $t_i = k_{cj} \cdot t_{рд_i}$, където $t_{рдi}$ - продължителност на i-ия период при равноденствие.

Тогава за всеки отделен ден, реализираната икономия е:

$$E_{И\,j} = P_H \cdot \left(T_j - \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{k} d_i \cdot k_{cj} \cdot t_{рдi} \right) = P_H \cdot \left(T_j - \frac{k_{cj}}{100} \sum_{i=1}^{k} d_i \cdot t_{рдi} \right) \qquad (5)$$

По показаният начин може да бъде изчислена икономията на електрическа енергия (ЕЕ) за всеки ден от годината. Това дава възможност за съставянето на голямо многообразие от сценарии за управление, с цел постигане на максимален енергиен ефект. Използването на формули (3) и (5) дава висока точност, но от практическа гледна точка е трудоемко. Тъй като увеличаването и намаляването на продължителността на нощта спрямо дните на равноденствие е в еднаква степен, може да се постигне опростяване на задачата: изчислява се $E_{Иj}$ по формула (5) за най-дългата и за най-кратката нощ, резултатът се осреднява и се използва като средна икономия на ЕЕ за всеки ден от годината. При нужда от прецизен анализ за периоди, по-кратки от една календарна година, такова усредняване би довело до съществена грешка.

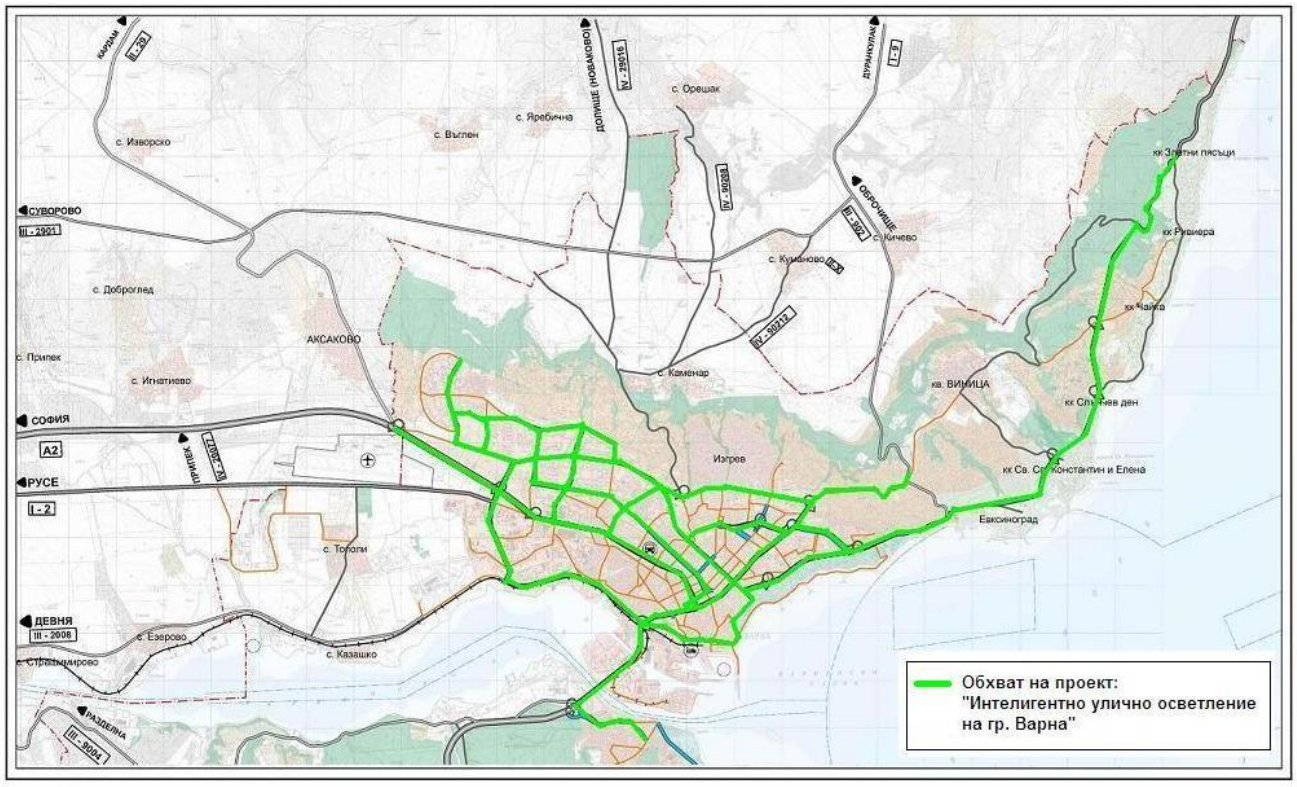
4. Дефиниране на подобекти

В разширения пилотен проект са обхванати всички основни транспортни артерии на града, както следва:

Диагонални: Аерогара Варна – Център (Катедрала), Център (Катедрала) - к.к. "Златни пясъци", кв. "Аспарухово" - Център (Катедрала), Център (Катедрала) – кв. "Виница".

Надлъжни: бул. "Левски", бул. "Цар Освободител", бул. "Сливница".

Напречни: бул. "Република", бул. "Януш Хуняди".
Околовръстни: ул. "Девня", ул. "Атанас Москов" (Югозападна дъга), бул. "Христо Смирненски", бул. "Трети март" (Северно околовръстно шосе), бул. "Приморски", бул. "Княз Борис I-ви" (Югоизточна дъга).
Проектът включва всички първокласни транспортни артерии от републи-канската пътна мрежа, преминаващи през гр. Варна: А2 (магистрала "Хемус"), А5 и Е87.



Фиг.2. Обхват на проекта

Възприето е всяка улица да бъде анализирана и проектирана на подучастъци – между пресичания с други главни улици. Отделните подучастъци имат индивидуални сценарии за управление. Целият обхват, предвид етапите на изпълнение, е разделен на две големи групи:

- **Група 1** - бул. "Княз Борис I-ви", бул. "Васил Левски", бул. "Осми Приморски полк", бул. "Приморски", бул. "Цар Освободител", бул. "Христо Смирненски";
- **Група 2 -** бул. "Сливница", бул. "Янош Хуняди", кв. "Аспарухово" – Катедрала, разклон ТУ - кв. "Виница", Аерогара – Катедрала, Пикадили парк - к.к. "Златни пясъци", бул. "Трети март", бул. "Република", ул. "Атанас Москов" - ул. "Девня".

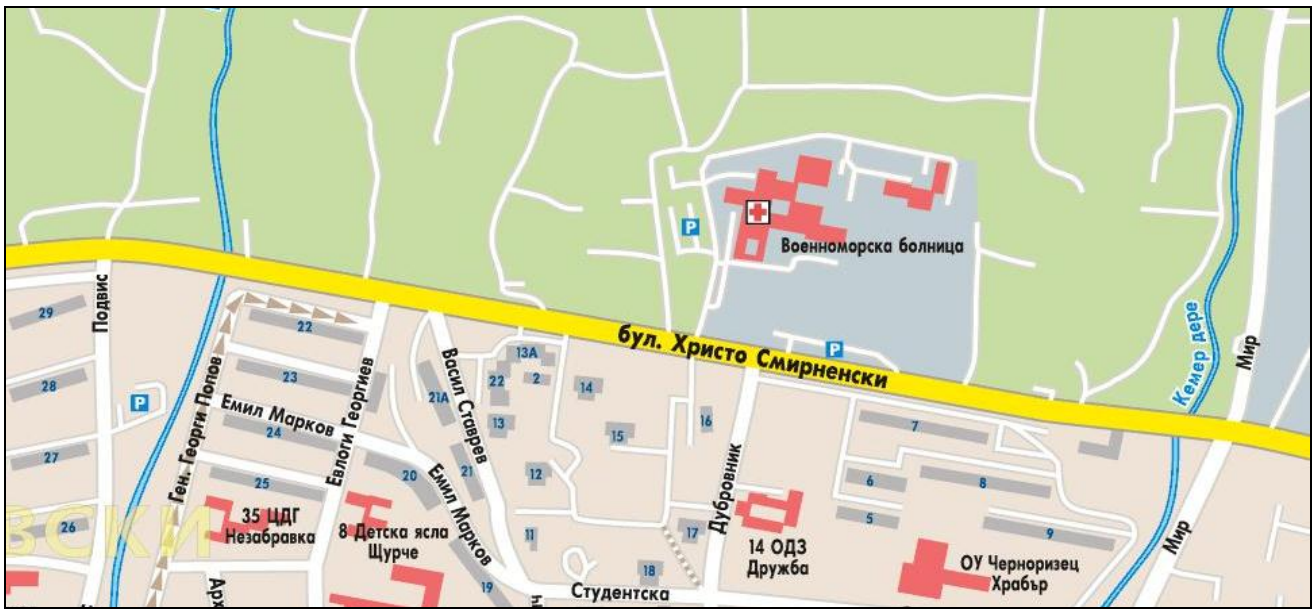
5. Концепция на проекта

Основният оптимизационен критерий е високо качество и надеждност на уличното осветление, при максимална използваемост на частите от съществува-щата неуправляема улична осветителна уредба, които все още имат значителен експлоатационен ресурс (стълбове, осветители, кабелна мрежа и др.), инфраструк-

турните дадености (минимално разрушаване и последващо възстановяване на пътни и тротоарни настилки) и внедряване на нови компоненти с дълъг експлоатационен срок, на база технико-икономически обосновано проектно решение.
Предвижда се запазването на натриевите лампи с високо налягане като основен източник на светлина за частите от обхвата на проекта, пълно модернизиране на съществуващи осветители с последно поколение енергийно ефективни електронни драйвери (баласти), използване на източници на светлина с технико-икономически оптимизиран експлоатационен ресурс.
Предвижда се пълна рехабилитация и преокомплектовка на съществуващите осветители и частична подмяна с нови, на такива в лошо експлоатационно състояние. Касетите за улично осветление по обхвата на проекта ще бъдат изцяло подменени с нов унифициран модел. Така основните съоръжения ще бъдат обновени по възможно най-икономичен начин, ще бъде удължен експлоатационния им срок и повишена надеждността на инфраструктурата на уличното осветление. За постигане на максимален ефект в експлоатационния мениджмънт и намаляване на експлоатационните разходи е използвана йерархична система на управление от три нива: Ниво 1 (осветител - сегмент) с Powerline (LonWorks) комуникация по захранващите кабели на сегментите. Комуникационният канал между Ниво 2 (сегмент) и Ниво 3 - Контролно-информационен център, използва Internet (TCP/IP) и WWAN (2G, 3G мобилни мрежи). Системата е базирана на LonWorks Open Protocol върху Powerline и напълно е CENELEC EN-50065-1 и ANSI 709.2 съвместима.

6. Анализ по подобекти и съставяне на светлинни сценарии

Всеки подобект е подложен на индивидуална оценка на съществуващото положение и експлоатационния ресурс, симулационен анализ на светлинната среда и енергетичните параметри (включително в процес на димиране) и разработване на проектна документация за реконструкция. Пример за съществуващото положение на един участък (подобект) е показан на фиг.3.



Фиг.3. бул. "Христо Смирненски", участък ул. "Мир" - ул. "Подвис"

Съоръжение	Тип	Количество
Осветител	НЛВН 150W	27
Осветител	НЛВН 250W	2
Стълб УО	единична конзола	29
Касета УО	комплект	1

В зависимост от получените резултати, за всеки подобект са съставени индивидуални светлинни сценарии, като е съблюдавано покриването на нормите за светлинната среда по стандарт. Пример за този подобект е показан на фиг.4 - летен ден и фиг.5 - зимен ден.

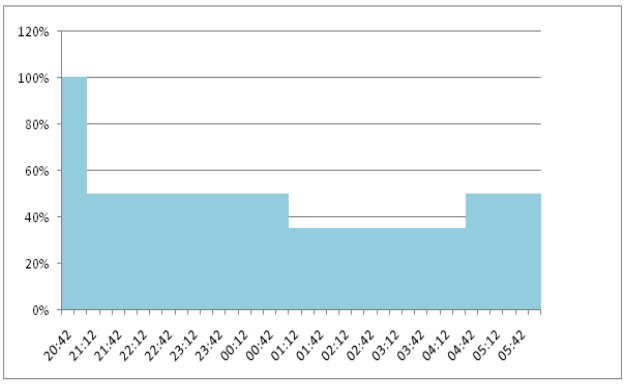
летен ден 20 юни 2012 г.

час на залез: 20:42 час на изгрев:05:47
продължителност на нощта: 9 часа и 5 минути
яркост: 1,34cd/m^2 яркост (по стандарт): 0.75 cd/m^2

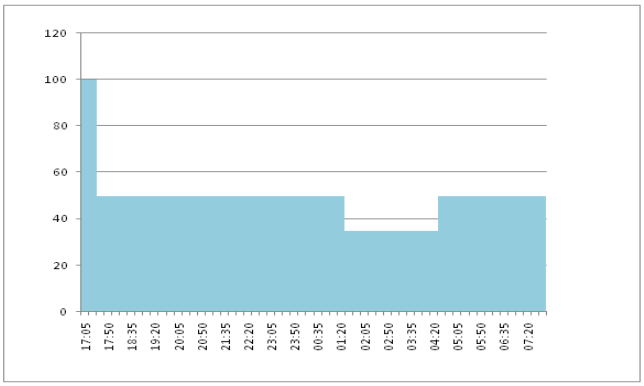
t_i [ч.]	Димиране [%]	Pdim [W]	Ldim [cd/m^2]
00:15	100	172.56	1.34
04:00	50	95.79	0.67
03:30	35	63.45	0.47
01:30	50	95.79	0.67

За един осветител:

$E_{100\%}$=1596,18 Wh, E_{dim}= 792,06 Wh, $E_{И}$=804,12 Wh, $E_{И\%}$= 50,38%



Фиг.4



Фиг.5

зимен ден 20 януари 2013 г.

час на залез: 17:05 час на изгрев: 07:35
продължителност на нощта: 14 часа и 30 минути
яркост: 1,34cd/m^2 яркост (по стандарт): 0.75 cd/m^2

t_i [h]	Димиране [%]	Pdim [W]	Ldim [cd/m^2]
00:15	100	172.56	1.34
05:00	50	95.79	0.67
06:00	35	63.45	0.47
03:25	50	95.79	0.67

За един осветител:

$E_{100\%}$=2529,73 Wh, E_{dim}= 1229,43 Wh, $E_{И}$=1300,29 Wh, $E_{И\%}$= 51,4%

Характерно за разглеждания пример е, че преоразмеряването на съществуващата уредба дава възможност за реализиране на допълнителна икономия, чрез скъсяване на интервала за работа на 100% - t_1 и реализирането на дълбоко димиране (50% за интервали 2 и 4 и до 30% за интервал 3). Също така, допълнителна икономия се реализира чрез съставянето на несиметричен сценарий за управление. Продължителността на периодите за зимен и летен ден също е различна.

7. Енергетични показатели за Група 1 и Група 2 [2]

Обобщени резултати по подобекти за двете групи са показани в табл.1

Табл.1

Транспортна артерия	*Инвест. К [лв.]*	*Ринст. [kW]*	*К/Р [лв./kW]*	*$E_{И}$ [MWh/г.]*	*Икономия [лв./ г.]*	*Тотк. [г.]*
Летище - Катедрала	492676.26	208.325	2364.94	659.97	81836.72	6.02
Катедрала - к.к. "Златни пясъци"	393369.66	163.865	2400.57	519.12	64371.41	6.11
кв. "Аспарухово" - Катедрала	412475.3	135.135	3052.32	428.11	53085.35	7.77
Катедрала - кв. "Виница"	322890.1	119.535	2701.22	378.68	46957.17	6.88
бул. "Приморски"	88719	31.2	2843.56	98.84	12256.35	7.24
бул. "Цар Освободител"	412300.4	142.74	2888.47	452.20	56072.84	7.35
бул. "Левски"	246885	103.35	2388.82	327.41	40599.19	6.08
бул. "Сливница"	273227	114.66	2382.93	363.24	45042.12	6.07
бул. "Януш Хуняди"	101399.6	42.9	2363.63	135.91	16852.49	6.02
бул. "Трети Март"	147810.1	45.435	3253.22	143.94	17848.32	8.28
бул. "Република"	71089.2	29.25	2430.40	92.66	11490.33	6.19
ул. Девня - ул. "Атанас Москов" (южна дъга)	187960.8	63.96	2938.72	202.62	25125.53	7.48
бул. "Христо Смирненски"	109305	26.91	4061.87	85.25	10571.11	10.34
Общо:	3260107.42	1200.355	2286.34	3887.97	482108.96	
Годишна икономия [TWh/г.]				3.89		
Общо с КИЦ	3537357.42					7.34
Обща инвестиция [EUR]					1808622.13	
K [kWh/EUR]					2.16	

Показаните в табл.1 резултати са постижими при внедряването на интелигентно улично осветление, позволяващо адаптивно управление на основа трафик и параметри на светлинната среда, чрез гъвкави сценарии за управление. Критерият К [kWh/EUR] – икономисана електрическа енергия за единица инвестиция, въведен за оценка от Фонд Козлодуй, е комплексен енергетичен и икономически показател, който достоверно показва целесъобразността на възприетите подходи и технически решения.

По този показател с К=2,16 пилотен проект "ИНТЕЛИГЕНТНО УЛИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ГР. ВАРНА", финансиран по Мярка 5, Международен фонд Козлодуй (2010-2013) се нарежда между водещи европейски проекти [К=1,8 - 2,5], [1].

8. Заключение

1. Съставянето на адекватни сценарии за управление е определящо за крайният енергиен ефект и избора на технически решения при проектирането и изграждането на системи за интелигентно улично осветление.

2. Възприетият дедуктивен подход – разглеждане на общото решение като комплекс от различни подобекти с индивидуални режими на управление и различни енергетични параметри, е решаващ за постигане на високи технико-икономически показатели.

3. Разработената методика е приложима в системи за управление на УО, работещи на дискретизиран принцип на управление.

Оптимален резултат може да бъде постигнат чрез димиране по непрекъснат закон, с използване електронни драйвери (баласти).

На практика при системите с непрекъснато управление може да бъде приложена дискретизация, чрез избор на подходящи времеви интервали, повече нива на димиране, плавни преходи, използване на технологиите VPO (Virtual Power Output) и CLO (Constant Light Output).

ЛИТЕРАТУРА

[1] ESOLi project WP 2 1.6, Assessment of framework conditions, Version: 1.6, 2011.

[2] Интелигентно улично осветление на гр. Варна, Енергиен одит (Енергийно-икономически анализ), март 2012, Варна.

[3] Разширен пилотен проект "ИНТЕЛИГЕНТНО УЛИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА ГР. ВАРНА" (работен проект), септември 2012, Варна.

Автори: Димитър Матев, доц. д-р, катедра "Електроснабдяване и електрообзаеждане", Технически Университет - Варна, E-mail address: *dmlight@ms.ieee.bg;* Валентин Гюров, гл. ас. д-р, катедра "Електроснабдяване и електрообзаеждане", Технически Университет - Варна, E-mail address: *vgiurov@yahoo.com;* Румен Киров, доц. д-р, катедра "Електроснабдяване и електрообзаеждане", Технически Университет - Варна, E-mail address: *kvc_electroinvest@yahoo.com;* Никола Македонски, ас., катедра "Електроснабдяване и електрообзаеждане",от Технически университет - Варна, E-mail address: *nikola.makedonski@gmail.com*

Постъпила на: 02.09.2013 г. **Рецензент:** проф. д-р Н. Василев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАТОВАРВАНЕТО И НЕСИМЕТРИЯТА ПРИ КОМУНАЛНО – БИТОВИ ТРАФОПОСТОВЕ В МАЛКИ НАСЕЛЕНИ МЕСТА

Димитър Николов , Гергана Кърджева

Резюме: *В настоящата разработка се разглежда натоварването и несиметрията между фазите на комунално – битови трафопостове, захранващи жилища със смесено отопление в малки населени места. Анализират се причините за несиметричното натоварване и последствията от него. За сравнение е дадено и натоварването на трансформатор, захранващ жилища със смесен тип отопление в голям град.*

Ключови думи: *несиметрия в натоварването на фазите на трансформатора, загуби на мощност*

INVESTIGATION OF THE LOAD AND ASYMMETRY AT LOCAL TRANSFORMERS SUPPLYING RESIDENTIAL CONSUMERS IN SMALL VILLAGES

Dimitar Nikolov , Gergana Kardzheva

Abstract: *The current work reveals the load and the asymmetry between the different phases of residential transformers, supplying consumers with a mixed type of heating in small villages. The reasons and the consequences of their loading are being analyzed. A comparison between them and the load of a transformer supplying dwellings with mixed type of heating in a big city is being made.*

Keywords: *asymmetry of transformer phases, power losses*

1. Въведение

Натоварването на комунално – битовите трансформатори е несиметрично, поради различния брой присъединени еднофазни битови потребители. Досега липсва достоверна информация за режимните параметри на разпределителните мрежи СрН и за степента на натоварване на самите трансформатори. Това затруднява изчисляването на действителните загуби на мощност и електрическа енергия, както в комунално – битовите трансформатори, така и в мрежите СрН. Възможно е да се получи съществена несиметрия между отделните фази, в резултат на което едната от тях да се претовари, без самият трансформатор да е натоварен. Всичко това налага да се събере необходимата информация на електрическите товари за всяка от фазите за достатъчно продължителен период от

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

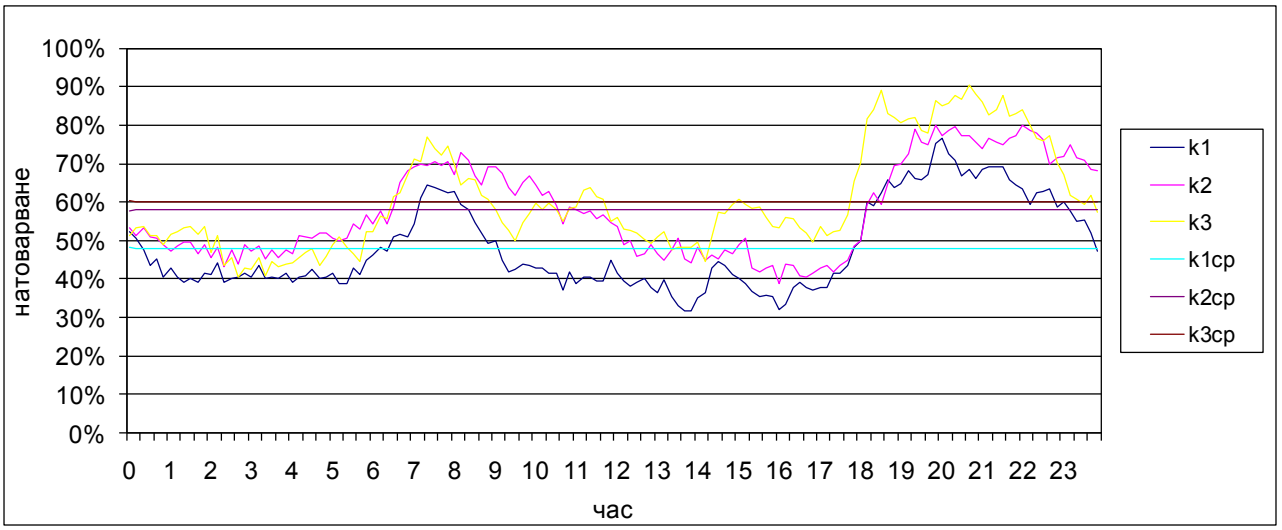
ISSN 1311-0829

време. Развитието на електрониката в последните години създава такива възможности.

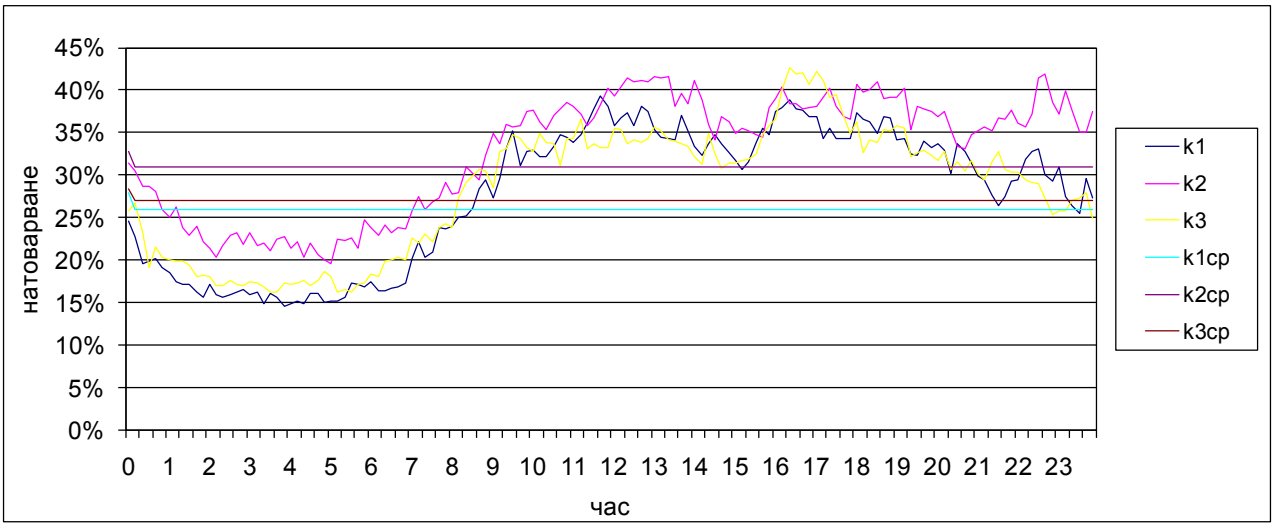
2. Същинска част

Настоящата разработка е насочена към изследване на несиметрията в комунално – битови трансформатори, захранващи малки населени места. За определяне на режимните параметри на разпределителните електрически мрежи СрН са проведени експериментални измервания на електрическите товари на отделните фази на такива трансформатори със записващи апарати с електронна памет [1].
Епизодичните измервания не винаги отчитат върха на товаровата диаграма. При тях влияние оказват и много случайни фактори, но все пак дават някаква представа за стойността на електрическите товари в комунално битовия сектор.
Действителното състояние може да се получи само въз основа на достатъчно дълга и представителна извадка от данни. Това е възможно само със записващи апарати. За целта е проведено изследване с апарат Meg 30 – автоматизирана система за измерване и архивиране на натоварването в трифазни мрежи на "ЧЕЗ - Разпределение".
Уредът Meg 30 е използван за измерването на тока и напрежението на трите фази и автоматичното изчисляване на активна и реактивна мощност. За всяко от измерванията са записани моментните стойности със стъпка на квантоване 1 минута.
Измерванията на товарите са извършени в периода:
- зимен – 09.01.2013 – 11.02.2013;
- летен – 21.06.2013 – 22.07.2013;

Продължителността на измерванията и в двата периода е около 30 дни, като са изследвани 8 броя трансформатори, захранващи жилища със смесено отопление в малки населени места, в радиална районна мрежа СрН. Обема на направените измервания гарантира достоверността на получената информация [2].
Част от трансформаторите в малки населени места се намират в селища в близост до гр. София, а друга част са разположени в отдалечени, гранични райони, където броят на населението е силно намалял.
Проведените измервания показват, че има съществена разлика в натоварването на описаните по – горе два типа селища.
Всички комунално – битови трансформатори са проектирани, така че да покрият електропотреблението и при евентуално електроотопление. В такива населени места единствения начин за отопление е смесеното отопление – до 70 – 75% се осъществява на твърдо гориво, което е много по – евтино, а и не съществува проблем със складирането и съхранението му, а останалата част от отоплението е чрез електроенергия.
При трансформаторите, захранващи жилища със смесено отопление в близост до големи градове няма съществена разлика между летните и зимни товарови графици (фиг.1 и фиг.2). На фигурите са показани коефициентите на натоварване на всяка от фазите k1, k2, k3, както и средно натоварване за всяка фаза k1ср, k2ср, k3ср:



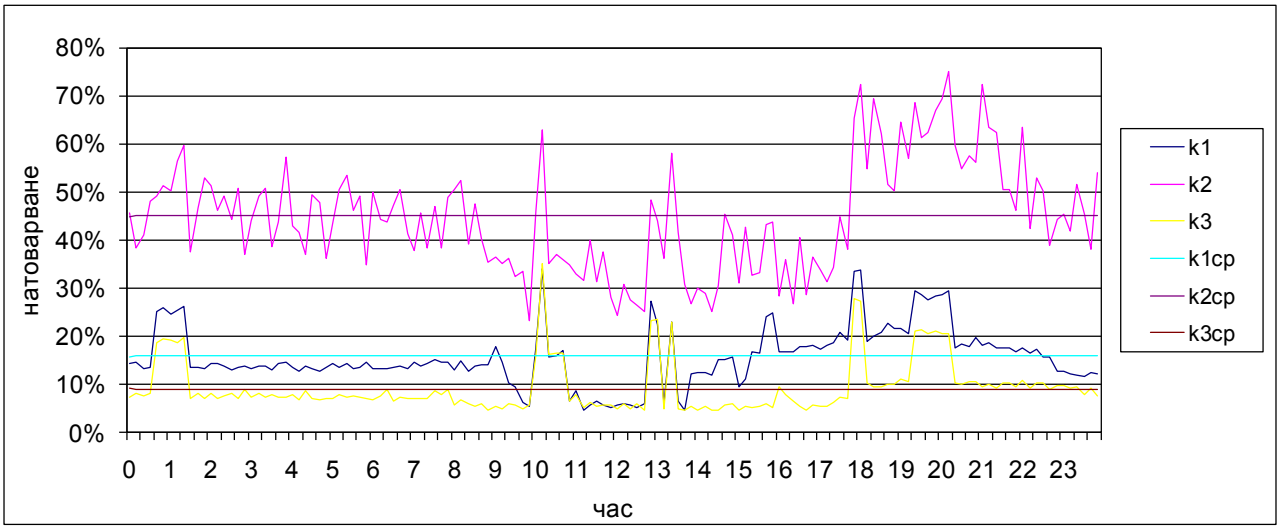
Фиг.1. Денонощна товарова диаграма за жилища в малки населени места в близост до гр. София - зимен период



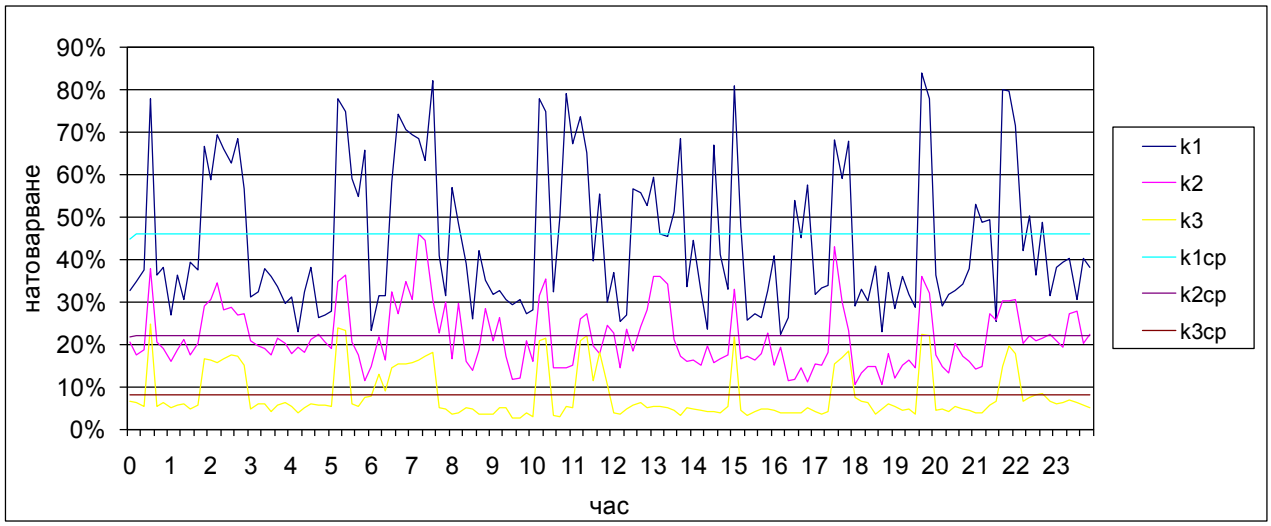
Фиг.2. Денонощна товарова диаграма за жилища в малки населени места в близост до гр. София - летен период

Трансформаторите, захранващи селища в близост до София са с номинална мощност 630 kVA. Тяхното натоварване през зимата е около 50 % (фиг.1), а през летния период е средно около 35% (фиг.2). Това се дължи на факта, че поради по – късия ден има по – голямо осветление, а в известна степен и електроотопление на някои жилищни помещения, а сравнително високата лятна консумация се основава на употребата на климатици в режим на охлаждане. През летния период към битовото потребление се прибавя и електрически товар, предизвикан от помпи за напояване в дворовете, което влошава фактора на мощността и cos φ достига до 0,95, докато в градовете е около 0,98. Несиметрията е почти еднаква и през двата измервателни периода. Тя се движи в границите 2% - 10%. Това се дължи на факта, че трансформаторите са с по – голяма инсталирана мощност и съответно към тях по - равномерно са присъединени достатъчен брой потребители, които допринасят за намаляване на случайният характер.

Когато разглеждаме натоварването в малки населени места, трябва да се има предвид и факта, че съществуват множество селища, където поради обезлюдяване в крайни гранични райони, планински райони и такива, които са по – отдалечени от големи населени места се налага в ТП 20/0,4 kV да бъдат монтирани малки по мощност силови трансформатори с инсталирана мощност 50 kVA, 63 kVA и 100 kVA. Населението в тези райони е около 40 домакинства, част от които се състоят от един възрастен човек. Поради малкия брой жилища случайния характер е силно изразен, от където се получава много неравномерен товаров график. Факторите, които водят до това са: обезлюдяване на селата, високоите цени на електроенергията и ниския социален статус на населението, което живее там. Фиг.3 и фиг.4 показват натоварването през зимен и летен период на едно такова селище:



Фиг.3. Денонощна товарова диаграма за жилища в малки населени места в отдалечен район - зимен период



Фиг.4. Денонощна товарова диаграма за жилища в малки населени места в отдалечен район - летен период

Изследванията показаха, че натоварването на комунално – битовите трансформатори в тези селища през зимния период е неравномерно. Средното натовар-

ване е около 10%, като в някои фази е 45%. Максималните стойности достигат до 70%. Трябва да се отбележи, че съществуват и такива с по – слабо натоварване.

През летния период натоварването е между 8% и 50% за различните фази на трансформатора. Максималните стойности за една от фазите достигат до 80%. По – високите летни товари се обясняват с факта, че през лятото се използват множество помпи за напояване в дворовете.

Въпреки че регистрираното население в тези селища е малко, през летния период къщите се използват като вили и при това тяхното използване е силно неравномерно и някои фази са значително по – натоварени от други.

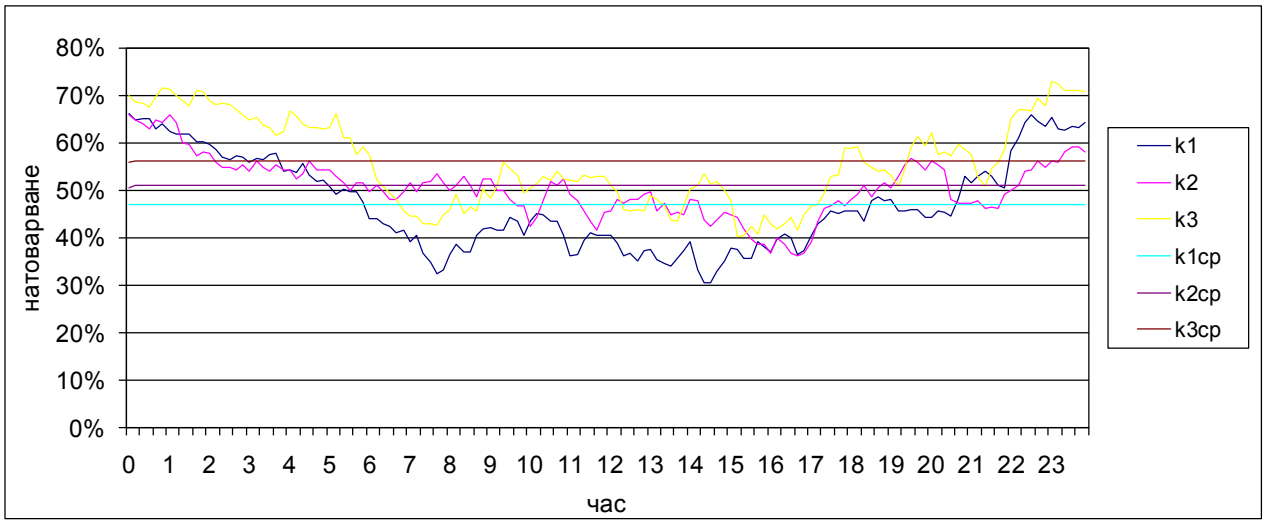
Поради малкия брой домакинства в тези селища инсталираната мощност на трансформаторите е малка. Графикът на натоварването е изключително неравномерен и не може да се очертае една категорична тенденция в него. Всичко това води до много висока несиметрия в натоварването на фазите на трансформаторите. За дадения случай тя се движи между 14% - 24%, а през лятото достига и 30%. В този тип малки населени места изравняването, с цел избягване на случайната несиметрия, се прави спрямо летния товаров график, като се прехвърлят потребители от най – силно натоварената към най – слабо натоварената фаза.
Голямата несиметрия води и до значителни отклонения в напрежението до последните консуматори. В някои селища са измерени стойности на напрежението до 190V, като практически в тези домакинства електроуредите не работят.

Важно е измерванията да се правят поне в два годишни периода – летен и зимен, за да се улови върха на товара, като тези измервания специално за втория тип селища трябва да се правят доста често – на 2-3 години, за да се предотврати евентуално претоварване на някоя фаза на трансформаторите.

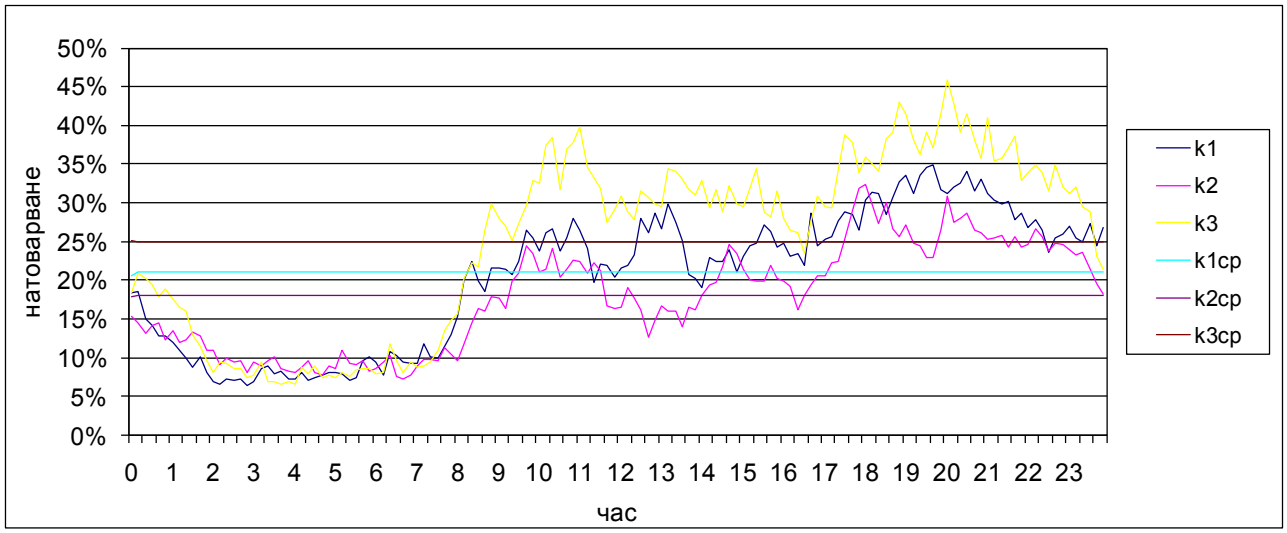
При установяване на несиметрия по – голяма от 12 – 15% е необходимо незабавно преразпределение по фазите. В резултат на настоящите измервания се наложи прехвърляне на консуматори от най – натоварената в най – слабо натоварената фаза, което е причинено от различния товаров график на еднакви по площ жилища.

Последствието от голямата несиметрия водят до значителни по стойност загуби на електроенергия. Значителната несиметрия довежда до увеличаване на тока в нулевия проводник в мрежите НН, което довежда до допълнителни загуби на електроенергия.

За сравнение в по – големите населени места са дадени по – долните графики (фиг.5 и фиг.6) на натоварването на отделните фази на трансформатор 630 kVA, захранващ комунално – битови потребители, които се характеризират със смесен тип отопление:



Фиг.5. Денонощна товарова диаграма за жилища със смесен тип отопление – зимен период



Фиг.6. Денонощна товарова диаграма за жилища със смесен тип отопление – летен период – кв. Подуяне, гр. София

Средното натоварване е около 50% за зимен период и около 22% за летен. Несиметрията е 5-10%.

При част от тези потребители не съществува възможност за складиране на твърдото гориво, което води до използване на електроенергия за отопление през зимния период. С това се обяснява и разликата между зимния и летния товаров график.

3. Изводи

1. Натоварването на отделните фази на комунално – битовите трансформатори в малките населени места е значително неравномерно. Товаровият график е неравномерен, особено в отдалечените селища, където част от жилищния фонд се използва като вили.
2. Несиметрията в натоварването на отделните фази в двата периода е значителна. Особено голяма тя е в отдалечените райони – в границите 14% - 30%,

докато в по – близките до големите градове тя е в границите от 2% до 10%. Това налага системни измервания на натоварването на фазите и подходящо разместване на отделните комунално – битови потребители с цел намаляване на несиметрията, като потребители от най – силно натоварената фаза се прехвърлят на най – слабо натоварената.

Литература

[1] Mega Merici Energeticke Aparaty, Universal Energy Meter Meg30

[2] Воротницкиий В. Е., Железко Ю. С., Казанцев В.Н., Пекелис В. Г., Файбисович Д. Л. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем, 2005г.

Автори: д-р инж. Ангел Цолов - доцент в катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address; маг. инж. Гергана Русева Кърджева, докторант в катедра „Електроенергетика” (ЕЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *g_kardjeva@tu-sofia.bg*

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

РАЗРАБОТВАНЕ НА ФИЛТРИ ЗА СПЕКТРАЛНА КОРЕКЦИЯ НА CCD - КАМЕРА ПРИ ИЗМЕРВАНЕ НА ЯРКОСТТА НА РАЗЛИЧНИ КАТЕГОРИИ УЛИЦИ

Димитър Павлов, Ангел Пачаманов

Резюме: *Големината на изходния сигнал от фотоприемник е пропорционална на светлинния поток Ф ако спектралната му чувствителност s(λ) съвпада с тази на дневното човешко зрение V(λ). При недостатъчно точна корекция на фотоприемника по V(λ), показанията на уреда, с който се извършват измерванията трябва да се коригират с константа, имаща различна стойност за всеки източник със спектрален състав, различен от този на източник "А". В статията са изчислени коригиращи константи за три нива на мезопичното зрение при директно измерване на мезопична яркост със CCD-камера, комплектувана със съответстващи на нивата мезопична яркост филтри.*

Ключови думи: *спектрална чувствителност, мезопична яркост, филтри, силициев фотоприемник.*

DEVELOPMENT OF FILTERS FOR CORRECTION OF SPECTRAL CCD - CAMERA MEASUREMENT OF DIFFERENT CATEGORIES OF STREETS

Dimitar Pavlov, Angel Pachamanov

Resume: *i_Φ of the photo-current converter is proportional to the light flux Φ detected by the photocell, given its spectral sensitivity s(λ) coincides with V(λ). When photocell's s(λ) has not been adjusted correctly enough, the measurement of the instrument used has to be divided by a constant, which has a different value for every different light source. Correcting constants have been calculated here for different light sources at direct measurement of mesopic luminance with photo-current converter corrected with (weighted against) three mesopic vision spectral sensitivity functions. In the paper corrective constants for three different levels of mesopic vision have been calculated. The calculations are based on the data, received form direct measurement of mesopic luminance with a CCD camera, equipped with corresponding to the mesopic luminance levels filters.*

Key words: *spectral sensitivity, mesopic luminance, filters, siliceous photoreceiver*

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

ISSN 1311-0829

1. Въведение
Директно измерване на мезопична яркост чрез фотоприемник, коригиран по $V_{mes}(\lambda)$

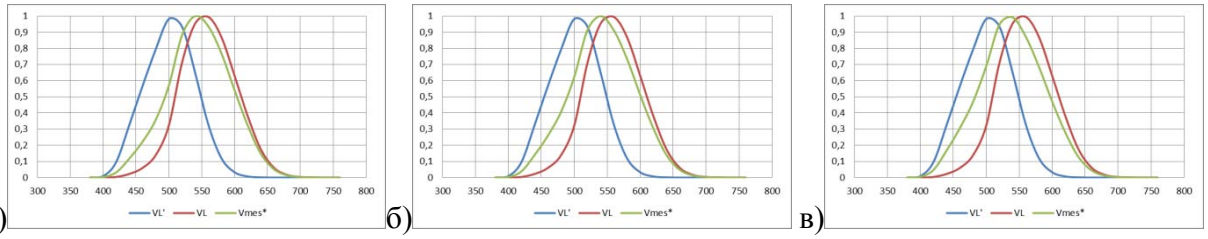
Международната комисия по осветление препоръчва спектралната чувствителност на мезопичното зрение $V_{mes}(\lambda)$ да се определя като линейна функция на кривите за дневно и нощно зрение $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$ по формулата:

$$Vmes(\lambda) = [m.V(\lambda) + (1-m).V'(\lambda)] / M(m) \quad (1)$$

където M(m) е нормализираща функция, така че максималната стойност на $V_{mes}(\lambda)$ да се получи 1, а $0 \leq \mathbf{m} < 1$ (за фотопичното зрение m=1). При дефинирано поле на адаптация на всяка стойност **m** отговаря конкретна мезопичната яркост L_{mes}, равна на:

$$Lmes(\lambda) = \frac{683}{Vmes(\lambda_0)} \int_{380nm}^{780nm} Vmes(\lambda).le(\lambda).d\lambda \quad (2)$$

където $V_{mes}(\lambda_0)$ е стойността на функцията при λ=555 nm, а *le(λ)* - спектралната плътност на яркостта [$W.sr^{-1}.m^{-2}.nm^{-1}$] за дефинираното поле на адаптация [2]. Кривите Vmes(λ) са различни за различните нива фотопична яркост, нормирана в стандарта за улично осветление по категории улици. Това предполага разработване на серия филтри за спектрална корекция по Vmes(λ), съответстващи на нивата фотопична яркост на всеки тип улица. За да се измерва мезопична яркост на определен тип улица (ME6, ME5, ME4) пред фотоприемника (обикновено CCD-елемент) се поставя коригиращ филтър, със спектрални коефициенти на пропускане, изчислени по формулата $\tau_{MES}(\lambda_i) = Vmes(\lambda_i) / S'_{CCD}(\lambda_i)$. Когато фотоприемникът не е коригиран точно по съответстващата за улицатаVmes(λ), показанията на уреда трябва да се разделят с калибровъчна константа, която има различна стойност за всеки използван светлинен източник[3].



Фиг.1. Криви на спектрална чувствителност на мезопично зрение при фотопична яркост (по средата): а) 0,75 cd/m^2; б) 0,5 cd/m^2; в) 0,3 cd/m^2

1. Същинска част

Кривите на спектрална чувствителност на мезопичното зрение са различни при различни нива на нормиране на фотопичната яркост. За фотометрични измервания на улична осветителна уредба трябва да се използват приемници, чиято относителна спектрална чувствителност съвпада с тази на човешкото око за съответното ниво на яркостта. За тази цел спектралната чувствителност на фотоприемниците за трите категории улици (ME6, ME5, ME4) се коригират със специално конструирани филтри [4]. Това коригиране не може да бъде абсо-

лютно точно, затова се въвежда мярка за степен на съгласуване f_1, изчислявана по израза [1]:

$$f_1\ (\lambda) = \int_{380nm}^{780nm} \left| Cs * s_{kor}(\lambda) - Vmes(\lambda) \right| .d\lambda \Big/ \int_{380nm}^{780nm} Vmes(\lambda).d\lambda \qquad (3)$$

Тук Cs е константа, която се определя по известните спектрална плътност на излъчване $\varphi_A(\lambda)$на стандартен източник тип „А“, относителната спектрална чувствителност на използвания фотоприемник $s'_{kor}(\lambda)$ и относителната спектрална чувствителност на човешкото око за определена Vmes(λ):

$$Cs = \int_{380nm}^{780nm} \varphi_A(\lambda).Vmes(\lambda).d\lambda \Big/ \int_{380nm}^{780nm} \varphi_A(\lambda).s_{kor}(\lambda).d\lambda \qquad (4)$$

Мярката f_1 е еднозначно определена от относителната спектрална чувствителност $s'_{kor}(\lambda)$ на фотоприемника и дава в относителни единици колко близо до относителната спектрална чувствителност на човешкото око за съответната Vmes(λ) е относителната спектрална чувствителност $s'_{kor}(\lambda)$ на изследвания фотоприемник. По аналогия на V(λ), в зависимост от стойността на f_1 фотоприемниците могат да се класифицират по степен на съгласуваност спрямо съответната Vmes(λ) [1].

Табл.1. Степен на съгласуваност поVmes(λ)

Клас	**Степен на съгласуваност по Vmes(λ)**	**Мярка f1, %**
1	Много фино съгласуване	<2
2	Добро съгласуване	2<f1≤6
3	Грубо съгласуване	6<f1≤12
4	Много грубо съгласуване	12<f1≤18

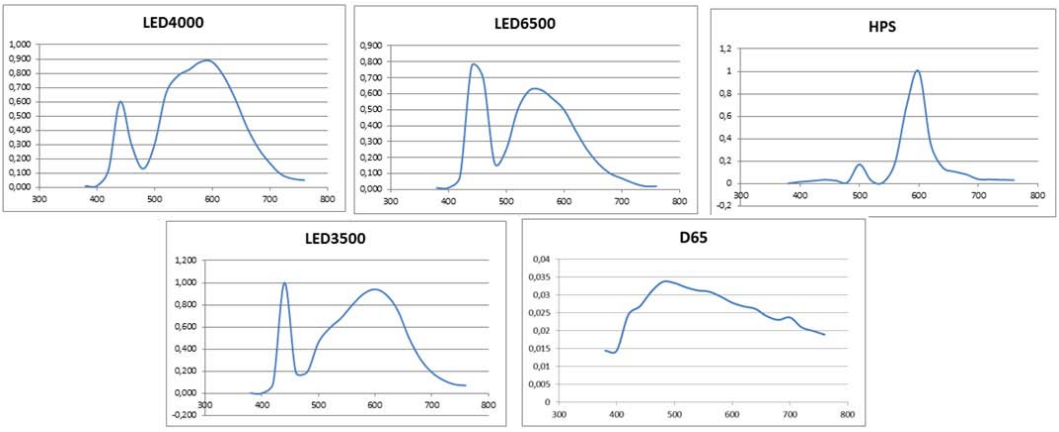
При това положение(поради неточната корекция), показанията на уреда, с който се извършват измерванията, трябва да се разделят с константата “a”, съгласно (5).Тази константа е коригираща и се бележи с $a_{(Z)}$, като индексът в скобите показва за кой светлинен източник тя се отнася [1].

$$a(\varphi_Z(\lambda)) = \frac{s_z}{s_A} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi_Z(\lambda).s_{rel}(\lambda).d\lambda \Big/ \int_{360nm}^{830nm} \varphi_Z(\lambda).Vmes(\lambda).d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi_A(\lambda).s_{rel}(\lambda).d\lambda \Big/ \int_{360nm}^{830nm} \varphi_A(\lambda).Vmes(\lambda).d\lambda} \qquad (5)$$

Например, действителната осветеност от LED 6500K е $E_{(LED6500)}$, получена по отчетената стойност $X_{отчетено}$ от уреда (калибриран с източник „А“), разделен на $a_{(LED6500)}$:

$$E_{(LED6500)} = X_{отчетено}/a_{(LED6500)} \qquad (6)$$

Изчислените коригиращи константи за различни светлинни източници при директно измерване на мезопична яркост на база CCD - фотоприемник, осигуряващ чувствителност близка до Vmes(λ) са дадени в табл.2, табл.3 и табл.4. Функциите на спектралните плътности на използваните светлинни източници са дадени на фиг.1 и в табл. 2. В табл.3 е показано численото решаване на израз (5) за светлинен източник LED_{4000} – за коригиран по Vmes фотоприемник, предназначен за измерване на фотопична яркост 0,75cd/m^2 (улици клас ME4 – фиг.2).



Фиг.1. Спектрална плътност на излъчването на различни светлинни източници за които са изчислени коригиращи константи

Табл.2.

Функции на спектралната плътност на излъчване на използваните светлинни източници

nm	LED_{3500}	LED_{4000}	LED_{6500}	HPS	D65
380	0,000	0,010	0,010	0,000	0,014
400	0,000	0,010	0,010	0,015	0,014
420	0,090	0,120	0,080	0,022	0,024
440	1,000	0,600	0,770	0,032	0,027
460	0,190	0,300	0,700	0,026	0,031
480	0,190	0,130	0,165	0,010	0,034
500	0,460	0,300	0,250	0,170	0,033
520	0,590	0,660	0,500	0,025	0,032
540	0,680	0,780	0,620	0,010	0,031
560	0,800	0,825	0,625	0,185	0,031
580	0,900	0,880	0,570	0,705	0,030
600	0,940	0,880	0,500	1,000	0,028
620	0,890	0,780	0,370	0,355	0,027
640	0,750	0,620	0,250	0,144	0,026
660	0,500	0,425	0,160	0,106	0,024
680	0,310	0,275	0,100	0,080	0,023
700	0,190	0,170	0,070	0,038	0,024
720	0,120	0,090	0,040	0,035	0,021
740	0,080	0,060	0,020	0,032	0,020
760	0,070	0,050	0,020	0,030	0,019

Табл.3.

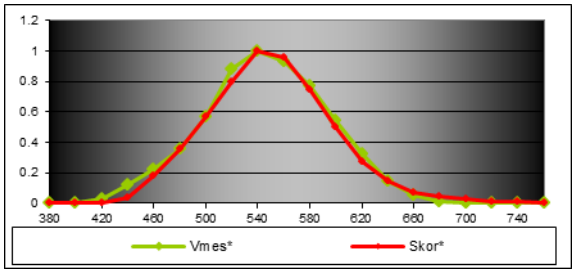
Числено решаване на израз (5) за LED_{4000}

nm	Skor*	fiA	Vmes*	fiA*Vmes	fia*Scor	LED_{4000}	LED_{4000}*Scor	LED_{4000}*Vmes
380	0,00	10	0,00	0,00	0,00	0,01	0,0000	0,0000
400	0,00	15	0,00	0,05	0,01	0,01	0,0000	0,0000
420	0,00	21	0,03	0,69	0,08	0,12	0,0004	0,0039
440	0,04	29	0,12	3,41	1,20	0,60	0,0250	0,0713
460	0,18	38	0,22	8,41	6,74	0,30	0,0535	0,0667
480	0,36	48	0,36	17,24	17,33	0,13	0,0467	0,0464
500	0,57	60	0,57	34,09	33,91	0,30	0,1700	0,1708
520	0,80	73	0,88	63,87	57,97	0,66	0,5277	0,5814
540	1,00	86	1,00	85,95	85,95	0,78	0,7800	0,7800

Табл.3. (продължение)

560	0,96	100	0,94	93,72	95,79	0,83	0,7903	0,7732
580	0,75	114	0,77	87,98	85,80	0,88	0,6600	0,6768
600	0,50	129	0,54	69,82	64,92	0,88	0,4429	0,4763
620	0,27	144	0,32	46,38	38,84	0,78	0,2110	0,2519
640	0,14	158	0,15	23,35	22,86	0,62	0,0897	0,0916
660	0,08	172	0,05	8,85	13,02	0,43	0,0322	0,0219
680	0,04	185	0,01	2,66	8,17	0,28	0,0121	0,0039
700	0,03	198	0,00	0,69	5,66	0,17	0,0049	0,0006
720	0,02	210	0,00	0,19	3,47	0,09	0,0015	0,0001
740	0,01	222	0,00	0,05	2,07	0,06	0,0006	0,0000
760	0,01	232	0,00	0,00	1,21	0,05	0,0003	0,0000
			Sum	547,36	545,01	Sum	3,85	4,02
				Cs	1,004		$\mathbf{a_{(LED4000)}}$	**0,9622**

Коригирания фотоприемник за мезопична яркост, съответстваща на фотопична яркост 0,75 cd/m^2 (ME4) е със степен на съгласуваност f_1= 8%, за 0,5 cd/m^2 (ME5) степента на съгласуваност е f_1=7.79% и за 0,3 cd/m^2 (ME6) стойността на f_1=8,11% [4].



Фиг.2. Коригиран по Vmes фотоприемник за L=0,75 cd/m^2

Изчислените корекционни коефициенти за петте светлинни източника са показани в табл.4-табл.6

Табл. 4

Изчислени коригиращи константи на коригиран фотоприемник по Vmes, за крива на спектрална чувствителност на мезопично зрение при фотопична яркост: 0,75 cd/m^2

$\mathbf{a_{(LED3500)}}$	$\mathbf{a_{(LED4000)}}$	$\mathbf{a_{(LED6500)}}$	$\mathbf{a_{(HPS)}}$	$\mathbf{a_{(D65)}}$
0,9566	**0,9622**	**0,9498**	**0,9609**	**0,9668**

Табл. 5

Изчислени коригиращи константи на коригиран фотоприемник по Vmes, за крива на спектрална чувствителност на мезопично зрение при фотопична яркост: 0,5 cd/m^2

$\mathbf{a_{(LED3500)}}$	$\mathbf{a_{(LED4000)}}$	$\mathbf{a_{(LED6500)}}$	$\mathbf{a_{(HPS)}}$	$\mathbf{a_{(D65)}}$
0,9559	**0,9621**	**0,9534**	**0,9598**	**0,9679**

Табл. 6

Изчислени коригиращи константи на коригиран фотоприемник по Vmes, за крива на спектрална чувствителност на мезопично зрение при фотопична яркост: 0,3 cd/m^2

$\mathbf{a_{(LED3500)}}$	$\mathbf{a_{(LED4000)}}$	$\mathbf{a_{(LED6500)}}$	$\mathbf{a_{(HPS)}}$	$\mathbf{a_{(D65)}}$
0,9488	**0,9518**	**0,9439**	**0,9552**	**0,9624**

Ако използваме стандартен фотоприемник коригиран само по фотопичната спектрална чувствителност на човешкото око V(λ), коригиращите константи ще бъдат различни за всеки тип улица. Резултатите са показани в табл.7.

Табл. 7

Изчислени коригиращи константи на коригиран фотоприемник поV(λ),за криви на спектрална чувствителност на мезопично зрение при фотопична яркост: 0,75 cd/m^2; 0,5 cd/m^2; 0,3 cd/m^2

V(λ)	$a_{(LED3500)}$	$a_{(LED4000)}$	$a_{(LED6500)}$	$a_{(HPS)}$	$a_{(D65)}$
ME4	**0,9212**	**0,9220**	**0,8645**	**1,0192**	**0,8728**
ME5	**0,9176**	**0,9206**	**0,8507**	**1,0466**	**0,8512**
ME6	**0,9130**	**0,9188**	**0,8329**	**1,0856**	**0,8238**

Табл.8

Изчислени коригиращи константи на коригиран фотоприемник с филтър Baader, за криви на спектрална чувствителност на мезопично зрение при фотопична яркост: 0,75 cd/m^2; 0,5 cd/m^2; 0,3 cd/m^2

V(λ)	$a_{(LED3500)}$	$a_{(LED4000)}$	$a_{(LED6500)}$	a(HPS)	a(D65)
ME4	**0,9364**	**0,9302**	**0,9844**	**0,7533**	**1,0737**
ME5	**0,9328**	**0,9288**	**0,9687**	**0,7735**	**1,0471**
ME6	**0,9281**	**0,9269**	**0,9484**	**0,8023**	**1,0135**

Възможно е да използваме филтър Baader, който ограничава само лъчистият поток, но не коригира точно поV(λ). Резултатите са показани в табл.8.

2. Заключение

Разгледаният алгоритъм за изчисляване на калибровъчни константи на фотоприемници, използвани за измерване на мезопична яркост, ще намери приложение при контрол на улично осветление, проектирано по мезопична яркост.

Изчислените коригиращи константи за измервателна апаратура за мезопична яркост ще се използват при реални измервания на три категории улици (ME4, ME5, ME6). Стойностите на константите са малки поради приблизително точното коригиране по Vmes(λ) на съответните фотоприемници. Използването на коригиран по фотопичното зрение фотоприемник също е възможно.

Предимството е, че чрез използване на дадените константи в табл.7 ще се получават директно мезопичната яркост, а без тях – нормираната фотопична яркост.

Получените константи в табл. 8 позволяват измерване с един филтър към CCD-камерата на трите нива мезопична яркост.

Литература

[1] CIE AD/ST 023/E:2012„*Characterization of thePerformance of Illuminance Metersand Luminance Meters*“

[2] CIE 191:2010 “*Recommended System for Mesopic Photometry Basedon Visual Performance*”

[3] Пачаманов А. „*Измерване на скотопична и мезопична яркост*“ IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол

[4] Пачаманов А., Д. Пачаманова. „*Оптимизационни модели за спектрална корекция на фотоприемници чрез пълно и частично филтриране на потока*“. IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол

Автори: маг. инж. Димитър Тодоров Павлов, докторант, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, отг. изпитател в НИИКЛ “Осветителна техника”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *dpavlov@tu-sofia.bg, www.onilot.com;* инж. Ангел Саракинов Пачаманов, проф. д-р, катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, р-л НИИКЛ “Осветителна техника”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *pach@tu-sofia.bg, www.onilot.com*

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

ОТНОСНО МЕТОД ЗА КАЛИБРИРАНЕ НА ТЕНЗОМЕТРИЧНА ИЗМЕРВАТЕЛНА СИСТЕМА

Емил Йончев, Илия Мрянков

Резюме: *В доклада е представен метод за статично калибриране на тензометрична измервателна система. Разработено е механично устройство за създаване на деформации в еластична греда с контролируема относителна деформация в местата където са залепени тензорезисторите. Разработен е виртуален инструмент в програмната среда LabVIEW за управление на устройството за събиране, обработка и визуализиране на данните, в различните режими на работа на системата. Показан е алгоритъм посредством, който на базата на експериментални резултати се определят коефициентите даващи връзката между полученото на изхода на системата електрическо напрежение и зададената относителна деформация.*

Ключови думи: *тензорезистори, устройство за събиране на данни, LabVIEW, калибриращо устройство с еластична греда*

ABOUT THE METHOD OF CALIBRATION OF STRAIN GAUGE MEASURING SYSTEM

Emil Iontchev, Iliya Mryankov

Abstract: *The article presents a method for static calibration of measurement system using strain gauge. It is developed a mechanical device to create distortions in the elastic beam with controllable relative deformation in the places where strain gauges are glued. It is developed a virtual instrument in LabVIEW for device management to collect, treatment and visualization of data in different modes of operation of the system. It is indicated an algorithm which, based on experimental results determine the coefficients gives the relationship between the output electrical voltage and the set relative deformation.*

Keywords: *strain gauges, data acquisition devices, LabVIEW, calibration unit with elastic beam*

1. Въведение

Изучаването на поведението на механични конструкции включва измерването на деформациите в определени точки от тях. Това се извършва с тензорезистори, залепени в места интересни за конструктора на устройството. Информацията за стойността им е важна за конструкторите защото тя може да бъде използвана за определяне на напреженията, на които е подложен съответния еле-

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

ISSN 1311-0829

мент. Освен за определяне на механични напрежения, деформацията на механичните еластични преобразуватели (МЕП) може да бъде използвана за измерване на сила, налягане, скорост на флуид, ускорение, температура и др. [1][2]. Получаването на стойността на физичната величина предизвикваща деформацията, става с помощта на конкретна измервателна система, от която се очаква получената стойност на изхода й да съответства на големината на величината действаща на входа. Това съответствие се установява посредством калибриране на измервателната система. Този процес е лесен когато измерваната величина има съответна стандартна величина, например – дължина, тегло и т.н. При измерването на деформация не може да се използва директен метод за калибриране поради липса на стандартна такава величина. В този случай се използват:

- опитна постановка с възможност за задаване на определена деформация в единици за относителна деформация;
- калибриращ сигнал от тензометричния усилвател;
- посредством калибриращ шунт;
- посредством уред за калибриране [3].

При използване на тензорезистори относителната деформация на МЕП се трансформира в промяна на съпротивлението му посредством израза

$$\frac{\Delta R}{R} = K\frac{\Delta L}{L}, \tag{1}$$

където K е коефициент на тензочувствителност и за повечето тензорезистори е със стойност 2; L е дължина на МЕП, ΔL е промяната в дължината на МЕП. Най-голямата стойност на относителната деформация е $\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \approx 5.10^{-3}$. При К=2 се получава и максималната промяна в стойността на съпротивлението на тензорезистора $\frac{\Delta R}{R} = 0.01$. Това налага включване на тензорезисторите в Уинстонов мост и използване на тензоусилвател и допълнителна обработка на сигнала за получаване на измерваната физична величина. При четири активни тензорезистора подложени на различни деформации зависимостта на промяната на изходното напрежение се определя с израза [3]

$$\frac{U_o}{U_s} = \frac{K}{4}\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4\right), \tag{2}$$

където U_o е изходния сигнал на моста; U_s е захранващо напрежение.

При калибриране посредством калибриращ сигнал, същият се подава на входа на тензоусилвателя. Неговото ниво се задава в $\frac{mV}{V}$ или $\frac{\mu m}{m}$. При този метод не се тестват свързващите проводници и самите тензорезистори.

При калибриране посредством шунт, паралелно на един от тензорезисторите в мостта се свързва резистор, в резултат на което се получава разбалансиране на мостта, което е еквивалентно на деформация със стойност определена с израза [3]

$$\varepsilon' = \frac{1}{K}\left(\frac{R_p}{R+R_p} - 1\right).10^6\left[\frac{\mu m}{m}\right], \qquad (3)$$

където R_p е съпротивлението на шунта.

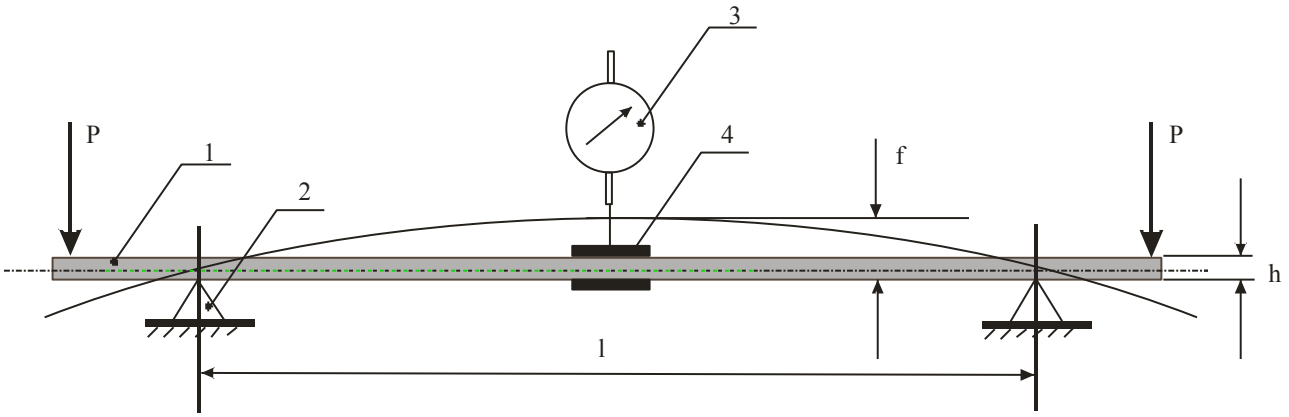
За разлика от предишният метод в този случай при калибрирането се включват елементите на цялата измервателна система.

При използване на уред за калибриране, същият се включва на мястото на тензорезисторите или съответен преобразувател. За разлика от предишния метод, където шунтиращият резистор може да има произволна стойност (стига само да е точен), тези устройства са разработени за работа със стандартни стойности на резисторите – 120Ω и 350Ω. Използват се различни техники за калибриране при различните устройства. Някои от устройствата имат различни нива на изходния сигнал, с възможност всеки от обхватите да се раздели на подобхват от 10%, като по този начин се тества линейността на измервателната апаратура.

2. Калибриращо устройство

Калибрирането се извършва с помощта на устройство, чиято основна част се явява еластичен елемент на повърхността, на който с помощта на натоварваща система се създават деформации с определена големина.

Разработеното и използвано при експериментите устройство, притежава еластична греда с постоянно сечение, изработена от въглеродна стомана - поз.1 и подпряна на две опори - поз.2. Конструкцията му е показана на фиг.1.



Фиг.1. Калибриращо устройство с еластична греда

Гредата се натоварва в двата си края с равни по големина вертикални сили, създадени от теглата на калибрирани тежести. Работния участък на еластичната греда се намира между двете опори. В него действа огъващ момент с постоянна големина по целия работен участък. Максималната деформация, която се получава в средата на гредата се измерва с помощта на индикаторен часовник - поз.3.

Зависимостта, от която се определя относителната деформация, има вида [4]

$$\varepsilon = 4f\frac{h}{l^2}, \qquad (4)$$

където f - максимална деформация в гредата; h - височина на напречното сечение от профила на гредата; l - разстояние между опорите. Върху еластичната греда са залепени два тензорезистора – поз.4, свързани в полумост.

3. Измервателна система

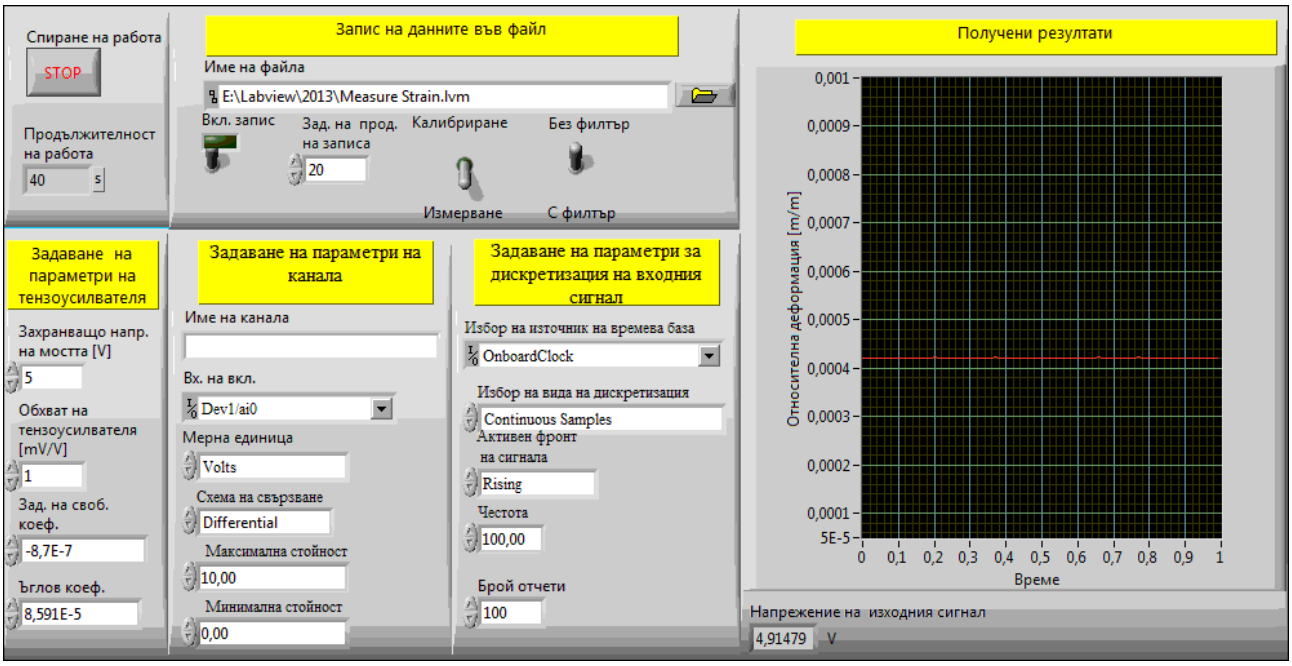
При измерване на деформации обичайната измервателна схема включва, тензорезистори залепени върху МЕП, тензоусилвател, съединителни проводници, устройства за въвеждане на получените данни в компютър за последваща обработка. Всеки елемент от измервателната верига влияе на получения електрически сигнал, затова при калибриране е желателно да включат всички елементи от системата. На фиг.2 е показана принципната схема на използваната измервателна система за определяне на относителна деформация.

Фиг.2. Измервателна система

С позиция 1 е означен уреда за задаване на деформация с определена стойност, описан в точка 2. Той се включва на мястото на МЕП и залепените върху него тензорезистори, като по този начин с калибрирането се определят коефициентите на преобразуване на цялата система, след определяне на изходното напрежение на тензоусилвателя U_o, при подадена на входа деформация ε.

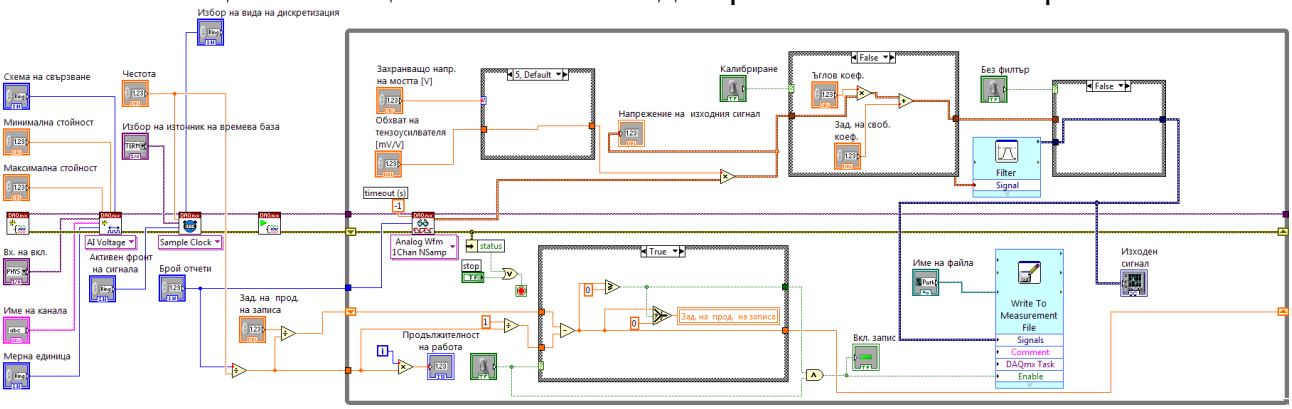
С позиция 2 е означен микрометър, с който се определя деформацията на гредата. С позиция 3 е означен тензоусилвател KWS 3073 на фирма HBM [5]. С елементите на лицевия му панел има възможност за избор на схема на свързване на тензорезисторите – полумост или мост, големината на захранващото напрежение – 1, 2,5 или 5V, да се променя коефициента на усилване, елементи за първоначално нулиране на моста и индикатор за големината на модулацията на изходния сигнал на мостта. С позиция 4 е показано устройството на NI USB 6211 [6], което се включва към изхода на тензоусилвателя и се използва за дискретизиране на данните и тяхното въвеждане посредством USB кабел в персона-

лен компютър позиция 5, за последваща им обработка. За неговото конфигуриране е използван виртуален инструмент реализиран в програмната среда LabVIEW. Лицевият му панел е показан на фиг.3.



Фиг.3. Лицев панел на виртуалния инструмент

Съответстващата на лицевия панел блок диаграма е показана на фиг.4.



Фиг.4. Блок диаграма на виртуалния инструмент

Той е разделен на шест модула, които изпълняват различни функции. С модула «Задаване на параметри на тензоусилвателя» се повтарят въведените стойности от лицевия панел на тензоусилвателя и определените коефициенти при калибриране. С елементите от модула «Задаване на параметри на канала» се определя физически къде е включен сигнала от тензоусилвателя, схемата на включване и обхвата на входния сигнал. В модула «Задаване на параметри на дискретизация на входния сигнал» са разположени елементите за избор на източник на времева база за извършване на дискретизация, честотата на дискретизация, за избор на непрекъсната дискретизация или да се получат определен брой отчети. С елементите в модула «Запис на данните във файл» се избира дали с измервателната система ще се извърши калибриране или измерване, дали данните ще бъдат

филтрирани или не. Избира се кога данните да бъдат записани в указан файл и с каква продължителност да бъде този запис. Данните се записват във формат, които може да бъде прочетен от всяка текстообработваща програма, с което се улеснява тяхното прехвърляне в друга програмна среда, за последваща обработка. Текущия резултат от измерването се визуализира на екрана на виртуалния осцилоскоп.

4. Експериментални резултати

За задаване на относителната деформация е използвана калибриращото устройство, показана на фиг.1. Деформацията на гредата е създавана от тежести закачени в нейния край, като тяхната маса съответно е била: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,250; 1,5; *kg*. Резултатите за деформацията на гредата отчетени с индикаторния часовник са дублирани и показани в табл.1. Чрез зависимостта (4) са изчислени и съответните относителни деформации при h=3mm и l=200mm.
Към гредата са залепени два активни тензорезистора на фирма HBM с активно съпротивление R=120Ω±0,2% и коефициент на усилване K=2,06. Свързани са в температурно компенсиран външен полумост за измерване на разноименни деформации. За всяка една деформация е правен запис на полученото на изхода на тензоусилвателя напрежение U_o с честота на дискретизация 100Hz и продължителност на записа 20s. На получените данни за всяка деформация е намерена средната стойност, която е приета за стойност на изходното напрежение. Получените елктрически напрежения на изхода на усилвателя са показани в табл.1.

Табл.1. Получени резултати

№	P	f опит1	f опит2	f ср	$\varepsilon(f)$ср	U_o опит1	U_o опит2	U_o ср	$\varepsilon_{изм1}$	$\varepsilon_{изм2}$
изм.	*N*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm/mm*	*V*	*V*	*V*	*mm/mm*	*mm/mm*
1	0.98	0.138	0.133	0.136	4,07E-05	0.468	0.493	0.481	3,93E-05	4,15E-05
2	1.96	0.278	0.267	0.273	8,18E-05	0.944	0.970	0.957	8,02E-05	8,24E-05
3	2.94	0.402	0.403	0.403	1,21E-04	1.424	1.443	1.433	1,21E-04	1,23E-04
4	3.92	0.532	0.541	0.537	1,61E-04	1.900	1.923	1.912	1,62E-04	1,64E-04
5	4.91	0.689	0.691	0.690	2,07E-04	2.378	2.398	2.388	2,03E-04	2,05E-04
6	6.87	0.972	0.953	0.963	2,89E-04	3.350	3.347	3.349	2,87E-04	2,87E-04
7	8.83	1.23	1.228	1.229	3,69E-04	4.302	4.295	4.299	3,69E-04	3,68E-04
8	9.81	1.349	1.362	1.356	4,07E-04	4.751	4.762	4.757	4,07E-04	4,08E-04
9	12.26	1.692	1.701	1.697	5,09E-04	5.930	5.968	5.949	5,09E-04	5,12E-04
10	14.72	2.043	2.039	2.041	6,12E-04	7.116	7.143	7.129	6,10E-04	6,13E-04

За определяне на зависимостта между относителната деформация ε на гредата работеща в нейната еластична зона на едномерно напрегнато състояние и измереното напрежение U_o на изхода на тензометричния усилвател е използвана линейна регресионна функция. Използвани са получените резултати за изчислената по формула (4) осреднена относителна деформация $\varepsilon(f)_{ср}$ и измереното осреднено напрежение $U_{o\,ср}$ на изхода на тензометричния усилвател, регистрирано с устройството NI USB - 6211. Направена е статиситическа обработка на резул-

татите с модула Regression от Excel и получените резултати са представени в табл.2.

Табл.2. Резултати от статистическата обработка

SUMMARY OUTPUT						
Regression Statistics						
Multiple R		0.99				
Standard Error		1.69E-06				
Observations		10				
ANOVA						
	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*	
Regression	1	3.282E-07	3.28E-07	114293.7	6.561E-18	
Residual	8	2.297E-11	2.87E-12			
Total	9	3.282E-07				
	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*
Intercept	-8.70E-07	9.877E-07	-0.8810	0.404	-3.148E-06	1.407E-06
X Variable 1	8.591E-05	2.541E-07	338.073	6.56E-18	8.532E-05	8.649E-05

Получено е следното регресионно уравнение

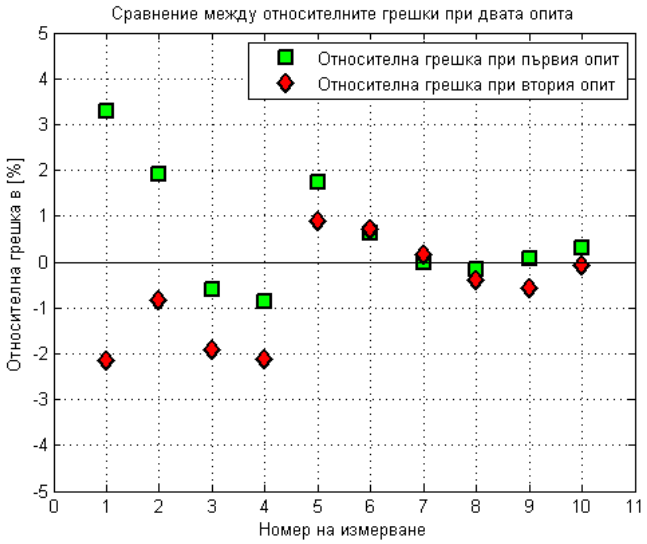
$$\varepsilon = -8.7\,10^{-7} + U\ 8.591.10^{-5}. \qquad (5)$$

Проверка за значимост на коефициентите му е извършена по t-критерия на Стюдънт. Ъгловият коефициент пред U е значим, защото е изпълнено условието $P\text{-}value<\alpha$ при избрано ниво на значимост α=0,05. За коефициента пред свободния член, съгласно същия критерий се вижда, че $P\text{-}value>\alpha$ и вероятността той да има нулева стойност е изключително голяма и спокойно може да бъде отхвърлен от регресионното уравнение. Това има своето логично обяснение с факта, че при нулево напрежение в материала трябва да има и нулева деформация.

Проверка за адекватност на регресионното уравнение се извършва по критерия на Фишер. Изпълнено е условието *Significance* $F<\alpha$ (избрано ниво на значимост α=0,05). Получената оценка на коефициента на множествена корелация е R=0,99 и се приближава до своя максимум. Определени са и доверителните интервали за коефициентите на регресия.

На фиг.5 е представена графика на относителната грешка в % между измерената от двете серии опити относителна деформация от тензометричната измервателна система и осреднената относителна деформация $\varepsilon(f)_{cp}$ от калибриращото устройство.

Определените коефициенти в модела се въвеждат в модула «Задаване на параметри на тензоусилвателя» на лицевия панел на виртуалния инструмент и се използват при измерванията, за директно отчитане на относителната деформация.



Фиг.5. Относителните грешки от двата опита

5. Заключение

Реализирана е работеща измервателна система и е разработен алгоритъм за нейното калибриране. На същата е извършено калибриране в резултат, на което е получено регресионно уравнение даващо връзка между контролируемата относителна деформация и отчетеното електрическо напрежение от измервателна система, коефициентите на което са статистически оценени. Определени са коефициентите на уравнението, които се въвеждат от лицевия панел на виртуалния инструмент при извършване на реални измервания с разгледаната система.
Представената тензометрична измервателна система в комплект с калибриращо устройство и представеният метод за статично калибриране може да бъдат използвани и в процеса на обучение на студентите за измерване на механични напрежения.

Литература

[1] Analog Devices, Autex Ltd., Practical design techniques for sensor signal conditioning, pp. 4-1

[2]] *http://www.keithley.com*

[3] Hoffmann Karl, An introduction to measurements using strain gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989

[4] Леонтьев Михаил, Тензометрирование в авиационных газотурбинных двигателях, Издательства МАИ, Москва, 2001

[5] *http://www.hbm.com/*

[6] *http://see.ni.com/*

Автори: Емил Иванов Йончев, гл. ас. д-р, катедра «ПТСМС», ВТУ «Т. Каблешков», E-mail address: *e_iontchev@yahoo.com*; Илия Георгиев Мрянков, гл. ас. д-р, катедра «ПТСМС», ВТУ «Т. Каблешков», E-mail address: *iliamr@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р И. Долапчиев

ПРОМЕНЛИВОТОКОВИ ДВИГАТЕЛИ ЗА ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА С БАТЕРИЙНО ЗАХРАНВАНЕ

Емил Соколов, Дило Дилов

Резюме. *Представени са основните конструктивни характеристики на серите трифазни асинхронни двигатели с различни приложения: тягови, помпени и серводвигатели за електрокари с напрежение на батерията 48 и 80 Vdc; двигатели на голфкари (48 Vdc); двигатели за електромобили (200 и 320 Vdc). Анализирани са проблемите и решенията, свързани с оразмеряването и оптимизацията на двигателите според критерии за енергийна ефективност и регулиране на скоростта.*

Ключови думи: *асинхронни двигатели, превозни средства с батерийно захранване.*

AC MOTORS FOR BATTERY POWERED VEHICLES

Emil Sokolov, Dilo Dilov

Abstract: *The main construction features of the three-phase induction motor series are presented. They have different applications in the battery powered vehicles: traction and pump motors as well as servo steering motors for electric forklift trucks with battery voltage 48 and 80 Vdc; golf car motors (48 Vdc); electric car motors (200 and 320 Vdc). The problems and solutions by the design and optimization of the motors according to criteria for energy efficiency and speed control are analyzed.*

Keywords: *induction motors, battery powered vehicles.*

1. Въведение

Капрони АД – гр. Казанлък е водещ производител на хидравлични елементи и системи с приложение в мобилното и стационарното индустриално оборудване. Една иновация на фирмата предвижда разработването на серии променливотокови двигатели за превозни средства с батерийно захранване. Първият етап от програмата включва създаването на серии трифазни асинхронни двигатели с честотно регулиране и векторно управление, които да заменят съществуващите задвижвания с колекторни двигатели за постоянен ток в различни типове електрокари. Освен това разработват се електрозадвижвания за голфкари и електромобили.

Предимствата на регулируемите променливотокови задвижвания в електрическите превозни средства с батерии са добре известни. Към тях се отнасят: по-висок кпд и ниво на надеждност, по-дълъг живот на двигателя и батерията, по-го-

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

ISSN 1311-0829

лям пробег между две зареждания, по-малки сервизни разходи, по-ниски вибрации и шум. Важни качества са също плавното изменение на скоростта, високата претоварваща способност, бързодействието и точността в установени и динамични режими. Много ефективен е процесът на спиране с регенерация на енергия към батерията. Благоприятно е обстоятелството, че при еднакви номинални стойности на мощността и скоростта, асинхронните двигатели имат по-малка маса и габаритни размери в сравнение с колекторните двигатели за постоянен ток. По тази причина замяната на постояннотоковите двигатели с асинхронни може да се извърши без да е необходимо преустройство на съществуващите електрокари.

2. Ред на мощностите

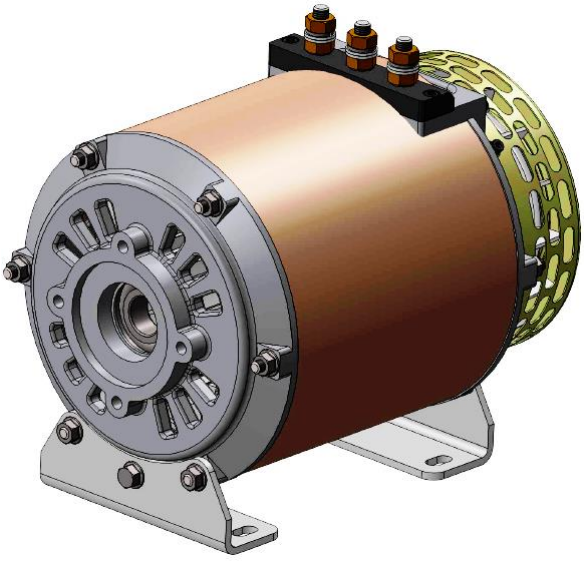
Редът на мощностите на асинхронните двигатели с приложение в електрокарите е съобразен с мощностите на колекторните постояннотокови двигатели. Същото се отнася за присъединителните размери.

Серията тягови двигатели е проектирана за две номинални скорости на въртене. Тяговите двигатели със скорост 1400 об/мин имат номинални мощности 4, 6, 9, 12 и 15 kW. Те се изпълняват в две модификации – за напрежение на батерията 80 V и 48 V. Тяговите двигатели с мощности 5, 6 и 8 kW са разработени с номинална скорост 2300 об/мин при напрежение 48 Vdc.

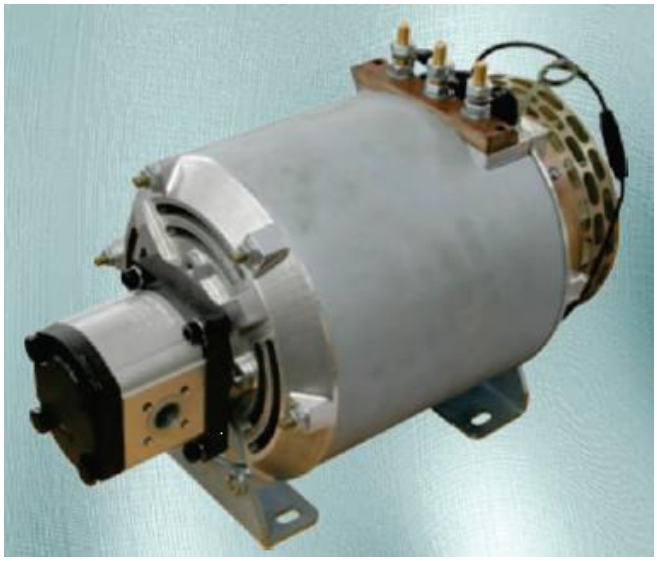
Всички помпени електрокарни двигатели са с номинална скорост 2800 об/мин. Тези с мощност 6,5 и 10 kW имат модификации за напрежение на батерията 80 V и 48 V, а двигателят с мощност 14,5 kW е за батерия 80 V.

Двигателите за сервозадвижване са с номинална мощност 0,75 kW при 1500 об/мин и напрежения на батерията 48 V и 80 V.

Асинхронните двигатели за електрокари са изпълнени със степен на защита IP21 съгласно IEC 60034-5. Тяговите двигатели са предназначени за режим на работа S2 – 60 min, а помпените – за режим на работа S2 – 15 min според IEC 60034-1.

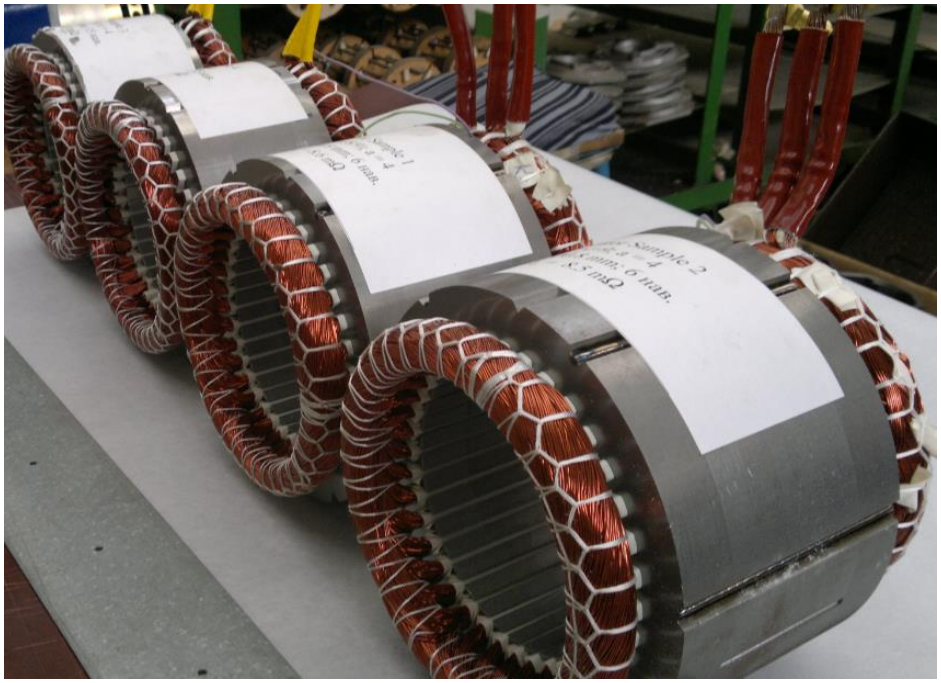


Фиг.1. *Тягов асинхронен двигател*



Фиг.2. *Помпен асинхронен двигател*

На фиг.1 е показано едно от конструктивните изпълнения на тягов двигател, а на фиг.2 е даден външният вид на помпен двигател с хидравлична помпа. Конструктивните форми на двигателите са патентно защитени.
Двигателите се охлаждат чрез самовентилация – код IC01 съгласно IEC 60034-6. Тяговите двигатели са снабдени с 64 импулсен енкодер за обратна връзка по скорост, интегриран в задния лагер. Термичната защита е реализирана с термистор в статорната намотка (стандартна екипировка), който задейства защитата при достигане на температура 130^0C. Изолацията на статорната намотка има клас на топлоустойчивост F.



Фиг.3. *Статорни пакети на електрокарни двигатели*

На фиг.3 са показани статорните пакети на електрокарни двигатели с положена и импрегнирана статорна намотка.
Двигателите за голфкари са проектирани за номинални мощности 3 kW и 4 kW при 3000 об/мин и напрежение на батерията 48 V.
Асинхронните двигатели за електромобили са предназначени за конверсия и вграждане в конвенционални автомобили чрез замяна на двигателя с вътрешно горене. Приложението им е ограничено за движение на къси разстояния в града. Номиналната скорост на двигателите е 2600 об/мин, а номиналните мощности са 16,5 kW (200 Vdc) и 25 kW (320 Vdc).

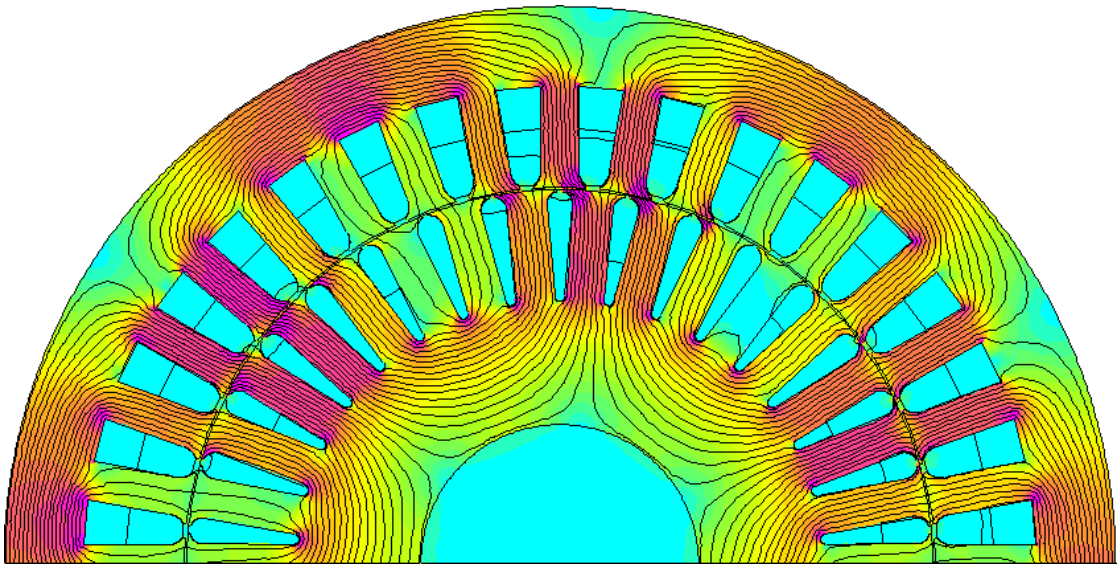
3. Проблеми и решения при проектирането

Изброените по-горе асинхронни двигатели са разработени в пет габарита със стандартна геометрия на статорните и роторните листове. Това означава, че проектирането се извършва със зададени вътрешен и външен диаметър на листовете, с определен брой и размери на статорните и роторните канали.
Основните затруднения, които възникват при проектирането, са свързани с нис-

ката стойност на напрежението и значителната стойност на тока, особено при по-големите мощности. Това налага използването на максимален брой паралелни клонове и елементарни проводници. От друга страна броят на навивките в секция е относително малък. Затова се получават съществени разлики в електромагнитните натоварвания между отделните варианти с изпълним брой на навивките на статорната намотка. По тази причина някои от вариантите отпадат като нереалистични. Възможностите за вариране на независимите променливи са ограничени и от условията за минимални габарити и маса, както и от технологични фактори. При търсенето на оптимални решения могат да бъдат изпълнени версии с различни по вид и схема на свързване статорни намотки, както и с различен брой на полюсите. Обаче в част от случаите се нарушават изискванията за унификация. От казаното до тук следва, че в отделните варианти се получава скокообразно изменение на наблюдаваните параметри и характеристики.

Частични оптимизационни задачи са решени при критерий максимален кпд и ограничения за токовата плътност в статорната и роторната намотка. Тези ограничения са наложени за да се постигнат допустими температури на намотките. Стойностите на кпд на двигателите са на равнището на клас IE2 (High efficiency) според IEC 60034-30.

В процеса на проектиране са използвани, както аналитични методи за изчисление, така и моделиране с метода на крайните елементи. С помощта на традиционните методи са определени параметрите на заместващата схема, токовете в намотките, загубите, мощностите и др. По такъв начин са пресметнати величините, необходими за построяването на числените модели. Двете страни на този комбиниран подход на проектиране се допълват взаимно.



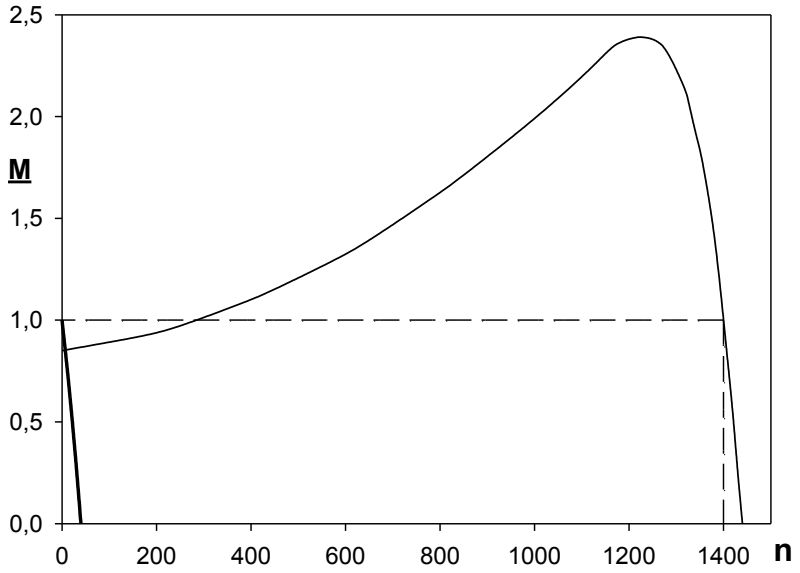
Фиг.4. *Картина на магнитното поле в тягов двигател 6 kW при номинално натоварване*

На фиг.4 е представена картината на магнитното поле в напречното сечение на тягов асинхронен двигател с мощност 6 kW при номинално натоварване. Подобни модели са съставени за различна степен на натоварване, както и за дол-

ната и горната граница на честотния диапазон. Получените резултати позволяват да се оцени разпределението на магнитната индукция в участъците на магнитната верига, да се определят магнитният поток през въздушната междина и електромагнитният момент.

4. Претоварваща способност и пусков момент

За номиналната скорост (фиг.5) претоварващата способност на двигателя се определя от кратността на максималния момент. Кратността на максималния момент обикновено е по-голяма от 2, при което статорният ток е над два пъти номиналния ток на двигателя. Краткотрайното претоварване на задвижването зависи и от максималния ток на инвертора, който е 2 пъти по-голям от номиналния му ток. При съгласувани номинални токове на двигателя и инвертора претоварващата способ



Фиг.5. *Механична характеристика на двигателя с постоянни параметри*

Пусков момент, равен на номиналния момент (фиг.5), се постига при изпълнение на условията:

$$f = f_{2н} = s_н f_н ;\;\; E = s_н E_н \tag{1}$$

От (1) следва, че магнитният поток при пускане е равен на номиналния магнитен поток, следователно намагнитващият ток I_m в двата случая е еднакъв.

Приведеният роторен ток при пускане ($s = 1$) е:

$$I'_2 = \frac{s.E}{\sqrt{r'^2_2 + (s\omega.L'_2)^2}} = \frac{s_н E_н}{\sqrt{r'^2_2 + (s_н \omega_н L'_2)^2}} = I'_{2н} \tag{2}$$

Роторните токове при пускане и номинален режим са равни и дефазирани на един и същ ъгъл спрямо е.д.н.:

$$\psi_2 = arctg\,\frac{sx'_2}{r'_2} = arctg\,\frac{s_н \omega_н L'_2}{r'_2} = \psi_{2н} \tag{3}$$

Горното доказателство показва, че при изпълнение на (1) пусковият ток е равен на номиналния ток:

$$I_1 = I_{1н} \tag{4}$$

Електромагнитният пусков момент е:

$$M_\delta = \frac{3r_2' I_2'^2}{\Omega_1} = \frac{3r_2' I_{2н}'^2}{s_н \Omega_{1н}} = M_{\delta н} \tag{5}$$

Напрежението за пускане с номинален ток и момент се изчислява по (7).

В общ случай при същата честота $f_{2н}$ може да се зададе е.д.н. E над стойността, определена по (1). Тогава пусковият ток е

$$I_1 = \frac{E}{|Z_{23}|}\ , \tag{6}$$

където Z_{23} е импедансът на паралелно свързаните вторичен и намагнитващ контур на заместващата схема. Напрежението на една фаза е

$$U_ф = |Z|.I_1\ , \tag{7}$$

където Z е импедансът на фазата при честота $f_{2н}$.

Честота е ниска и падът на напрежение в реактанса на разсейване на статорната намотка е малък, а cos φ е близък до единица. Затова фазното напрежение при пускане може да се изчисли приблизително така:

$$U_ф \approx E + r_1 I_1 \tag{8}$$

Напрежението, определено по (8), е малко по-голямо от това по (7).

За пускане с по-голям момент се увеличава напрежението и е.д.н. при същата честота. Повишават се магнитният поток, намагнитващият ток и токовете в статорната и роторната намотка. Редът на изчисление е същият, като за пусков момент, равен на номиналния. В долната таблица е направено сравнение на изчислените стойности на е.д.н., напрежението, кратностите на тока и на момента при номинален товар и при пускане на тяговия двигател 6 kW.

	Номинален товар $n_н$	Пускане $n = 0$		
f , Hz	72	2	2	2
$\frac{E}{f}$, V/Hz	0,374	0,374	0,465	0,568
$\frac{U_ф}{f}$, V/Hz	0,4	0,76	1,055	1,38
$\frac{I_п}{I_н}$	1	1	1,5	2,1
$\frac{M_п}{M_н}$	1	1	1,8	2,5

Отношението напрежение–честота при пускане нараства спрямо същото отношение при номинално натоварване поради IR компенсацията. По-големият пусков момент при относително по-малък пусков ток е важно предимство.

5. Технологични аспекти

В случая технологичните аспекти могат да бъдат разгледани в няколко направления: решения, свързани с използваните материали и кооперираните изделия; технологични съоръжения и методи; комплектация с контролери; стендови и полеви изпитвания.

Най-напред следва да се поясни защо са използвани готови статорни пакети и заляти ротори. Това се налага заради значителната номенклатура на двигателите. Също така няма данни към кои типоразмери ще бъде проявен по-голям интерес от страна на пазара. Геометрията на стандартните статорни и роторни листове може да бъде подобрена за нашите двигатели, но едно решение в тази посока не е оправдано на настоящия етап.

Изборът на марката на електротехническата стомана и материалът за роторния кафез представляват технико – икономически задачи. Първите прототипи са изпълнени от листова стомана 0,5 mm със специфични загуби под 5 W/kg при индукция 1,5 T и честота 50 Hz и с интензитет 2100 A/m при 1,6 T. Роторният кафез е от чист алуминий (99,7 %). Модификации с ляти медни кафези се предлагат като опция. Богатият технологичен опит и съоръженост на фирмата Капрони АД позволява да се извършва експресен анализ на химическия състав на металите в рамките на входящия контрол на материалите.

Въздушната междина оказва най-голямо влияние върху стойността на намагнитващия ток на асинхронните двигатели. От своя страна намагнитващият ток е определящ за тока и загубите в статорната намотка и за фактора на мощността. Изработването на асинхронни двигатели с оптимална въздушна междина зависи от конструкцията на лагеруването и от нивото на производствения процес. Избраната конструктивна схема и точността при механичната обработка на статорните и роторните пакети, лагерните щитове и вала създават възможността за постигането на малка и равномерна въздушна междина на двигателите.

Също така от точността на обработката и монтажа и от качеството на лагерите зависят загубите от триене. Към тях се добавят вентилационните загуби. Измерванията на механичните загуби в широк диапазон на скоростта показаха много добри резултати за нашите двигатели.

Машинното навиване и полагане на секциите, коефициентът на запълване на канала и качеството на импрегнацията на статорната намотка определят до голяма степен топлоотдаването и температурното състояние на намотката. От температурата зависи съпротивлението на намотката, загубите в нея и кпд.

Програмата на стендовите изпитвания включва измерването на характеристиките на празен ход и номинално натоварване. Режимът с номинално натоварване за измерване на температурата на двигателите завършва с проверка на претоварващата способност. Провежда се също изпитване при минимална и максимална скорост.

По време на полевите изпитвания прототипите са монтирани върху електрокари. Продължителните полеви изпитвания се провеждат по определена програма, която съдържа цикличността на работа и видът на натоварването.

6. Заключение

Може да се счита, че първият етап от иновацията на Капрони АД по създаването на нова генерация променливотокови електрозадвижвания е успешен. Положителните резултати от изпитването на прототипите са потвърждение на усилията при разработването на конкурентни, енерго-ефективни асинхронни двигатели за превозни средства с батерийно захранване. Дейността по проектирането, конструирането, производството и изпитването на образците е насочена към изпълнението на заложените показатели на двигателите и осигуряването на висок кпд и ниво на надеждност. Предложена е гама от променливотокови задвижвания на електрокари, голфкари и електромобили. Приключеният етап позволи да се натрупа опит, да се ускори внедряването и се реализират продажби, да се създаде база, която да послужи при следващите разработки.

Предстоящите задачи обхващат разширяване и допълване на сериите, като се отчитат и предложенията на клиентите. Приоритет е и работата по изпълнението на асинхронни двигатели с по-висока степен на защита. За някои от типоразмерите се налага разработването на нови версии.

В перспектива се извършва проектиране на безконтактни двигатели за постоянен ток и синхронни двигатели с възбуждане от постоянни магнити. Тези двигатели притежават по-голяма плътност на мощността и по-висок кпд от асинхронните двигатели и са предпочитани за някои променливотокови задвижвания на електрически превозни средства.

Литература

[1] Капрони АД php.mht
[2] Prestolite Asia. Motion & Control System – AC Motors
[3] AMRE. General Catalogue AC Motors
[4] Zapi Group, AC motors & Controllers
[5] C.F.R. – Modena, Italy
[6] Sauer-Danfoss AC Motors
[7] Crown AC Motors, USA
[8] EVE. Electro Vehicles Europe
[9] Sokolov E., M. Minchev, S. Bratkov. Traction drive of electric truck with induction motor, Proceedings of Ninth International Conference on Electrical Machines, Drives and Technologies, Varna, 1999.
[10] Sokolov E., Variable Speed AC Drives, Електротехника и Електроника, 11-12, 2008.

Автори: Емил Соколов, проф. дтн, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ersokolov@abv.bg*; маг. инж. Дило Дилов, design engineer, Капрони АД, E-mail address: *ddilov@caproni.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р П. Ризов

СИМУЛАТОР НА SCADA СИСТЕМА ЗА ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОСЪОРЪЖЕНИЯ

Емилия Димитрова

Резюме: *За мониторинг и пряко автоматично управление на процесите в метрополитена на гр. София и преди всичко за осигуряване безопасността на пътниците е внедрена SCADA система ДИСИМ, състояща се от няколко функционално обособени системи, една от които е ДИСИМ-Е за управление на тяговите понижаващи подстанции и електросъоръженията. В доклада е проектиран и изграден симулатор на тази система, който предоставя възможност на обучаемите да добият представа и знания за реално приложение на система за управление на изключително сложен промишлен обект, за структурата на системата и за нейните богати функционални възможности. Може да се използва за обучение на студенти и за повишаване на квалификацията на специалисти от експлоатацията на метрополитена и НК ЖИ.*

Ключови думи: *SCADA системи, метрополитен, тягови подстанции*

SIMULATOR OF SCADA SYSTEM FOR REMOTE CONTROL ON ELECTRICAL EQUIPMENT

Emiliya Dimitrova

Abstract: *SCADA system DISIM is implemented to monitor and direct automatic control on the processes and foremost to ensure the safety of passengers in Sofia Metropolitan. It consists of few independent systems, one of which is DISIM-E for control on the traction substations and electrical equipment. In the report a simulator based on this system was designed and built. It offers an opportunity for learners to gain an idea and knowledge of a real application of a system managing highly complex industrial site, of its structure and rich functionality. It can be used for training students and specialists from the operation of underground and NRIC.*

Keywords: *SCADA systems, underground, traction substations*

1. Въведение

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) - Диспечерски контрол, управление и събиране на данни) се възприема като основния и все по-перспективен метод [1] за автоматизирано управление на сложни динамични процеси в жизнено важни и критични области от гледна точка на безопасността и надеждността. Въз основа на този метод се строят крупни автоматизирани системи за мониторинг и управление на разсредоточени обекти, като например в транс-

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

ISSN 1311-0829

порта, енергетиката, военната, космическата и други сфери. Следователно, SCADA може да се приеме като процес на събиране, обработка и анализ на информация в реално време от отдалечени териториално обекти и тяхното управление. Изискването за обработка в реално време се определя от необходимостта за доставяне на всички необходими данни на вниманието на оператора, като броят на точките, от които се снема информация за управляваните процеси, може да достига до няколко стотици хиляди.

Всяка сложна техническа система може да се представи като съвкупност от n взаимодействащи помежду си подсистеми. Всяка подсистема се описва с вектор на състоянието

$$X_i=(x_{i1}, x_{i2},..., x_{iк}),\ i = (1,n) \quad (1)$$

където $x_{i1}, x_{i2},..., x_{iк}$ са $к$ на брой параметри на състоянието на i-тата подсистема.

Параметрите на състоянието x_{ij} на техническата система могат да се разделят на две основни групи – измерени (обективно съществуващо множество X_m от стойности на измерените през някакъв интервал от време параметри) и изчислени (множество от стойности X_c, получени в резултат на провеждане на дадени операции).

Цялостната оценка на техническото състояние се представя като обединение на множествата на измерените и изчислените параметри:

$$X = X_m \cup X_c \quad (2)$$

Може да се счита, че получената обобщена оценка на техническото състояние показва ясно степента на работоспособност на техническата система, мястото и вида на възникналите неизправности. Може да се прави и оценка на прогнозирани процеси и явления с точно зададени интервални прогнози и с конкретни цели и условия на експлоатация на различни етапи на функциониране. Предвиждат се и процедури за обработка на събития, случили се между периодите на обмен на събраните данни. Следователно, SCADA-системите работят напълно автоматично, дори и в случаи, когато някои от крайните устройства са с нарушена функционалност.

2. SCADA системи в метрополитена на гр. София

Метрополитенът представлява изключително сложен технологически обект за управление, който по същество е множество от няколко на пръв поглед отделни и сами по себе си сложни и отговорни обекти, които обаче са взаимно свързани и като цяло определят функционалността на метрото. Към по-важните и основни технологически процеси могат да бъда причислени следните [2]:

- движение на метровлаковете;
- електрозахранване както на подвижния състав, така и на множество други консуматори на електроенергия;
- различни инженерни санитарно-технически съоръжения, като ескалатори, помпи, вентилатори, отопление и осветление;
- местно управление на движението на влаковете в района на всяка станция;

- информиране на пътниците за оставащото време до пристигане на следващия влак и др.

Голямата сложност на тези процеси се обуславя от факта, че всеки един от тях се разпределя по всички станции по цялата територия на метрото, а управлението трябва да обхване всичките тези части. В този смисъл метрополитенът представлява типичен разсредоточен обект, а към автоматичното управление на разсредоточени обекти, независимо от производствения отрасъл, се поставят особени изисквания. Още по-голямата сложност на процесите в метрополитена идва и от обстоятелството, че тяхното управление трябва да гарантира преди всичко голяма безопасност на превозите, съобразно строгите европейски изисквания. За наблюдението и прякото автоматично управление на процесите и преди всичко за осигуряване безопасността на пътниците е проектирана и внедрена една обща структура на SCADA система ДИСИМ, състояща се от функционално обособените системи ДИСИМ-В, ДИСИМ-Е и ДИСИМ-С. Те представляват сложен комплекс от технически и програмни средства, свързани в модерна съвременна структура и с много други системи, които имат специфично предназначение за Метрополитена: електрически централизации на станциите (ЕЦМ); автоматично регулиране на скоростта (АРС); диспечерски телефонни и радиовръзки; телевизионна система за наблюдение на метростанциите; пропускна система; система за радиоозвучаване и радиоинформация на пътниците; часовникова система.

ДИСИМ-Е е изградена на йерархичен принцип с ясно отделени нива:

- обектно (долно) ниво – тук се реализира връзката с обекта посредством програмируеми логически контролери (PLC), чрез които се получават данни за състоянието на електросъоръженията и се подават управляващи команди за индивидуално управление и превключване;

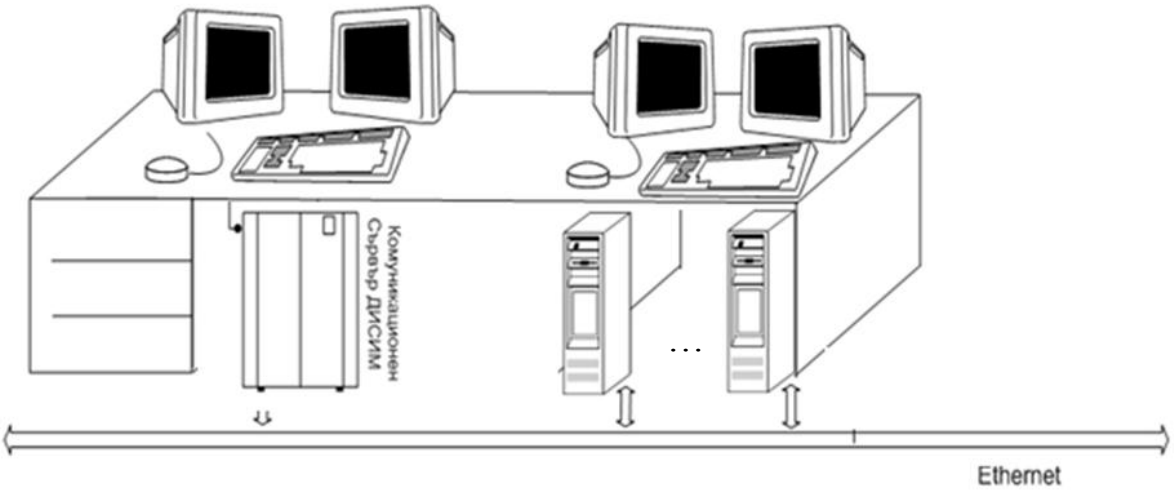
- комуникационно ниво – осъществява двупосочна комуникация между Централния диспечерски пункт (ЦДП) и PLC, т.е. връзката между обектното и диспечерското ниво;

- диспечерско (горно) ниво – реализира логическите функции на системата в съответствие с изискванията на технологията: наблюдение на електросъоръженията, функции по онагледяване на информацията върху монитора (изобразяване на състоянието на всички електросъоръжения, прилежащи към подстанцията и др.) и тези по диалога "човек-система", включително изработване и стартиране на команди. Структурно това ниво е изградено от функционални модули, отговарящи на избраните по-горе функции. На всеки функционален модул отговарят един или няколко прозореца. Прозорците са стандартни средства на графичния интерфейс, чрез които Диспечерът осъществява диалога със системата.

3. Структура на лабораторния модел, базиран на SCADA системата ДИСИМ-Е

Реализираният симулатор представлява модел на системата ДИСИМ-Е, внедрена в ЦДП на метрополитена на гр. София, служеща за отдалечена визуализа-

ция и управление на електросъоръженията и Енергопреносната система. Структурната схема на изградения симулационен модел е показана на фиг.1.



Фиг.1. Структурна схема на симулационен модел на SCADA система

Симулаторът е инсталиран в лабораторията на четири персонални компютъра, свързани помежду си в локална мрежа (Ethernet). Единият от тях играе ролята на сървър (с два монитора) и на него са инсталирани обектното (долно) ниво и съответните горни нива. На останалите три компютъра е инсталирано само диспечерско (горно) ниво и използват сървъра за комуникация с обектите. Лабораторният макет на системата илюстрира реализирането на двете основни групи от функции:

- Вътрешни (системни) функции – това са функции по контрол на вътрешното състояние на системата и изправността на нейните съставни елементи. Реализират се под управлението на сложно програмно осигуряване, което представлява фирмен продукт и не подлежи на разгласяване;

- Външни (процесни) функции – изработват и предоставят необходимата информация на оперативните диспечери. В зависимост от вида и характера на технологичния процес изработват различни съобщения.

Системата ДИСИМ-Е предоставя на Електродиспечера във всеки момент следните възможности:

- да проследява всички събития (както в подстанциите, така и в системата) и да има бърз достъп до информацията за тях, с оглед при необходимост от някаква оперативна намеса в процеса да бъде в състояние да вземе и реализира съответното управленческо решение;

- да управлява електросъоръженията в подстанциите посредством издаването на съответни диспечерски команди.

В симулационния модел на системата са включени четири подстанции, представляващи реални модели на електрически подстанции от Втори метродиаметър на Софийското метро:

- ТПС-34, прилежащо към МС-205 (Княгиня Мария Луиза);
- ТПС-33, прилежащо към МС-206 (Централна гара);

- ПС-32, прилежащо към МС-207 (Лъвов мост);
- ТПС-31, прилежащо към МС-208 (Сердика II).

Основните модули на симулационния модел са:

Главен диспечерски панел (ГДП) или т.н. **статус-лента** с няколко бутона, изобразена в долния край на монитора (фиг.2). Този панел стои непрекъснато визуализиран и не може да се закрива от други прозорци и да се променя от Диспечера. Диспечерът има възможност да заяви каква информация да се покаже на съответния монитор.

Фиг.2. Главен диспечерски панел

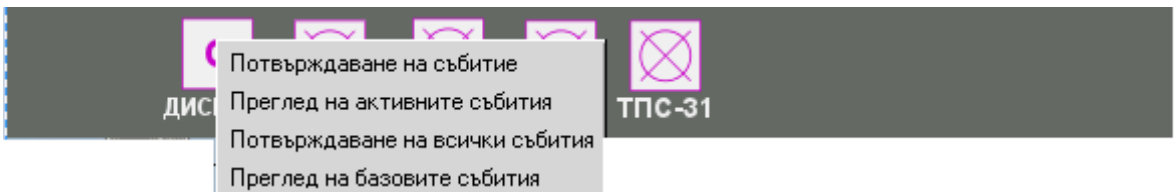
При задействане на бутона "***Станции***" се появява меню за избор на станция или панелът ДИСИМ (фиг.3).

Фиг.3. Панел ДИСИМ (Ниво-0)

С избора на бутон **ДИСИМ-Е** се появява панелът, който може да се премества за удобство на Диспечера по целия екран в рамките на монитора.

Станционните бутони ТПС-31 до ТПС-34 (по един за всяка подстанция) си променят цвета в зависимост от алармения статус за съответната подстанция: **лилав мигащ** (за съответната станция има непотвърдена аларма), **лилав** (за съответната станция има потвърдена, но непоправена аларма), **оранжев мигащ** (за съответната станция има непотвърдено предупреждение), **оранжев** (за съответната станция има потвърдено, но непоправено предупреждение), **сив** (за съответната станция няма активна (непотвърдена или непоправена) аларма).

Тези бутони се наричат още **бутони за станционен алармен статус**. Щракването с десния бутон на мишката върху иконата на съответната станция извиква меню с указани следващи възможни манипулации (фиг.4): потвърждаване на събитие (извършва се потвърждаване на най-ранно регистрираното събитие); преглед на активните събития (отваря се прозорец, в който са изписани всички активни събития); потвърждаване на всички събития; преглед на базовите събития за този обект (могат да се прегледат възможните събития за даден обект).



Фиг.4. Меню с опции на панел ДИСИМ

Натискането на някой от станционните бутони води до стартиране на модула "***Станции***", който осигурява визуализация на състоянието на избраната подстанция и възможност на Диспечера да управлява електросъоръженията, като използва бутоните върху самото изображение на станцията.

При **Ниво 1** в прозореца по подходящ графичен начин е показано топологичното описание на избраната станция. Всеки един обект на екрана в даден момент се оцветява с определен цвят в зависимост от неговото състояние в този момент: **зелен** (обектът е изключен); **червен** (обектът е включен); **жълт** (обектът е заземен); **оранжев** (активно събитие "предупреждение"); **лилав** (активно събитие "авария" или "авария" и "предупреждение"); **сив** (обектът няма дефинирано състояние).

В долния десен ъгъл на картината са поставени два бутона: **"Аларми"** (чрез него се извиква модул активни аларми за съответната подстанция) и **"Затвори"** (за затваряне на изображението на подстанцията).

При **Ниво 2** се изобразява обобщен изглед на четирите подстанции.

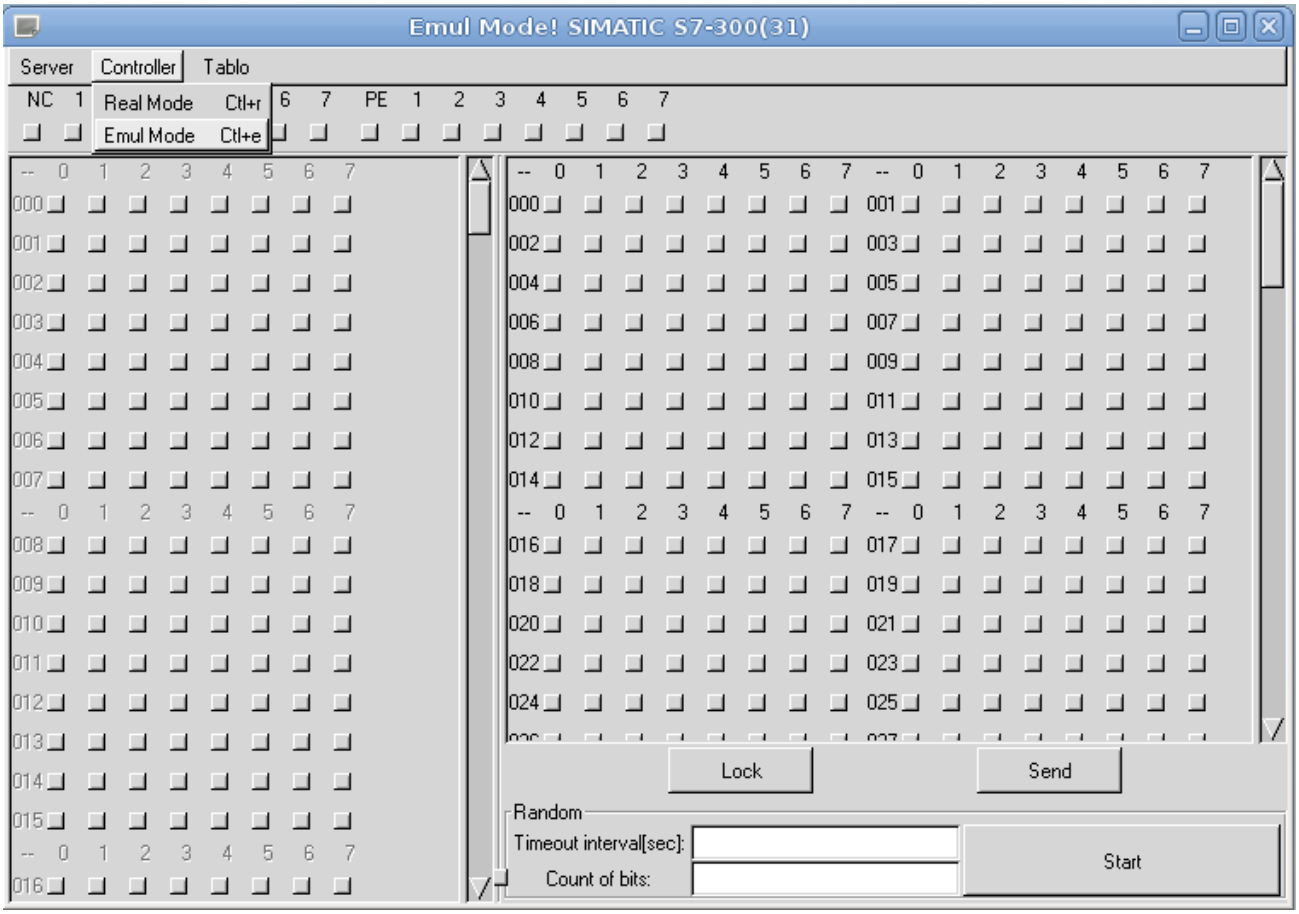
При натискане на бутон "***Активни събития***" се появява меню за избор на списък на активните събития за съответната станция или за цялата система. Те са подредени във вид на таблица, сортирани по времето на регистриране. В колона 1 различните по цвят квадратчета определят нивото на събитието: лилав (ниво Аварийно); оранжев (ниво Предупредително); сив (ниво Информационно).

При задействане на бутон "***Протокол на събитията***" може да бъде направена справка за регистрираните алармени и неалармени съобщения, както и за действията на Диспечера за избран период от време.

Бутонът *„**Инструменти**"* служи за симулация на сигнали на определена подстанция. Зарежда се помощната програма **CommTool**, чрез която може да бъде възпроизведена работата на програмируем логически контролер и да бъдат генерирани събития подобно на работата на реална система. При избора на желаната станция се появява прозорец, който представлява модел на паметта на контролера на станцията, като съответните блокчета са битове за определени сигнали (фиг.5) [3].

Реализирани са два режима на работа в зависимост от целта на изпитанието.

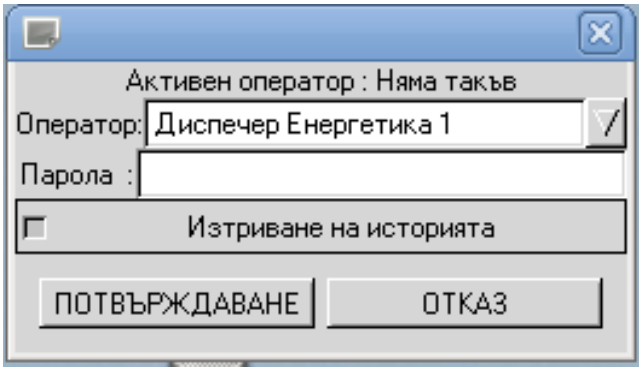
Ако целта е да се симулират сигнали, се избира емулационен режим (*Emul Mode*) и чрез натискане на блокчетата от дясната страна, се задействат определени сигнали на графичното изображение на съответната станция. Тук има възможност за произволно генерирани битове, като се указва интервалът (в секунди) и броят генерирани сигнали (за 1 секунда).



Фиг.5. Модел на паметта на контролер в симулатора CommTool

При желание да се симулират команди се избира реален режим и при задействане на команда от графичното изображение на станцията се активира определен бит, като това се показва чрез блокчетата от лявата страна.

При задействане на бутон "***Смяна на диспечера***" се появява прозорец, който е предназначен за смяна на активния диспечер в даден момент (фиг.6). Действията като потвърждаване и подаване на команди се свързват автоматично с името на Диспечера, който ги е подал.



Фиг.6. Прозорец „Смяна на диспечер"

5. Заключение

Уникалността на всяка една SCADA система прави много труден достъпът до информация за този тип системи, тъй като се предлага преди всичко информация с търговски и рекламен характер. От друга страна – в метрополитена се намира в експлоатация съвременна, модерна и ефективна система, която обхваща всички отделни технологични процеси. Нейното обстойно проучване, обаче, не е възможно поради специалния режим на работа и допуск. По тази причина наличието на съвременен лабораторен макет на SCADA система във ВТУ „Т. Каблешков“ е изключително полезен в процеса на обучението на студентите и дава възможност те да навлязат дълбоко в същността на съвременните SCADA технологии.

Литература

[1] Clarke G., D.Reynders, E.Wright (2004), ***Practical Modern SCADA Protocols***, Newness

[2] Горанов Е., Е.Димитрова (2010), ***Системи за дистанционен контрол и управление в транспорта***, ВТУ “Тодор Каблешков”, София

[3] Димитров В. Д. (2009), ***Лабораторен стенд за управление на електро-задвижвания с програмируем логически контролер S7-200***, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 1312-3823, бр.3/2009 г., стр. VII-1, рег. No: 0428

Автор: Емилия Димитрова, гл. ас., катедра „Съобщителна и осигурителна техника и системи”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“-София; E-mail address:*edimitrova@bitex.bg*

Постъпила на 25.11.2013 **Рецензент:** гл. ас. д-р Н. Матанов

СРАВНИТЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЪНКОСЛОЙНИ ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ

Захари Зарков, Валентин Миленов, Яна Ненова, Симеон Рафаилов

Резюме: *Целта на работата е да се направи сравнително изследване на тънкослойни фотоволтаични модули. Направено е експериментално изследване на характеристиките на четири вида тънкослойни модули (CdTe, CIGS, aSi – 2 вида). За целта се използва устройство за снемане на волт-амперни характеристики, разработено от авторите и промишлена апаратура на фирмата SMA. На базата на резултатите от изследванията са начертани характеристиките при различни условия и са направени сравнения на качествата на изследваните модули.*

Ключови думи: *тънкослойни фотоволтаични панели, характеристики на фотоволтаични панели*

COMPARATIVE STUDY OF THIN FILM PHOTOVOLTAIC MODULES

Zahari Zarkov, Valentin Milenov, Yana Nenova, Simeon Rafailov

Abstract: *The aim of the paper is to do a comparative study of thin-film photovoltaic modules. Experimental study of characteristics of four types thin-film modules (CdTe, CIGS, aSi Tandem, microcrystalline aSi Tandem) is presented. For this purpose a device for capture of V-A characteristics of the modules, developed by the authors as well as industrial equipment from the company SMA are used. Based on the results of the research characteristics for different conditions are plotted and a comparison of the properties of the tested modules is done.*

Keywords: *thin film photovoltaic modules, characteristics*

1. Въведение

Фотоволтаичните (ФВ) системи за генериране на електрическа енергия все по-масово навлизат в живота на хората. През последните години ръстът на инсталираните соларни системи е значителен по целия свят. Все още обаче съществуват редица проблеми при масовото използване на ФВ генератори. Те са свързани с повишаването на ефективността на преобразуването на енергията и намаляването на цената на инсталациите. За преодоляване на тези проблеми се работи в направление на търсенето на нови материали и технологии за производство на ФВ клетки и модули с по-висока ефективност и по-ниска цена. Наред с утвърдените технологии за производство на клетки от кристален силиций в двете му разновидности – моно и поликристален, са разработени и технологии за

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

ISSN 1311-0829

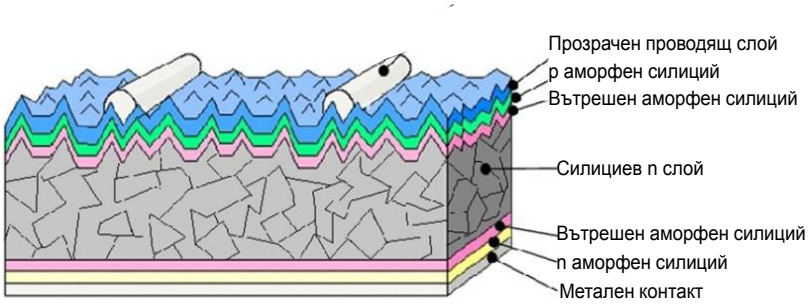
производство на ФВ модули по т.нар. „тънкослойни технологии“ [1]. При тях се използва значително по-малко материал за производството на клетките, което води до намаляване на цената. Това предимство се съпровожда и от някои недостатъци, като по-ниският к.п.д. на преобразуване на слънчевата светлина и по-бърза деградация на параметрите. И тук силицият се използва като основен полупроводников материал, най-вече в аморфна форма [2], [3]. Тънкослойната технология позволява да се използват и други материали, различни от масово използвания силиций, като: кадмиев телурид CdTe, медно-индиево-галиев селенид CIGS, галиев арсенид GaAs и др. [1]. Въпреки обещаващите резултати, тези технологии все още не са навлезли масово в производството и цените на модулите не са толкова ниски, че да бъдат сериозна алтернатива на кристалния силиций.

Целта на това изследване е да се направят сравнения на характеристиките на ФВ панели, произведени по тънкослойна технология от различни материали. Сравненията са направени на базата на данните от производителите и на базата на резултати от експериментални изследвания.

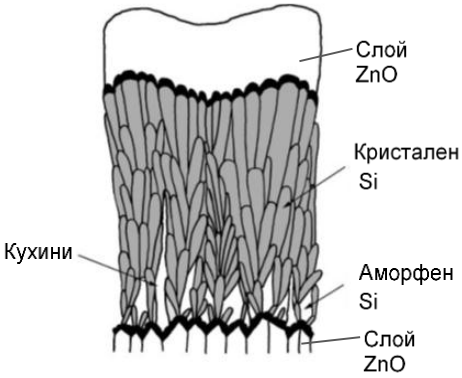
2. Сведения за тънкослойните технологии за производство на ФВ модули

Най-добре разработената и популярна тънкослойна технология за производство на ФВ клетки и модули е тази на аморфния силиций aSi. Неговите основни недостатъци са ниският к.п.д. и деградацията на клетките през първата година на експлоатацията им. Предимствата са: сравнително по-ниската цена, добре усвоената технология, добрата спектрална чувствителност, малкото влияние на параметрите от температурата. Проучванията са насочени към повишаване на ефективността на клетките от aSi посредством използване на т.нар. Tandem технология. При нея в клетката се формират два PN прехода, свързани последователно, които имат по възможност допълваща се спектрална чувствителност [2]. В резултат напрежението на една клетка се получава около два пъти по-високо от това на клетките с един PN преход, а к.п.д. се повишава. На фиг.1. е показана структура на клетка по tandem технология от aSi.

Друг съвременен метод за повишаване на ефективността на ФВ клетки и модули е „подредената“ или микрокристална връзка, наречена още микроморфен (микрокристален) тънък слой (μcSi). На фиг.2 е показан разрез на клетка от μcSi [2].



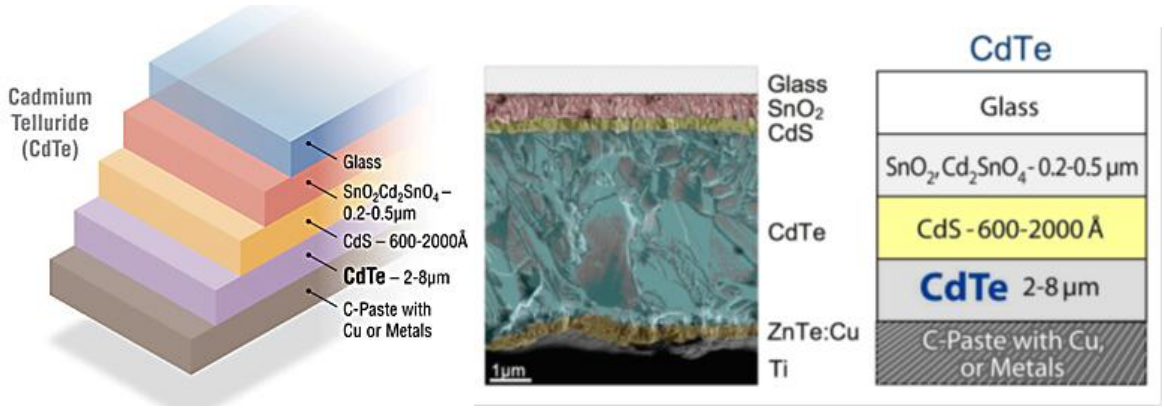
Фиг.1. Структура на клетка от aSi Tandem



Фиг.2. Клетка от μcSi Tandem

Тя също е tandem – има 2 PN прехода. Единият е формиран в аморфния слой, а другият – в микрокристалния. Първият слой е от ултратънък aSi, който поглъща по-късите вълни от видимия слънчев спектър. Другият слой от μc Si е най-ефек-

тивен при големи дължини на вълната. Така двата слоя взаимно се допълват при поглъщането на светлината. По-високата ефективност спрямо aSi клетките (над 9%) зависи от структурата на клетката и дебелината на слоевете.
CdTe като поликристален полупроводник има високо ниво на светлинна абсорбция, т.е. само около 1μm от материал може да абсорбира 90% от слънчевия спектър. Друго предимство е сравнително лесният и евтин производствен процес. Най-големите проблеми за развитието на ФВ клетки от CdTe са: трудността за легиране на p-тип CdTe, трудното получаване на малко контактно съпротивление на p-тип CdTe, токсичността на кадмия и необходимостта от предпазни мерки, които трябват да се вземат по време на производствения процес [1]. Този материал може да има висока ефективност (засега до 15%), тъй като коефициентът на пряко поглъщане на светлината е висок. На фиг.3 са показани структури на тънкослойни клетки от CdTe [4].



Фиг.3. Структура на клетка от CdTe

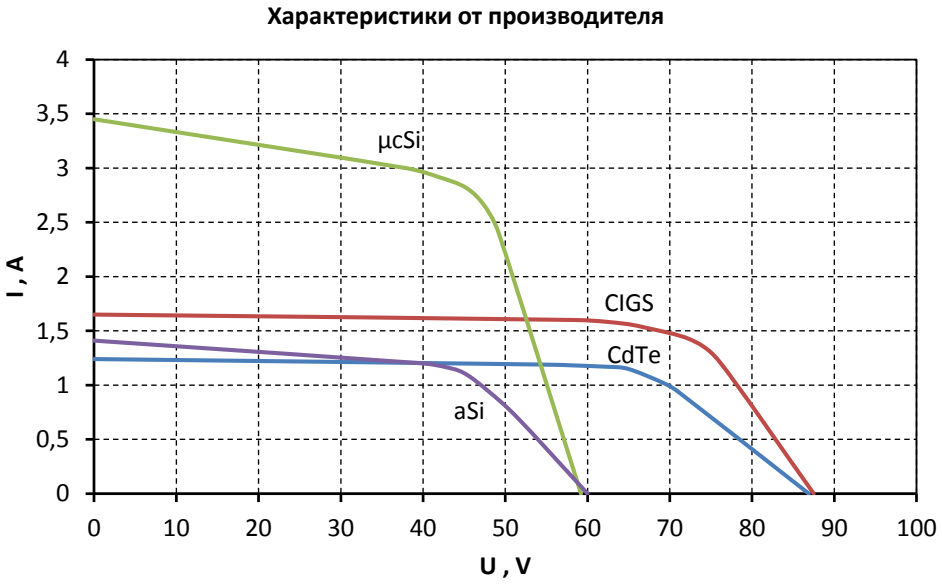
Друг материал, който се използва за производство на ФВ модули, придобили вече популярност на пазара, е медно-индиево-галиевият селенид CIGS. CIGS е ефективен материал, но сложността на технологията му прави производството на модулите трудно. Тънкослойните CIGS фотоволтаици предлагат множество предимства. Първото и най-важно е, че CIGS има висок коефициент на поглъщане и спектрална чувствителност, която е добре адаптирана към наземния слънчев спектър. Сред тънкослойните ФВ CIGS е най-обещаващ за икономически изгодното производство на електроенергия, предлагайки най-висока ефективност на преобразуването [5], [6].
При производството на тънкослойните ФВ модули вместо отделни, индивидуално свързани клетки, целият панел се формира като едно цяло, а клетките се получават в процеса на производството чрез различни технологии за рязане.

3. Характеристики на изследваните модули

За целите на изследването са използвани следните видове модули:

1. aSi – модел EPV-5X с мощност 50Wp.
2. CIGS – модел UF L 110, с мощност 110Wp.
3. CdTe – модел FS-275 с мощност 75Wp.
4. -μcSi – модел NA-F128GK с мощност 128Wp.

На фиг.4 са представени волт-амперните характеристики (ВАХ) на различните видове модули, дадени от производителите, в една обща координатна система.



Фиг.4. Характеристики на модулите, дадени от производителите

В табл.1 са показани параметрите на изследваните ФВ модули, които са получени на базата на данните от производителя и допълнителни измервания и изчисления. Не всички производители дават данни за ефективността (к.п.д.) на модулите. Поради това са направени изчисления за к.п.д. на ниво модул и клетка, резултатите от които също са показани в табл.1.

Табл.1. Параметри на изследваните ФВ модули.

Технология	CdTe	CIGS	aSi Tandem	µcSi Tandem
Напрежение на ПХ U_{OC}, V	89,6	94,7	60,6	59,8
Ток на късо съединение, A	1,23	1,65	1,41	3,45
Напрежение при макс. мощност U_{MPP}, V	68,2	73,8	45,4	45,4
Ток при макс. мощност I_{MPP}, A	1,1	1,49	1,12	2,82
Макс. мощност при STC, W	75	110	50	128
Ефективност при STC, %	10,42	11,70	5,32	9,01
Площ на модула, m^2	0,72	0,94	0,939	1,42
Брой клетки	116	149	38	45
Площ на 1 клетка, cm^2	56,4	57,9	234	287
Плътност на тока при макс. мощност, mA/cm^2	19,50	25,73	4,79	9,83
Плътност на тока на късо съединение, mA/cm^2	21,81	28,50	6,03	12,03
Напрежение на ПХ на 1 клетка, V	0,77	0,64	1,59	1,33
Напрежение 1 клетка при макс. мощност, V	0,588	0,495	1,195	1,009
Максимална мощност на 1 клетка, mW/cm^2	11,47	12,75	5,72	9,92
Ефективност при STC, %	11,47	12,75	5,72	9,92
Фактор на запълване FF_C, -	0,68	0,70	0,60	0,62

За да може да се направят достоверни сравнения между клетките, използвани в различните модули, е направено привеждане на напрежението към една клетка и на тока към $1cm^2$. По този начин се прави сравнение на „елементарна клетка“ с площ $1cm^2$ от всеки един от изследваните панели.

Напрежението на една клетка U_C се изчислява по формулата

$$U_C = \frac{U_M}{n_S} \qquad (1)$$

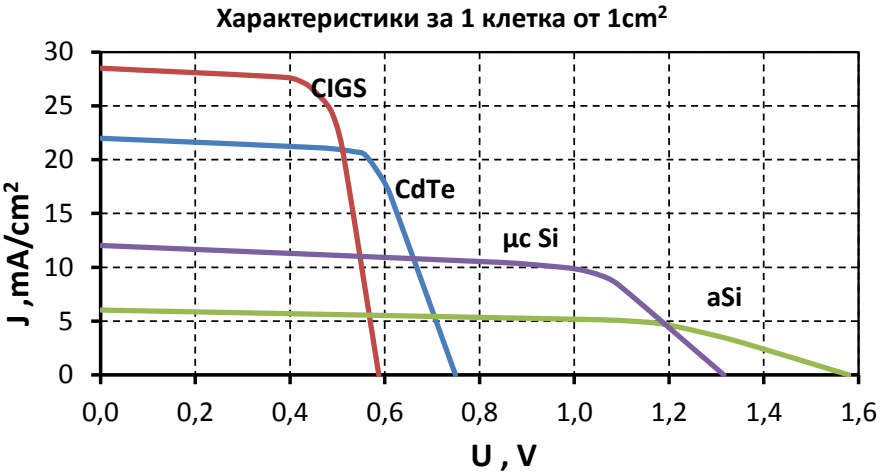
където U_M е напрежението на модула, n_S – броят на последователно свързаните клетки в модула. Тази формула важи за всяка стойност на напрежението – както на празен ход, така и при натоварване. Броят на клетките за някои модули е да-

ден от производителите, а на другите този брой беше преброен от авторите. Данните за броя клетки могат да се видят в табл.1. Привеждането на тока към 1cm^2 става по следния начин

$$J = \frac{I_M}{S_C} \tag{2}$$

където J е големината на тока за клетка с площ 1cm^2, S_C – площта на 1 клетка от модула в [cm^2]. Може да се счита също, че J е плътността на тока в клетките на модула.

Площта на клетките е изчислена от размерите им, които са измерени ръчно от авторите. Резултатите от изчисленията са нанесени в табл.1, а на фиг.5 са показани ВАХ на клетка с площ 1cm^2 за всеки от изследваните панели. Вижда се значителната разлика между клетките от различни материали.



Фиг.5. Характеристики на една клетка с площ 1cm^2.

Допълнително за всеки модул е изчислена и максималната мощност на елементарната клетка P_{MC} като произведение на плътността на тока и напрежението при максимална мощност на една клетка U_{MPPC}

$$P_{MC} = J.U_{MPPC} \tag{3}$$

Един синтетичен показател за качествата на ФВ клетки е т.нар. „фактор на запълване“ (fill-factor) FF_C. Колкото този фактор е по-близък до 1, толкова по-добра е клетката. Той се изчислява по формулата

$$FF_C = \frac{P_{MC}}{J_{SCC}.U_{OCC}} \tag{4}$$

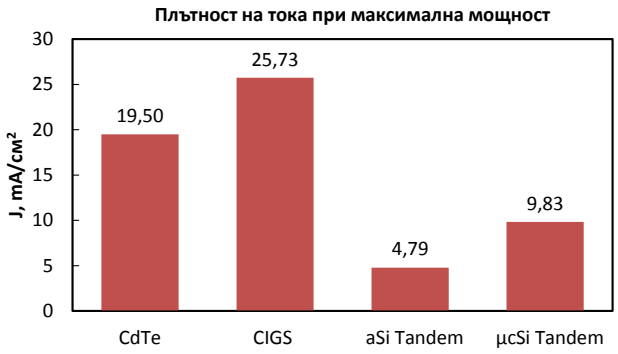
където J_{SCC} е плътността на тока при късо съединение на клетката, U_{OCC} – напрежението на празен ход на 1 клетка.

На фиг.6-фиг.9 са показани графични сравнения на стойностите на най-важните параметри на елементарната клетка от всеки от изследваните модули.

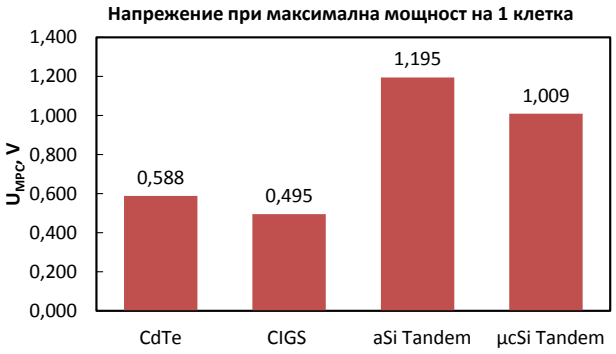
Трябва да се отбележи, че стойностите на к.п.д. на елементарната клетка в [%] съвпадат като числени стойности със стойностите на максималната мощност P_{MC}, изразена в mW, която е показана на фиг.8.

Резултатите, представени дотук, показват приликите и разликите между клетките, произведени по различни технологии. Оформят се две групи клетки - силициевите, които работят с много по-малка плътност на тока от втората група CdTe и CIGS клетките. Плътността на тока при CIGS клетките е най-голяма.

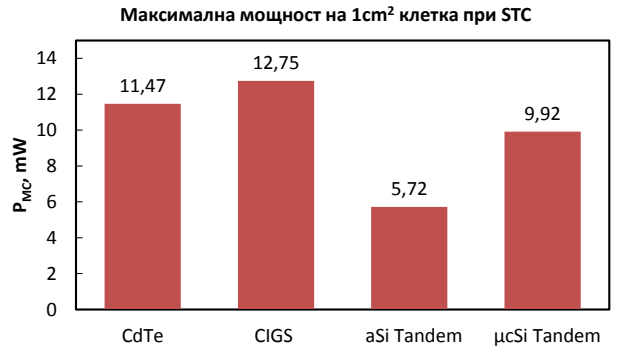
Освен това се вижда и разделянето на клетки с един PN преход и клетки с 2 PN прехода (Tandem cells). Това личи от по-високото напрежение на 1 клетка – над 1V за Si клетки срещу 0,5-0,6V за клетките с PN 1 преход (CdTe и CIGS) – фиг.5.



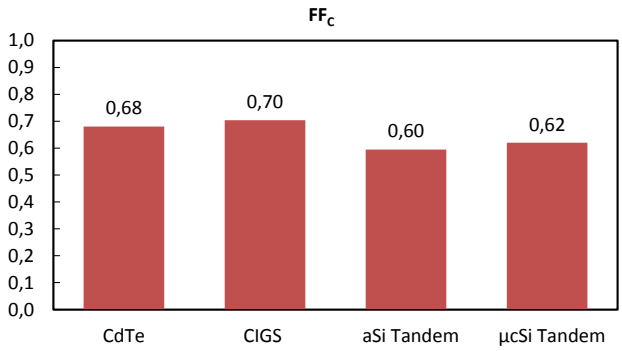
Фиг.6



Фиг.7



Фиг.8



Фиг.9

Технологията с 2 прехода позволява да се намали плътността на тока, като се използва по-високото напрежение на клетките. Така се постига почти същата мощност на единица площ, както се вижда от сравненията на мощността (фиг.8). По-малката плътност на тока при tandem клетките помага за да се намалят загубите в последователните съпротивления на клетките. Все пак трябва да се отбележи най-малката плътност на мощността при клетките от aSi.

Резултатите за к.п.д. съвпадат с очакваните – най-нисък имат модулите от aSi, следвани от тези от µcSi, CdTe и CIGS.

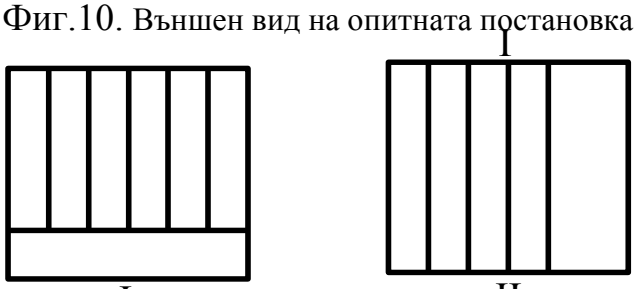
4. Експериментални резултати

Опитната постановка се състои от сензори за ток и напрежение, система за събиране на данни от фирма National Instruments, виртуални инструменти разработени от авторите и Sunny Sensorbox на фирмата SMA, с който се отчитат слънчевата радиация, температурата на околната среда и на изследвания модул. На фиг.10 е показана снимка на опитната постановка.

С помощта на опитната постановка са снети автоматично данни, на базата на които са построени характеристиките на панелите. Изследването е извършено при полеви условия, като температурите и слънчевата радиация се измерват в момента на снемането на ВАХ. Засенчването на панелите е направено по два начина:

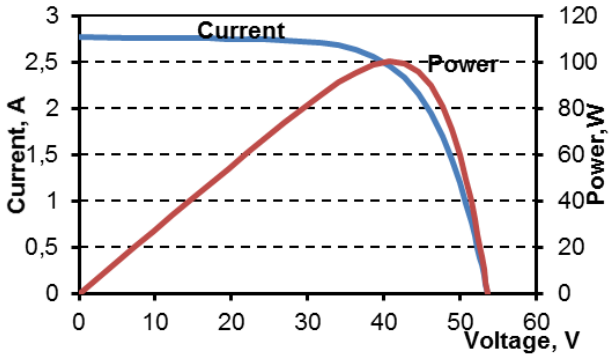
- едновременно частично засенчване (I) на всички клетки, от модула (фиг.11);
- пълно засенчване част от клетките (II) на модула (фиг.11).

Фиг.10. Външен вид на опитната постановка

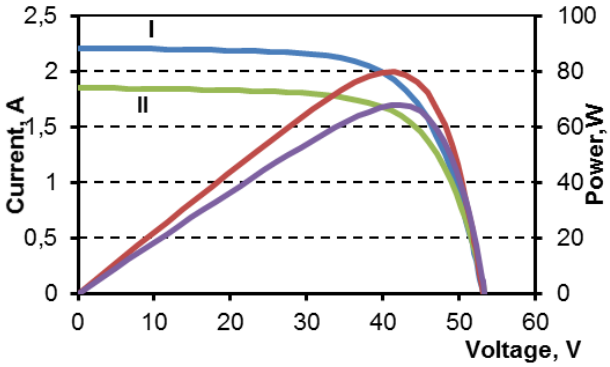


Фиг.11. Видове засенчване

На следващите фигури са показани част от резултатите, получени при експерименталните изследвания. На фиг.12.а е показана ВАХ на фотоволтаичния модул от микрокристален Si без засенчване при слънчева радиация 815W/m^2, температура на околната среда 31ºC и температура на модула 56ºC. На фиг.12.б са показани характеристиките на същия модул при двата вида засенчване за 825W/m^2.



Фиг.12.а. ВАХ на μcSi

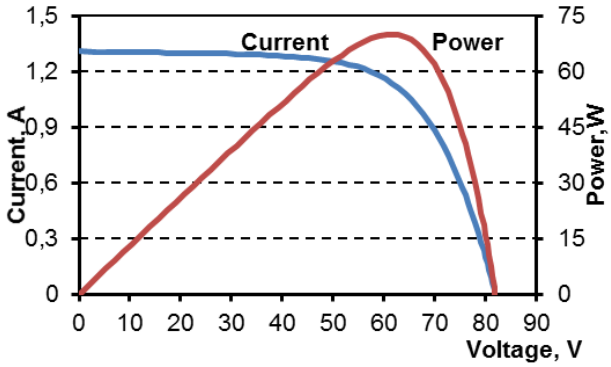


Фиг.12.б. ВАХ на μc Si при засенчване

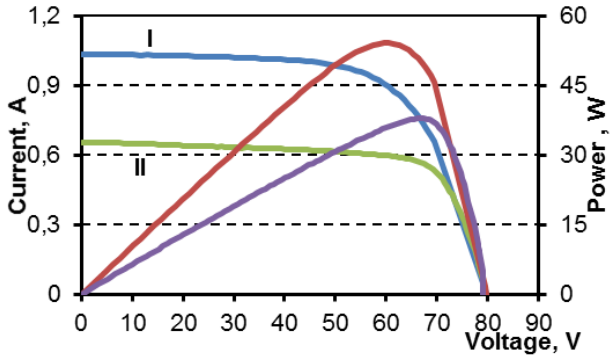
На фиг.13.а е показана ВАХ на ФВ модул CIGS без засенчване при слънчева радиация 760W/m^2, температура на въздуха 32ºC и температура на модула 52ºC. На фиг.13.б са показани характеристиките на модула при двата вида засенчване и 765W/m^2.

На фиг.14.а е показана ВАХ на модула от CdTe без засенчване при слънчева радиация 800W/m^2, температура на въздуха 30ºC и температура на модула 40ºC. На фиг.14.б са показани характеристиките при двата вида засенчване при 745W/m^2.

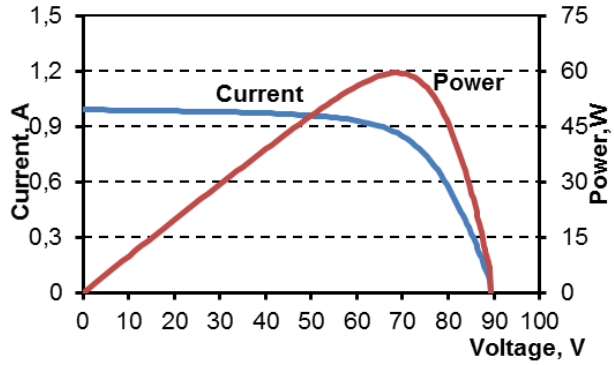
На фиг.15.а е показана ВАХ на модула от aSi без засенчване при слънчева радиация 815W/m^2, температура на околната среда 34ºC и температура на модула 56 ºC. На фиг.15.б са показани ВАХ и мощността при двата вида засенчване и 735W/m^2.



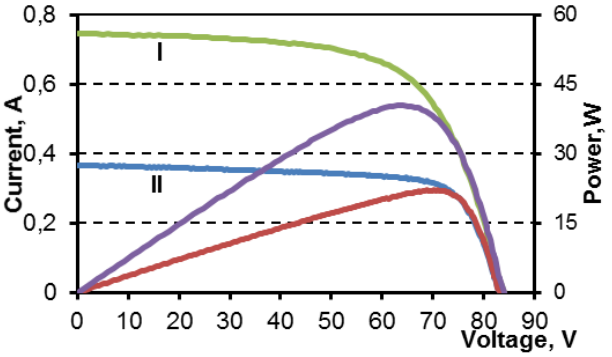
Фиг.13.а. ВАХ на CIGS



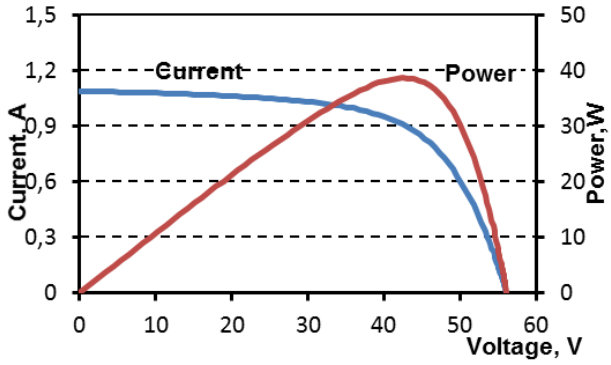
Фиг.13.б. ВАХ на CIGS при засенчване



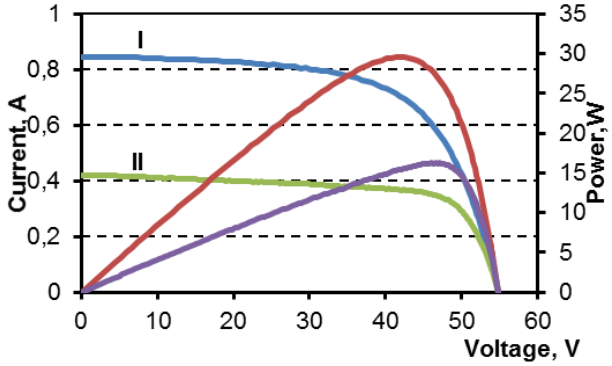
Фиг.14.а. ВАХ на CdTe



Фиг.14.б. ВАХ на CdTe при засенчване



Фиг.15.а. ВАХ на aSi

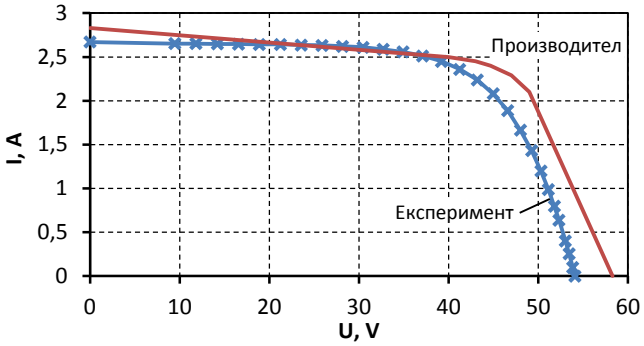


Фиг.15.б. ВАХ на aSi при засенчване

Резултатите при двата вида засенчване са различни, защото при засенчване на еднаква част от клетките, общият ток намалява пропорционално на засенчването. При втория тип засенчване дори и при засенчване на само една от последователно свързаните клетки общият ток на модула става равен на тока на засенчената клетка. Изводът е, че вторият вариант на засенчване е много по-неблагоприятен от първия. От фиг.16 се вижда, че експериментално получената ВАХ има форма, по-близка до правоъгълната, която се различава от дадената от производителя. Направени са и изчисления за определяне на ефективността на използваните модули на базата на експерименталните данни. К.п.д. е изчислен по формулата

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{G.S_M}.100 \qquad (5)$$

където P_{MPP} е максималната измерена мощност на модула, S_M – площта на модула, G – измерената слънчева радиация във W/m^2.



Фиг.16. Сравнение на експериментална ВАХ с дадената от производителя

Резултатите са показани в табл. 2. Измерената по експериментален път ефективност е по-ниска от дадената от производителите (табл.1) главно поради факта, че температурата на модулите при измерванията е значително по-висока от 25ºC , при която се дават данните от производителя. За всички типове модули се наблюдава понижаване на ефективността с повишаване на работната температура, което е напълно нормално. От измерените данни не може да се направят достоверни изводи за точната степен за това намаляване в зависимост от температурата поради недостатъчната точност на измерването на слънчевата радиация.

Табл.2. Експериментален к.п.д. на модулите

Технология	CdTe	CIGS	aSi Tandem	μc-Si Tandem
Площ на модула, m^2	0.72	0.94	0.939	1.42
Pmmp, W	60	68.4	38.6	100
G, W/m^2	800	710	750	815
η, %	10.42	10.25	5.48	8.64

5. Заключение

В статията е представено експериментално сравнително изследване на ФВ модули, произведени по тънкослойна технология от различни полупроводникови материали. Направени са сравнения на електрическите характеристики на елементарна клетка с площ $1cm^2$ от всеки модул. Това е постигнато с допълнителни изчисления на базата на данните на производителя, геометричните размери и броя на клетките на всеки от модулите. Стойностите на напрежението на елементарната клетка показват ясно кои модули използват клетки, произведени по Tandem технология и кои – не. Установено е, че плътността на тока при модулите от Si е повече от 2 пъти по-малка от тази при модулите, използващи CdTe и CIGS. Последните работят с плътности на тока в клетките, които се доближават до тези на клетките от кристален Si.

Проведени са и експериментални изследвания на модулите при полеви условия – различна слънчева радиация и температура. Използвана е опитна постановка за автоматизирано снемане на ВАХ на модулите, разработена в катедра „Електрически машини“ на Електротехническия факултет при ТУ-София. Снети са и ВАХ на модулите при два типа засенчване. Резултатите за някои от модулите показват значителни разлики от формата на ВАХ, дадена от производителя. Получените стойности на к.п.д. са близки, но по-ниски от дадените от производителите при STC. Тези резултати потвърждават факта, че к.п.д. на модулите при всички тех-

нологии намалява с повишаване на температурата. Микрокристалната технология при силиция позволява получаване на ефективности около 50% по-високи от тази на aSi. Сравнително новите материали CdTe и CIGS вече позволяват постигане на ефективност, близка до тази на клетките от кристален Si и доста по-висока от тази на аморфния Si.

По-нататъшната перспектива на изследванията е в посока на натрупване на повече експериментални данни за изследваните модули при различни метеорологични условия (есенни, зимни), при различни наклони и разработване на математически и компютърни модели на основата на събраните данни. В по-дълъг период от време може да се проследи и стареенето на панелите при всяка от технологиите.

Литература

[1] El Chaara L., L.A. Lamonta, N. El Zeinb, (2011), ***Review of photovoltaic technologies***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 2011, pp. 2165–2175

[2] Shah A.V. et al. (2004), ***Thin film silicon solar cell technology***, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2004, 12, pp. 113–142

[3] Boussettine A.A., Y. Belhadji, A. Benmansour, (2012), ***Modeling of Tandem solar cell a-Si/a-Si Ge using AMPS-1D program***, Energy Procedia, 18, 2012, pp. 693–700

[4] Asim N. et al. (2012), ***A review on the role of materials science in solar cells***, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 2012, pp. 5834–5847

[5] Tyagi V.V., (2013), ***Progress in solar PV technology: Research and achievement***, Renewable and Sustainable Energy Reviews 20, 2013, pp. 443–461

[6] Eldada L., (2009), ***Rapid reactive transfer printing of CIGS photovoltaics***, Proc. SPIE 7409, Thin Film Solar Technology, 74090N, August 25, 2009

Автори: Захари Зарков, доц. д-р, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zzza@tu-sofia.bg*; Валентин Миленов, докторант, ас., Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *valmil@tu-sofia.bg;* Яна Ненова, студентка, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ian4eto_n@mail.bg;* Симеон Рафаилов, студент, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София

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

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СВЕТЛИННАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА СВЕТЛОВОДНИЯ КАНАЛ В ЗАВИСИМОСТ ОТ ГЕОМЕТРИЧНИТЕ И ФОТОМЕТРИЧНИТЕ МУ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Захари Иванов

Резюме: *Изследвани са зависимостите на светлинната ефективност на светловодния канал от коефициентите на отражение и геометричните размери на стените на светловодния канал и формата му. Тези зависимости са измервани експериментално на макети на светловодни канали и са изчислявани с разработена на базата на аналитични изрази MS Excel таблица. С разработени модели на светловодни канали, огледални рефлектори (пирамиди) и макет на помещение с различни коефициенти на отражение на стени, таван и под е изследвано разпределението на осветеността в помещението.*
Ключови думи: *осветление, светловод, светлинен поток, ефективност.*

STUDY OF LUMINOUS EFFICIENCY OF THE LIGHT CHANNELS DEPENDING OF THE GEOMETRIC AND PHOTOMETRIC CHARACTERISTICS

Zahari Ivanov

Abstract: *Studied are the dependencies of the luminous efficacy of the light guide channel on the reflection coefficient and the geometric dimensions of the walls of the light guide channel, and its shape. These relationships have been measured experimentally on models of the light channels are calculated with developed based on analytical expressions MS Excel spreadsheet. With the develop-us models of the light channels mirror reflectors (pyramids) and a model of the room with different reflectance of walls, ceiling and floor is studied the distribution of illuminance in the room.*

Keywords: *lighting, light pipe, luminous flux, efficiency.*

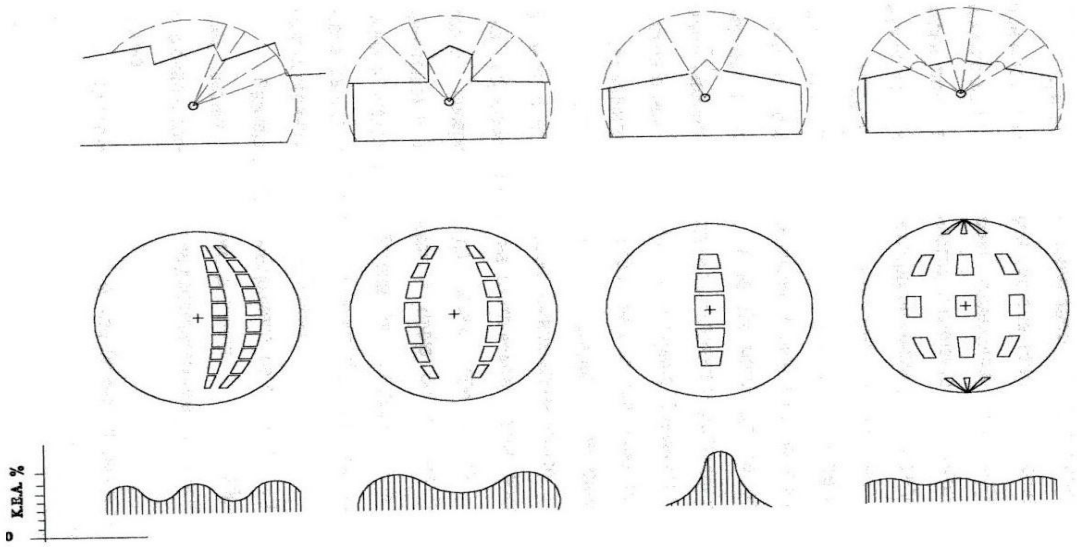
1. Въведение

Често наличните прозорци в помещенията не могат да осигурят достатъчно осветление. При съвременното строителство на високи сгради, разположени близо една до друга, панорамните прозорци с големи размери в по-ниските етажи не могат да осигурят достъпа на достатъчно дневна светлина. Едно от възможните решения в подобни случаи е светлината да прониква отгоре - директно от слънцето, без да се поглъща и намалява от обкръжаващите сгради и конструкции.
За насочване и транспортиране на светлината директно от слънцето се използват система за горно естествено осветление (ГЕО)

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

ISSN 1311-0829

От познатите системи за ГЕО показани на фиг.1 най-добре изпълняваща изискванията на този вид осветление е люковата, поради най-пълното използване на зенитния небосвод през целия светъл период на денонощието, възможността за постигане на най-голяма равномерност на осветеността и благоприятната посока на попадащия в помещението светлинен поток.
В производствени или търговски сгради електроенергията необходима за осветление може да бъде намалена до 70% чрез технологиите за използване на естествена светлина в комбинация с изкуствено осветление.
За приемането на съвместно естествено и изкуствено осветление се използват вертикално светловодещи шахти от покрива до системата за разпределение хоризонтално. За тази цел се използват различни видове светловоди: а) плоски светловоди, осигуряващи равномерно разпределение на осветеността по цялата осветявана повърхност [2]; б) кухи светловоди, изпълнени във формата на тръби вертикално или с надлъжна светеща ивица хоризонтално [1, 2].



Фиг.1. Частта от небосвода, използвана при различните ГЕО

2. Изследване на светлинната ефективност на светловодния канал в зависимост от геометричните и фотометричните му характеристики

Основна характеристика на светлопроводния канал (шахта) е коефициента на светлинна активност (***ξ***), определящ частта от светлинният поток, който преминавайки през шахтата попада в помещението. Преминалият през шахтата светлинен поток е съставен от две компоненти: пряк светлинен поток и отразен от стените на шахтата. Коефициентът на светлинна активност (***ξ***) се определя с формулата [3]:

$$d\xi = \int \rho_m . I . d\omega \qquad (1)$$

където ***I(cd)*** е интензитета на светлината, ρ_m е коефициента на отражение на стените на шахтата, а ***ω (sr)*** е пространствения ъгъл..
Геометричните размери на шахтата ***(a, b, h)*** определят пространствения ъгъл ***ω.*** За светлопроводна шахта с правоъгълно сечение и височина равна на ***1m*** и ко-

ординати на основата (0,0; 0,y; x,y; x,0), пространствения ъгъл ***(ω)*** може да бъде определен със следния израз [3]:

$$\omega = arctg.\frac{1+y^2+y.\sqrt{1+x+y^2}}{x} - arctg\frac{1}{x} \qquad (2)$$

където $x = b/h$ и $y = a/h$ са координати на светловодната шахта.

Коефициентът на светлинна активност на светлопроводната шахта (ξ) с форма на правоъгълен паралелепипед със страни: a, b и височина h може да бъде определен с израза (3), използвайки трите първи члена от реда на Фурие:

$$\xi = \frac{4}{\pi}.\{arctg.\frac{h^2+a^2+a.\sqrt{h^2+a^2+b^2}}{b.h} - arctg\frac{1}{b} + \rho_1.[arctg\frac{(h^2/2)^2+a^2+a.\sqrt{(h/2)^2+a^2+b^2}}{b.h/2} -$$

$$-arctg.\frac{h^2+a^2+a.\sqrt{h^2+a^2+b^2}}{b.h}] + \rho_2^2[arctg.\frac{(h/3)^2+a^2+a.\sqrt{(h/3)^2+a^2+b^2}}{b.h/2} -$$

$$-arctg.\frac{(h/2)^2+a^2+a.\sqrt{(h/2)^2+a^2+b^2}}{b.h/2}\} \qquad (3)$$

От израз (3) се вижда, че светлинната ефективност на светловодния канал основно зависи от коефициента на отражение ***(ρ_m)*** и геометричните размери на шахтата.

За цилиндрична или друга форма на светловодния канал (ξ) може да се изчисли по сходен начин. Конусовидната форма на шахтата по вертикалата увеличава коефициента на светлинна активност. В правоъгълни шахти светлинната активност се намалява линейно в зависимост от напречното и сечение.

За определяне на степента на влияние на коефициентите на отражение и геометричните размери на светлопроводните шахти е разработена за MS Excel таблица, съобразно предишните формули.

2.1. Разработване на MS Excel таблица и изчисляване на коефициента на светлинна активност *(ξ)* на светловодна шахта

Разработена е таблица, показана на фиг.2, с която се определя ξ на светловодна шахта. Необходимите входни данни са: страните ***a*** и ***b***, височината на шахтата ***h***, коефициентите на отражение на стените на шахтата ρ_m .

Направени са изчисления на ξ за 4 стойности на коефициентите на отражение (***ρ)*** и за 12 шахти с различни размери (***a*** x ***b*** x ***h***), (виж табл.1 ÷ табл.4). Приети са следни стойности на ρ на стените: алуминиев материал (ρ=0,997), алуминиево фолио (ρ =0,85); бели на цвят (ρ = 0,8) и сиви на цвят (ρ =0,15).

	A	B	C	D
1	arctg F = f, rad			
2	h = , m	3	33,5885	h2+a2+a*sqrt(h2+a2+b2)
3	a = , m	3	1,308996939	arctg(h2+a2+a*sqrt(h2+a2+b2))/b*h
4	b = , m	3	0,523598776	....-arctg(h/b)
5	ρ1	0,8	13,5	a*sqrt((h/2)2+a2+b2)
6	ρ2	0,8	9,5	(.....+a2+(h/2)2)/(b*h/2)
7	ξ =	0,867721	1,465919388	arctg(.....)
8			1,308996939	arctg(h2+a2+a*sqrt(h2+a2+b2))/b*h
9			0,125537959	ρ1*(...-...)
10			13,07669683	a*sqrt((h/3)2+a2+b2
11			7,692232277	((h/3)2+a2+....)/(b*h/3)
12			1,441520069	arctg(.....)
13			5,5	arctg((h/2)2+a2+a*sqrt((h/2)2+a2+b2))/(b*h/2)
14			1,390942827	arctg(.....)
15			0,032369435	ρ2*(...-...)
16			0,68150617	A+B+C
17			0,867720606	4/pi*(A+B+C)
18				
19	x=b/h	1	1,732050808	y*sqrt(1+x+y2)
20	y=a/h	1	1,308996939	arctg((1+y2+...)/x)
21	ω = ,rad		0,523598776	D19 -arctg1/x
22	ω = ,grad		30	
23				

Фиг.2. Excel таблица за определяне на светлинната ефективността на светловодна шахта

Изчислени са стойностите на индекса на шахтата със следната формула:

$$i = \frac{a.b}{h.(a+b)} \qquad (4)$$

където ***a, b*** и ***h*** са размери на светловодната шахта.

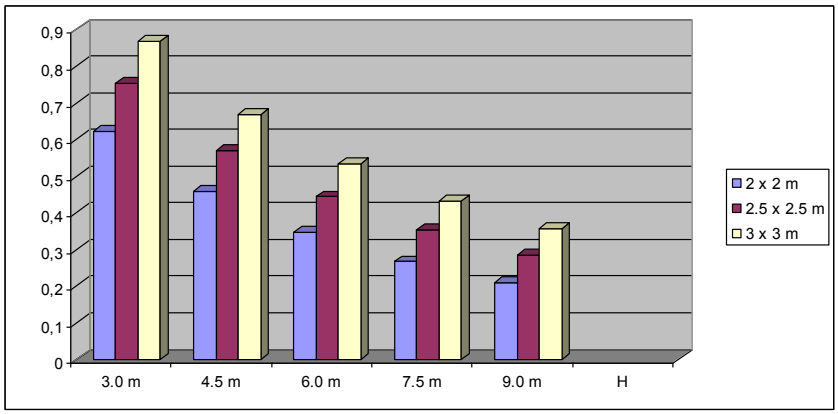
Получените стойности на коефициентите на светлинна ефективност ***ξ***, в зависимост от геометричните размери на шахтата (***a*** x ***b*** x ***h)***, са показани в табл.1 ÷ табл.8 и на фиг.3 ÷ фиг.8.

Табл.1. Коефициент на светлинна ефективност ξ, в зависимост от геометричните размери на сива шахта – *ρ =0,15* **.**

	a x b , m	*индекс*	***a x b , m***	*индекс*	***a x b , m***	*индекс*
h, m	***2 x 2***	***i***	***2.5 x 2.5***	***i***	***3 x 3***	***i***
3	***0,433678***	*0,33*	***0,571453***	*0,417*	***0,698086***	*0,5*
4.5	***0,25271***	*0,22*	***0,346908***	*0,277*	***0,442082***	*0,33*
6	***0,166834***	*0,166*	***0,232818***	*0,208*	***0,302792***	*0,25*
7.5	***0,119688***	*0,133*	***0,168031***	*0,166*	***0,220628***	*0,2*
9	***0,091022***	*0,11*	***0,127946***	*0,139*	***0,168695***	*0,166*

Табл.2. Коефициент на светлинна ефективност - -ξ на бяла шахта (ρ = 0,8), в зависимост от геометричните размери (***a x b*** x ***h)*** и индекса на шахтата – i.

	a x b , m	*индекс*	***a x b , m***	*индекс*	***a x b , m***	*индекс*
h, m	**2 x 2**	***i***	***2.5 x 2.5***	***i***	***3 x 3***	***i***
3	**0,62235**	*0,33*	***0,753211***	*0,417*	***0,867721***	*0,5*
4.5	**0,457834**	*0,22*	***0,56855***	*0,277*	***0,667173***	*0,33*
6	**0,346015**	*0,166*	***0,443803***	*0,208*	***0,53285***	*0,25*
7.5	**0,267009**	*0,133*	***0,352402***	*0,166*	***0,432463***	*0,2*
9	**0,210671**	*0,11*	***0,284524***	*0,139*	***0,355944***	*0,166*



Фиг.3. Коефициент на светлинна ефективност (ξ на бяла шахта) в зависимост от геометричните размери (***a x b*** x ***h)***

Табл.3. Коефициент на светлинна ефективност ξ, в зависимост от геометричните размери на шахта с алуминиево фолио (ρ = 0,85)

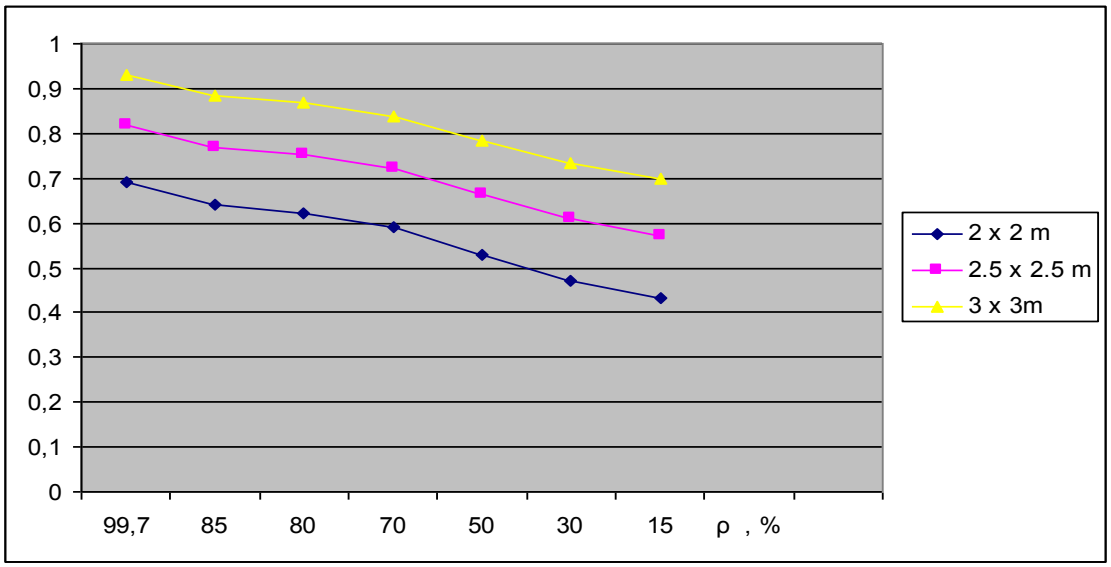
	a x b , m	*индекс*	*a x b , m*	*индекс*	*a x b , m*	*индекс*
h, m	*2 x 2*	***i***	*2.5 x 2.5*	***i***	*3 x 3*	***i***
3	***0,639222***	*0,33*	***0,769569***	*0,417*	***0,883023***	*0,5*
4.5	***0,475248***	*0,22*	***0,587754***	*0,277*	***0,686847***	*0,33*
6	***0,360397***	*0,166*	***0,461466***	*0,208*	***0,552494***	*0,25*
7.5	***0,278021***	*0,133*	***0,367184***	*0,166*	***0,450052***	*0,2*
9	***0,218862***	*0,11*	***0,296414***	*0,139*	***0,370947***	*0,166*

Табл.4. Коефициент на светлинна ефективност ξ, в зависимост от геометричните размери на шахта с алуминиево фолио (ρ = 0,997)

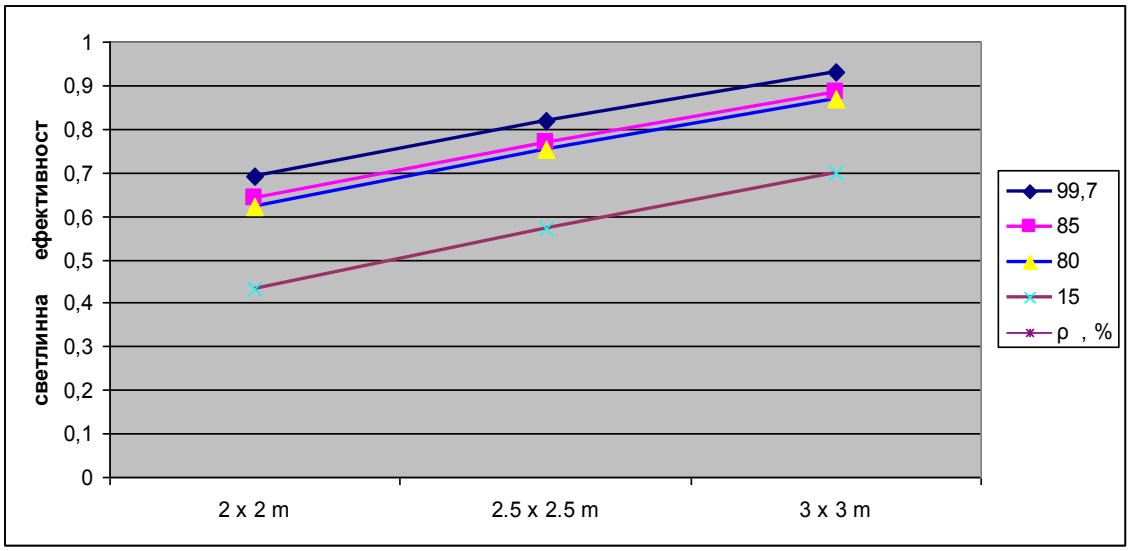
	a x b , m	*индекс*	***a x b , m***	*индекс*	***a x b , m***	*индекс*
h, m	***2 x 2***	***i***	***2.5 x 2.5***	***i***	***3 x 3***	***i***
3	***0,69078***	*0,33*	***0,819627***	*0,417*	***0,929878***	*0,5*
4.5	***0,527801***	*0,22*	***0,645999***	*0,277*	***0,746641***	*0,33*
6	***0,403175***	*0,166*	***0,51458***	*0,208*	***0,611857***	*0,25*
7.5	***0,310131***	*0,133*	***0,411136***	*0,166*	***0,502836***	*0,2*
9	***0,242108***	*0,11*	***0,331244***	*0,139*	***0,415549***	*0,166*

Табл.5. Коеф. на светл. ефективност (ξ) при височина на шахтата ***h*** =3m, в зависимост от коефициентите на отражение (ρ) на шахтата и от нейното сечение

	a x b на шахтата, ***m***		
ρ , %	2 x 2	2.5 x 2.5	3 x 3
99,7	0,69078	0,819627	0,929878
85	0,639222	0,769569	0,883023-
80	0,62235	0,753211	0,867721
70	0,589616	0,721514	0,838081
50	0,528192	0,662194	0,782666
30	0,472162	0,608305	0,732402
15	0,433678	0,571453	0,698086



Фиг.5. Коеф. на светлинна ефективност (ξ) в зависимост от ρ на шахтата и от сечението и' (при височина на шахтата h=3m)



Фиг.6. Коефициент на светлинна ефективност (***ξ***) при височина на шахтата ***h***=3m, в зависимост от нейното сечение и коеф. на отражение ***(ρ)*** на шахтата

2.2. Експериментално изследване на влиянието на параметрите на светловодна шахта и ефективността й

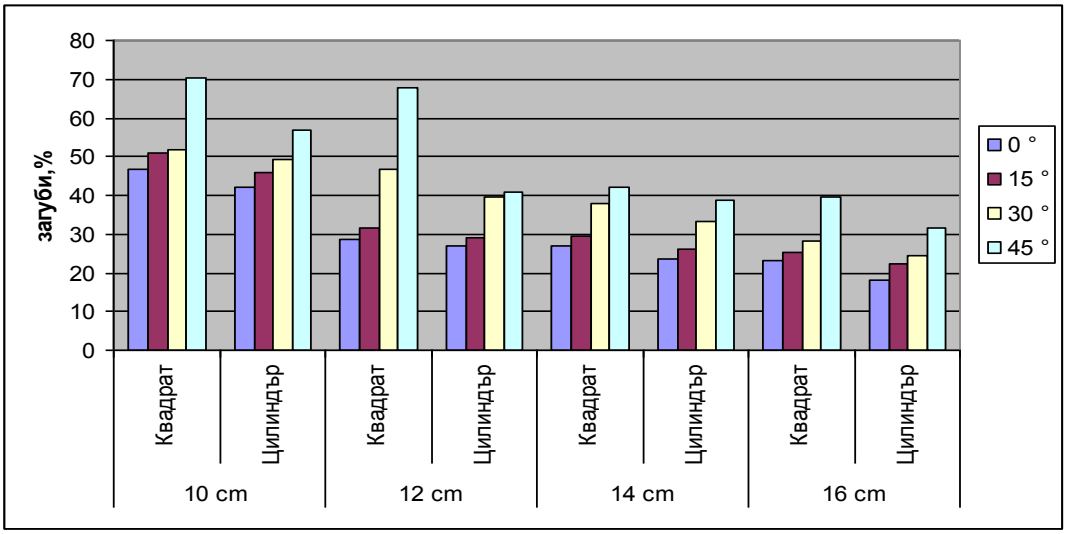
За измерване на модели на светловодни шахти (СШ) е използван макет в мащаб 1:6 на помещение с размери 5,0 x 4,0 x 2,8 m.

Измервани са СШ с кръгово сечение с диаметри (10, 12, 14 и 16) cm и квадратно сечение с размер на страната (10, 12, 14 и 16) cm. Изследвани са модели на светловодни шахти от бял кадастрон и такива със залепено огледално фолио. Шахтите са с височини (20, 30 и 40) cm и са в мащаб 1:6 спрямо реални светловодни шахти.

Фиксирани са различни ъгли на попадане на светлината на лампата, отговарящи на определени положения на слънцето през деня.

Експериментите са проведени при ъгли 0°, 15°, 30° и 45° спрямо оста на шахтата.
Съгласно табл.6 средните стойности на загубите на светлинен поток при 45° сравнено с 0° на попадане на светлината са 1,77 пъти по-голями при шахти с квадратни и съответно 1,56 пъти при цилиндрични сечения, т.е. при квадратните са 13,5% по–големи загубите в сравнение с цилиндричните.

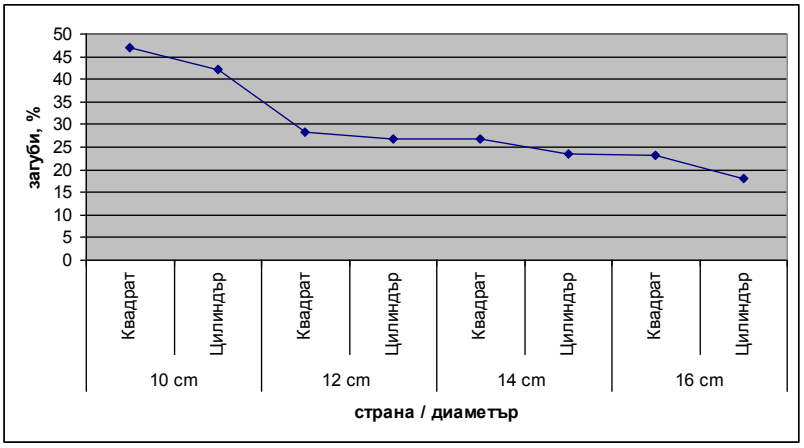
Фиг.7. Изследване на различните видове светловодни шахти



Фиг.8. Загуби на светлинни потоци при огледални светловодни шахти с височина 20cm при различни ъгли на попадане на светлината спрямо отвора.

Табл.6. Загуби в % на светлинни потоци при огледални светловодни шахти с височина 20cm при различни ъгли на попадане на светлината спрямо отвора

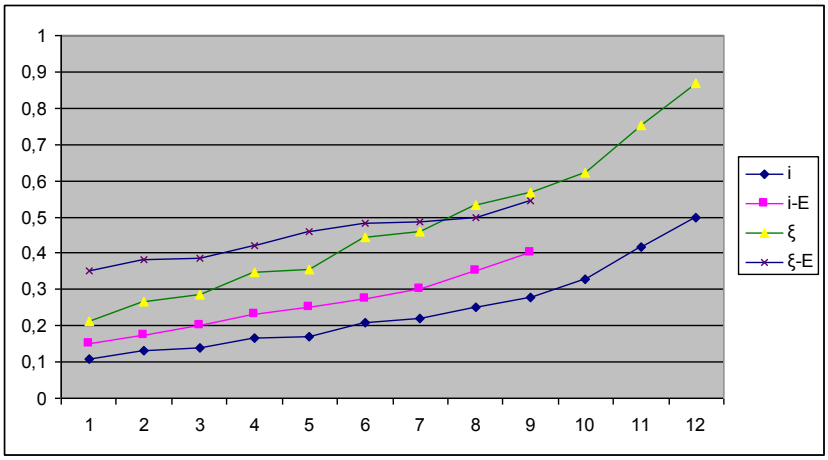
	10 cm		12 cm		14 cm		16 cm	
	Квадрат	Кръг	Квадрат	Кръг	Квадрат	Кръг	Квадрат	Кръг
0 °	46,92	42,31	28,46	26,92	26,92	23,46	23,08	18,08
15 °	50,99	45,85	31,62	28,85	29,64	26,09	25,30	22,13
30 °	51,84	49,39	46,53	39,59	37,96	33,47	28,16	24,49
45 °	70,37	56,79	67,90	40,74	41,98	38,89	39,51	31,48



Фиг. 9. Загуби на светлинен поток за огледални шахти с h= 20cm при ъгъл 0° на попадане на светлината в отвора (за сечения квадрат и кръг→ цилиндър)

Табл.7. Зависимостта за бяла шахта между коеф. на светл. ефективност (ξ→изчислени), (ξ-E→ измерени) и между индексите на шахтата (i →изчислени), (i-E→измерени).

i	*0,11*	*0,13*	*0,14*	*0,17*	*0,17*	*0,21*	*0,22*	*0,25*	*0,28*	*0,33*	*0,42*	*0,5*
i-E	***0,15***	***0,18***	***0,2***	***0,23***	***0,25***	***0,27***	***0,3***	***0,35***	***0,4***			
ξ	*0,21*	*0,27*	*0,28*	*0,35*	*0,36*	*0,44*	*0,46*	*0,53*	*0,57*	*0,62*	*0,75*	*0,87*
ξ-E	***0,35***	***0,38***	***0,39***	***0,42***	***0,46***	***0,48***	***0,48***	***0,5***	***0,55***			



Фиг.10. Зависимостта между коеф. на светлинна ефективност (ξ → изчислени), (ξ-E→ измерени) и между индексите на шахтата (i → изчислени), (i - E→ измерени) за бяла шахта (ρ = 0,8)

3. Изследване влиянието на коефициентите на отражение на стените под и таван върху измерените осветеностти на макет на осветителна уредба със светловодна шахта

Изследванията са направени на макет с огледална светловодна шахта с квадратно сечение 16 x 16 cm и височина 20 cm. За целта на експеримента са използвани две пирамиди от огледала с ъгли на страните при основата 45° и 60° (фиг.11, 12 и 13).

Фиг.11. Разработени модели на огледални рефлектори (пирамиди) с ъгли на страната на 45° и 60° за подобряване равномерността на осветеностите в помещение със светловодната шахта (фиг.11 и фиг.12)

Фиг.12. Изследване разпределението на осветеностите на пода на помещението при кафяви стени под и таван и пирамида с ъгъл на страната 45° и 60°

Фиг.13. Изследване разпределението на осветеностите на пода на помещението при бели и кафяви стени под и таван и пирамида с ъгъл на страната 45° и 60°

Табл.8. Разпределението на осветеностите на пода на помещението при бели и кафяви стени под и таван и пирамида с ъгъл на страната 45° и 60°

	Бели стени под и таван		Кафяви стени под и таван	
Ъгъл на страната	45°	60°	45°	60°
E средно , lx	129,3	120	39	37
Emin / Ecp	0,71	0,63	0,43	0,31
Emin / Emax	0,56	0,49	0,16	0,10

4. Заключение

С увеличаване на индекса на шахтата (i) се увеличава ефективността на шахтата (напр. увеличение на индекса 2 пъти → ефективността 1,5 пъти). С увеличаване на коефициента на отражение на шахтата и увеличаване на индекса на шахтата (i) се намалява ефекта от увеличаване на ефективността (напр. ρ= 0,3 нараства до ρ= 0,85; при i=0,5 ξ=*1,25 пъти, при* i=0,33 ξ=*1,36 пъти*).

Коефициентът на светлинна ефективност (ξ) на шахтата зависи линейно от нейното сечение при зададен коефициент на отражение (ρ) на шахтата.

Най-високата средна осветеност и равномерност на пода на макета на помещението е измерена при бели стени, под и таван и рефлектор с ъгъл на страната 45°.

При изследване на влиянието на параметрите на светловодна шахта и ефективността й е установено, че светловодни шахти с кръгово сечение са по- ефективни от 6 до 22 % спрямо квадратните такива.

Направените изследвания показват, че използването на светловоди е едно много добро решение за въвеждане на светлина в помещения с недостатъчна такава, което за в бъдеще ще става все по - актуално.

Литература

[1] Иванов З.А., ***Възможности и предимства на осветителни уредби с кухи тръбни светловоди*** , сп."Енергетика", № 6-7, 1996 , стр. 15-16

[2] Aisenberg, J.B., Bughman, G.B., Korobko, A.A., Pjatigorsky, V.M., ***Experience and perspective of hollow guide lighting systems development and application,*** Proc. 25 th Sess. CIE: San Diego, 2003.

[3] Иванов З.А., Манов В., ***Изчисляване на оптична система за плосък светловод",*** XI национална конференция по осветление " Осветление 2001, 13-15 юни 2001г., Варна

[4] Дроздов В. А., Гусев Н.М. ***Строительная светотехника. Современное состояние и перспетивы развития,*** Москва 1983 г.

Автор: Захари Иванов, доц. д-р инж., катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013г. **Рецензент** проф. д-р инж. А. Пачаманов

ИЗПОЛЗВАНЕ НА КУХИ ТРЪБНИ СВЕТЛОВОДИ ЗА ВЪВЕЖДАНЕ НА ЕСТЕСТВЕНА СВЕТЛИНА В СГРАДИ

Захари Иванов

Резюме: *В работата е направено: а) проучване на светловодни системи за изкуствено и естествено осветление; б) проектирана е осветителна уредба за търговско помещение с програмата Calculux; в) изчислен е с програмата Solatube® Daylighting Calculation Tool необходимият брой светловодни комплекта за естествено осветление на търговско помещение; г) направено е технико-икономическо сравнение между осветителна уредба с луминесцентни лампи и същата в комбинация със светловодни системи за въвеждане на естествена светлина; д) измерени са показателите на естественото осветление в осветителна уредба, изградена със светловоди.*

Ключови думи: *естествена светлина, осветителна система, слънчева тръба, светловод.*

APPLICATION OF HOLLOW PIPE LIGHT GUIDE TO INPUT OF NATURAL LIGHT IN BUILDINGS

Zahari Ivanov

Abstract: *The work has been done: a) a study of the light systems artificial and b) a lighting system designed for commercial space with the program Calculux; c) using the program Solatube ® Daylighting Calculation Tool is calculated required number of light guide kit for natural lighting of commercial space; d) made a techno - economic comparison between the lighting system with fluorescent lamps and that in combination with the light guide systems for the introduction of natural light;e) measured the performance of natural lighting in the lighting system, built with light guide.*

Keywords: *natural light, lighting system, sun tube, light pipe.*

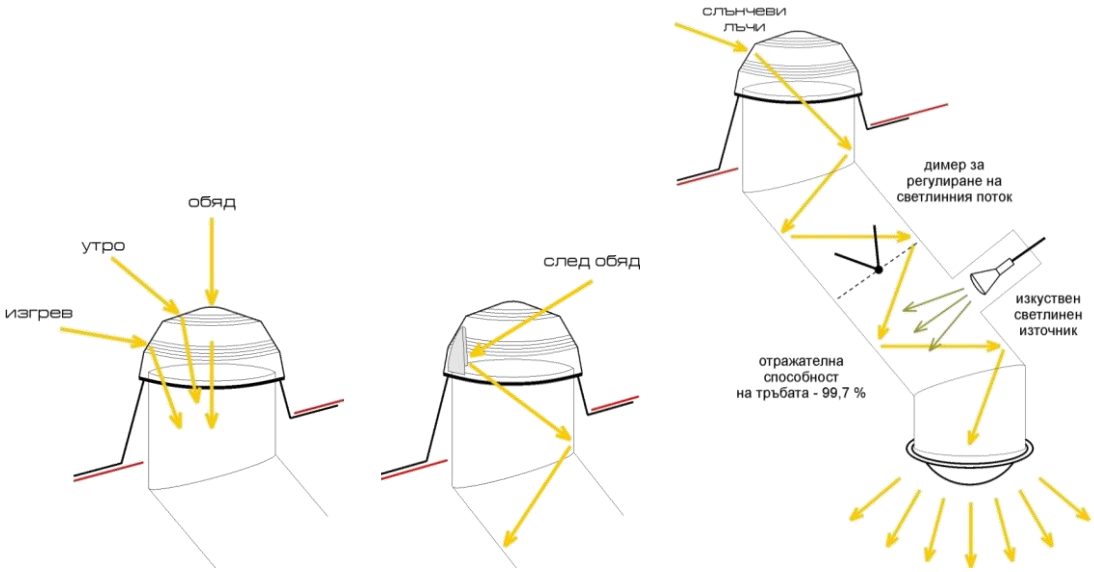
1. Въведение

Повишаване на енергийната ефективност чрез въвеждане на естественото осветление в сградите е много важна задача в съвременната светлотехника. Един от начините за осветяване на помещенията с недостатъчна естествена светлина е да се използват светловоди, които транспортират естествена светлина от покрива на сградата в помещенията.

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

ISSN 1311-0829

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.



Фиг.1. Принципно действие на светловод за естествено осветление

Един от основните елементи в системата, гарантиращ ефективната и 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 предава 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.

За контролиране на слънчевия поток, постъпващ в стаята, може да се използва димер. Той позволява да се контролира нивото на осветеността.

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 [1].

2. Технико - икономическа оценка на ВОУ с изкуствено осветление и със съвместна система изкуствено и естествено осветление

2.1. Осветление с луминесцентни лампи (ЛЛ) на офиси и промишлени помещения

Осветителните уредби трябва да бъдат не само технически издържани, но също така и икономически ефективни. С оглед на това, при проектирането им се разработват няколко варианта.

Икономически най-целесъобразното решение се определя чрез тяхното технико-икономическо сравнение. Такова съпоставяне очевидно е уместно, когато сравняваните варианти са равностойни в техническо отношение, т.е. имат приблизително еднакви нива на количествените и качествените показатели.

Сравнено е колко е рентабилно съвместно използване между луминесцентно и естествено осветление със светловоди на марката Solatube. Единият тип е от серията, която се използва предимно за жилищно осветление и в по-малки сгради и помещения. Другият тип е предназначен предимно за по-големи сгради, като големи хипермаркети и складове.

С помощта на програмата CalcuLux за помещение с размери (10 x 15 x 3) m и експлоатационна осветеност 300 lx е изчислено, че са необходими 12 осветителя тип TCS304/236 C6 2xTL-D36W - Philips. За помещение с размери (50 x 70 x 5) m и експлоатационна осветеност 200 lx са необходими 162 осветителя от същия тип.

Цената на луминесцентното тяло е 58,43лв с ДДС, а цената на ЛЛ Philips MASTERTL -DSuper 36W е 7,60лв с ДДС [6].

При този брой на осветители, мощност и цена са, определени разходите (Р) за целия живот на уредбата, както следва:

$$P = C + K \quad (1)$$

където, С са експлоатационните разходи, а К са първоначалните капиталовложения, лв.

Годишните експлоатационни разходи на осветителната уредба се определят по формулата:

$$C = Ce + Cл + Ca + Cп + Co.p. \quad (2)$$

$$C= \ 427,8 + 106,03 +45,49+ 44,18+ 22,09 =645,54 \ лв$$

където разходите са: Се – за електрическа енергия, лв; Сл – за смяна на изгорели лампи, лв; Са – за амортизационни отчисления, лв; Сп– за почистване, лв; Со.р– за обслужване и текущ ремонт, лв.

Разходите за първата година на уредбата с ЛЛ са:

$$P= 645,54+883,56=1529,1 \ лв.$$

Разходите в продължение на 15 години при използване на ЛЛ са показани в табл.1.

2.2. Смесено осветление със светловоди и луминесцентни лампи

Необходимо е смесено използване на естествено осветление посредством светловодни системи и електрическо осветление поради факта, че има облачни дни през годината, в които естествената светлина няма да бъде достатъчна, за да се

постигне нормена осветеност в помещението. Освен това е необходимо помещението да бъде осветено и през тъмната част на денонощието.

Табл.1.

Разходите в продължение на 15 год. на ВОУ с ЛЛ

ОУ с ЛЛ за помещения с размери: **а)** 10 x 15 x 3 m; **б**) *50 x 70 x 5m*							
Год.	К, лв.	Се, лв.	Са ,лв.	Сл ,лв.	Сп, лв	Со.р., лв.	Текущи разходи, лв
а) 0	883,56	0	0	0	0	0	883,56
а) 1	0	427,75	106,03	45,49	44,18	22,09	1529,09
а) 15	0	427,75	106,03	45,49	44,18	22,09	10566,58
***б**) 0*	*11928.06*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*11928.06*
***б**) 1*	*0*	*5774.63*	*1431.37*	*614.11*	*596.40*	*298.20*	*20642.77*
***б**) 15*	*0*	*5774.63*	*1431.37*	*614.11*	*596.40*	*298.20*	*142648.78*

За изчисление на необходимия брой светловоди, които да осветят дадено помещение е използвана програмата *Solatube® Daylighting Calculation Tool* [4]. Входните данни са следните: 1) тип на сградата; 2) географско положение; 3) работно време; 4) съществуващо осветление; 5) наличност на система за климатизация 6) желано процентно съотношение между естествена и изкуствена светлина; 7) тип на светловодната система.

2.2.1. Смесено осветление на офис с ЛЛ и светловоди

Използвани са светловоди на марката Solatube Ltd. – модел 290 DS Vusion. Техническите данни за модела са показани в табл.2.

В програмата са налични данни на естествената осветеност единствено за Австралия, затова са добавени актуални осреднени данни от таблица 3 за количеството естествена осветеност за региона на България [4].

Табл. 2.

Модел	Диаметър на светловода	EDCS (ефективна повърхност на прихващане на дневната светлина)	Площ на осветяване (в зависимост от височината на помещението)	Допустима дължина на светловода
Solatube 290 DS	~ 350 mm	1871 cm^2	9 - 16 m^2	до 9 m
Solatube 750 DS	~ 530mm	4837 cm^2	16 – 36 m^2	до 12 m

На базата на тези данни и данните на производителя за ефективната повърхност на прихващане на дневната светлина на използвания модел светловод са изчислени средното количество на попадналата върху купола естествена светлина, осреднено за двете полугодия (табл.4).

Табл. 3.

Количество дневна външна естествена осветеност по месеци

месец	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Q, lxh	34285	34285	34285	34285	34285	34285
месец	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*
Q, lxh	34285	34285	34285	34285	34285	34285

Табл. 4.

Средно количество на попадналата върху купола естествена светлина

	Зимно полугодие	Лятно полугодие
Средно количество дневна външна естествена осветеност, lx.h	39518	60430
Средно количество на светлинен поток попаднал върху купола на светловода, lm.h	7394	11307

Данните в табл.4 за средните количества попаднал светлинен поток върху купола на светловода за региона на България са въведени в програмата. Изчислен е необходимия брой светловоди за удовлетворяване на изискванията за нормена осветеност в помещението за двете полугодия.

Според зададените данни в програмата за примерното помещение са необходими шест комплекта Solatube 290DSVusion. Комплектът включва дифузор, купол и два метра тръба. Цената на комплекта е 935лв [7]. Така сумата за първоначална инвестиция възлиза на 5610 лв.

Осреднените годишни разходи в продължение на 15 години при използването на смесено осветление за вариант а) и б) са показани в табл.5.

Таблица 5.

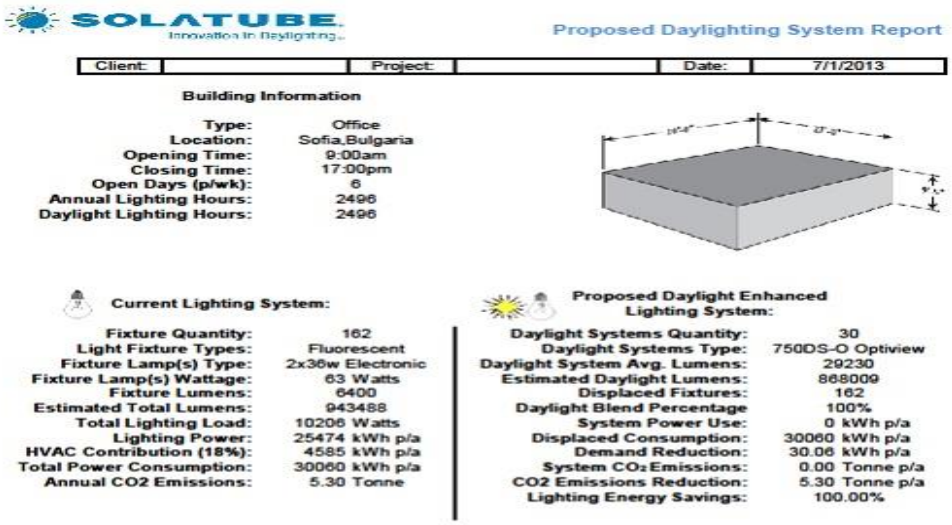
Разходите в продължение на 15 г. при смесено осветление

Смесено осветление за помещения с размери: а) 10 x 15 x 3 m; ***б)*** *50 x 70 x 5m*							
Год.	К, лв.	Се, лв.	Са ,лв.	Сл ,лв.	Сп, лв	Со.р., лв.	Текущи разходи, лв
а) 0	6493.56	0	0	0	0	0	6493.6
а) 1	0	82.29	18.56	7.96	44.18	3.87	6650.4
а) 15	0	82.29	18.56	7.96	44.18	3.87	8846.5
б) *0*	*69528.06*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*69528.1*
б) *1*	*0*	*1111.62*	*250.49*	*107.47*	*596.40*	*52.19*	*71646.2*
б) *15*	*0*	*1111.62*	*250.49*	*107.47*	*596.40*	*52.19*	*101300.6*

2.2.2. Смесено осветление с ЛЛ и със светловоди на промишлено помещение

Използвани са светловоди на марката Solatube Ltd.–модел 750 DS Open Celling. Техническите данни за модела са показани в табл.2. Изчисление са необходимия брой светловоди, които да осветят даденото помещение.

На базата на тези данни и данните на производителя за ефективната повърхност на прихващане на дневната светлина на използвания модел светловод се изчислява средното количество на попадналата върху купола естествена светлина. За двете полугодия осреднените стойности са показани в табл.6.


SOLATUBE
Innovation in Daylighting

Proposed Daylighting System Report

Client:		Project:		Date:	7/1/2013

Building Information

Type:	Office
Location:	Sofia,Bulgaria
Opening Time:	9:00am
Closing Time:	17:00pm
Open Days (p/wk):	6
Annual Lighting Hours:	2496
Daylight Lighting Hours:	2496

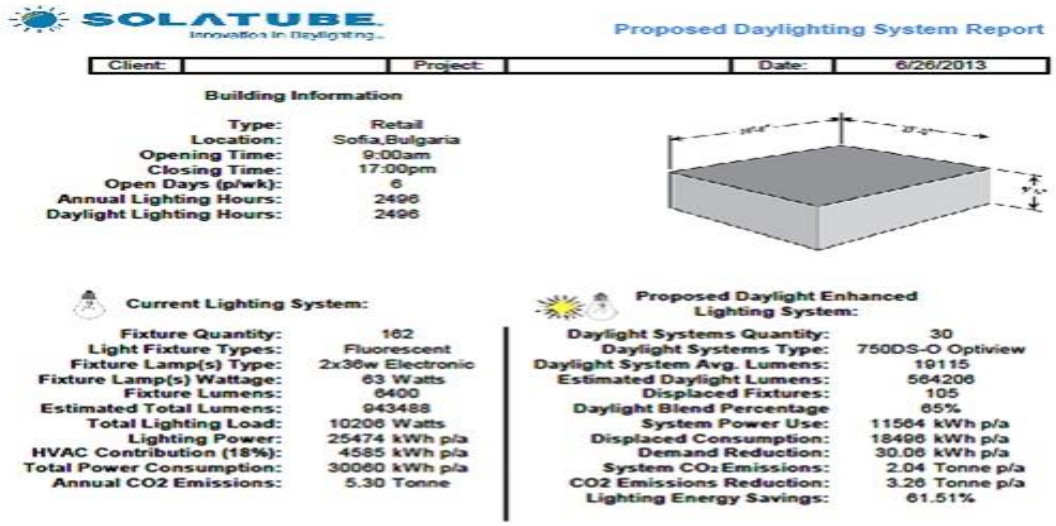
Current Lighting System:

Fixture Quantity:	162
Light Fixture Types:	Fluorescent
Fixture Lamp(s) Type:	2x36w Electronic
Fixture Lamp(s) Wattage:	63 Watts
Fixture Lumens:	6400
Estimated Total Lumens:	943488
Total Lighting Load:	10206 Watts
Lighting Power:	25474 kWh p/a
HVAC Contribution (18%):	4585 kWh p/a
Total Power Consumption:	30060 kWh p/a
Annual CO2 Emissions:	5.30 Tonne

Proposed Daylight Enhanced Lighting System:

Daylight Systems Quantity:	30
Daylight Systems Type:	750DS-O Optiview
Daylight System Avg. Lumens:	29230
Estimated Daylight Lumens:	868009
Displaced Fixtures:	162
Daylight Blend Percentage	100%
System Power Use:	0 kWh p/a
Displaced Consumption:	30060 kWh p/a
Demand Reduction:	30.06 kWh p/a
System CO_2 Emissions:	0.00 Tonne p/a
CO2 Emissions Reduction:	5.30 Tonne p/a
Lighting Energy Savings:	100.00%

Фиг.4. Лятно полугодие


SOLATUBE
Innovation in Daylighting

Proposed Daylighting System Report

Client:		Project:		Date:	6/26/2013

Building Information

Type:	Retail
Location:	Sofia,Bulgaria
Opening Time:	9:00am
Closing Time:	17:00pm
Open Days (p/wk):	6
Annual Lighting Hours:	2496
Daylight Lighting Hours:	2496

Current Lighting System:

Fixture Quantity:	162
Light Fixture Types:	Fluorescent
Fixture Lamp(s) Type:	2x36w Electronic
Fixture Lamp(s) Wattage:	63 Watts
Fixture Lumens:	6400
Estimated Total Lumens:	943488
Total Lighting Load:	10206 Watts
Lighting Power:	25474 kWh p/a
HVAC Contribution (18%):	4585 kWh p/a
Total Power Consumption:	30060 kWh p/a
Annual CO2 Emissions:	5.30 Tonne

Proposed Daylight Enhanced Lighting System:

Daylight Systems Quantity:	30
Daylight Systems Type:	750DS-O Optiview
Daylight System Avg. Lumens:	19115
Estimated Daylight Lumens:	564206
Displaced Fixtures:	105
Daylight Blend Percentage	65%
System Power Use:	11564 kWh p/a
Displaced Consumption:	18496 kWh p/a
Demand Reduction:	30.06 kWh p/a
System CO_2 Emissions:	2.04 Tonne p/a
CO2 Emissions Reduction:	3.26 Tonne p/a
Lighting Energy Savings:	61.51%

Фиг.5. Зимно полугодие

Табл. 6.

	Зимно полугодие	Лятно полугодие
Средно количество дневна външна естествена осветеност, lx.h	39518	60430
Средно количество на светлинен поток попаднал върху купола на светловода, lm.h	19115	29230

Според входните данни в програмата за зададеното помещение са необходими тридесет комплекта Solatube750 DS Optiview. Комплектът включва дифузор, купол и два метра тръба. Цената на комплекта е 1920лв [7]. Така сумата за първоначална инвестиция е 57600лв. Осреднените годишни разходи в продължение на 15 години при използването на смесено осветление са показани в табл.5.

3. Измерване показателите на естественото осветление във вътрешна осветителна уредба, изградена със светловоди.

За да се определи ефективността на осветлението със светловоди са направени измервания в складовата база на фирма „OBO Bettermann в София (фиг.6). Сградата е с размери 60x30m и височина 5,5m и в нея са монтирани 60 светловода на фирмата “Solatube”, всеки с диаметър на тръбата 530mm. Ефективната повърхност на прихващане на дневната светлина на всеки светловод е 4837cm². Измерванията са извършени на 5юли 2013г от 9:30 до 10:30 часа. Времето е мрачно, което благоприятства за по-точните и прецизни измервания на външната осветеност. В сградата няма прозорци и единствените източници на естествена светлина се явяват монтираните на тавана светловоди. По време на измерванията изкуственото осветление е изключено.

Фиг.6. Осветление със светловоди за естествено осветление

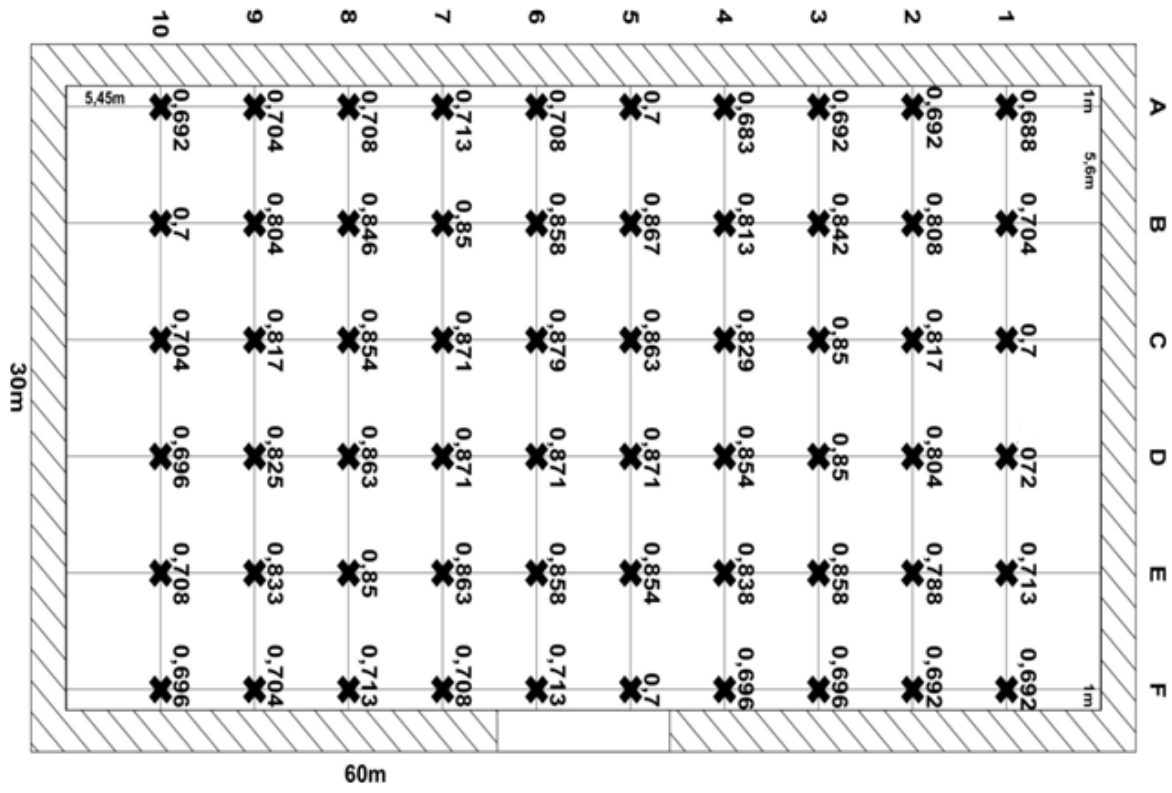
Поради непостоянството на естественото осветление във времето, то се характеризира в помещенията с коефициент на естествено осветление (КЕО). Той показва колко пъти осветеността в помещението е по-малка от външната осветеност на сградата в даден момент.

$$КЕО = \frac{Ев}{Ен} 100,\% \qquad (3)$$

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 склада и тази отвън под открито небе.

Измерванията на осветеностите в помещението са направени в 60 точки, като първата и последната във всеки ред точки, са на 1м от стените, а останалите са на равни разстояния една от друга. Средната измерена осветеност е 188,3 lx. По зависимостта (2) е изчислена стойността на КЕО във всяка точка, а резултатите са показани на фиг.7. Средната стойност на коефициента на естествено осветление е КЕОср. = 0,775 %



Фиг.7. Стойности на коефициента на естествена осветеност

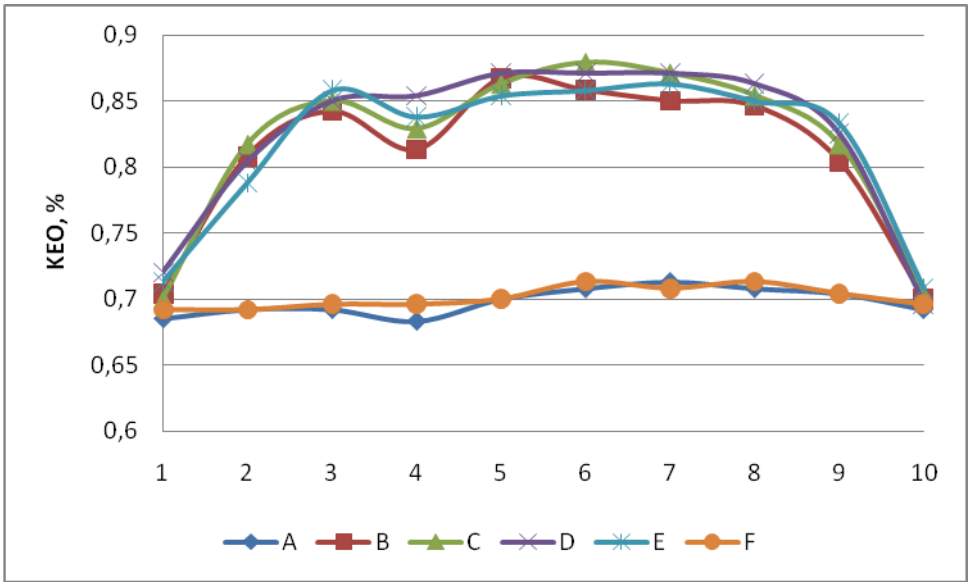
На фиг.8. е показано разпределението на КЕО по колони. Вижда се, че стойностите на коефициента на естествено осветление близо до стените (1 m) са значително по-малки, отколкото на тези в средата на помещението. Причината е, че осветяването е горно, а не странично. При странично осветяване с естествена светлина (прозорци), КЕО близо до прозорците е с най-високи стойности. Другата причина е, че точките до стените се осветяват само от една страна от светловодите, а освен това и са по-отдалечени от тях в сравнение с тези в централната част.

Качествена характеристика на естественото осветление са равномерностите на хоризонталната осветеност в помещението (g_1 и g_2):

$$g_1 = \frac{KEO_{min}}{KEO_{max}} = \frac{\mathbf{0,683}}{\mathbf{0,879}} = \mathbf{0,777} \quad (4)$$

$$g_2 = \frac{KEO_{min}}{KEO_{cp}} = \frac{\mathbf{0,683}}{\mathbf{0,775}} = \mathbf{0,881}, \quad (5)$$

където KEO_{max}, KEO_{min} и KEO_{cp} са съответно максималната, минималната и средната стойности на *KEO* 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.8.

4. Заключение

Научно доказано е, че естествената слънчева светлина действа благоприятно върху тонуса, настроението и работоспособността на хората, а от там спомага за по-добра ефективност и по-големи резултати. Изкуствената светлина не може напълно да замени естествената, затова е необходимо възстановяване на баланса между тях.
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) [2]. Съвременните схващания за здравословен начин на живот се базират именно на схващането този ритъм да не бъде нарушаван.
Според направените измервания и изчисленията осветителната уредба, реализирана чрез светловоди в складовото помещение, отговаря на нормените изисквания ($E_{cp} = 188{,}3 \geq 100$ lx и равномерността на хоризонталната осветеност $g_1 = 0{,}777 \geq 0{,}5$; $g_2 = 0{,}88 \geq 0{,}65$). Светловодите са напълно достатъчни за осигуряването на качествено осветление в сградата и нормалното протичане на работния процес.
Капиталовложенията за смесено осветление между ЛЛ и светловоди модел Solatube 290 DS се изплащат за 11 години и съответно смесено осветление

между ЛЛ и светловоди с модел Solatube 750DS, се изплаща за 8 години. При използване на светловоди за естествено осветление се реализира икономия на електрическа енергия.

Предимства на системата за въвеждане в помещенията на естествено осветление са: екологично чиста технология, не изискваща утилизация; въвеждане в помещенията на естествено осветление от разсъмване до залез; енергоспестяващи свойства (минимална топлопроводност); неограничен срок на експлоатация; не изисква постоянно обслужване; не пропуска влага и замърсяване.

Литература

[1] Иванов З.А., ***Приложение на светловоди с надлъжна светеща ивица в осветителните уредби***, Юбилейна научна сесия -50 години Технически Университет - София, Годишник на ТУ-София, том 48/ 1995г, кн.3., стр. 235-240

[2] 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

[3] Басри С., Петров О., Кючуков Р., ***Оценка на потенциала на дневната естествена светлина чрез количеството дневна естествена осветеност.*** Научни трудове на Русенския Университет - 2009, том 48, серия 3.1

[4] *http://www.solatube.com/*

[5] *http://denilighting.com*

[6] *http://www.solarlight.me/prices.html*

Автор: инж. Захари Иванов, доц. д-р, катедра "ЕСЕО", Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** проф. А. Пачаманов

РАЗРАБОТВАНЕ НА СИГНАЛЕН СВЕТЕЩ ЗНАК А18 СЪС СВЕТЛОДИОДИ И АВТОНОМНО ЗАХРАНВАНЕ ЗА ПЕШЕХОДНИ ПЪТЕКИ

Захари Иванов, Ясен Динков

Резюме: *Разработен, реализиран и изследван е макет в реални размери на сигнален светещ знак със светлодиоди и автономно захранване, под формата на знак А18. Той се захранване от фотоволтаик и акумулаторна батерия, а светлодиодите работят в мигащ режим.*

Ключови думи: *пешеходна пътека, светлинен поток, фотоволтаик, светлодиоди, автономно захранване.*

DEVELOPMENT OF ILLUMINATED SIGN A18 WITH LEDS AND AUTONOMOUS POWER SUPPLY FOR WALKWAY

Zahari Ivanov, Yasen Dinkov

Abstract: *Developed and tested a prototype of an autonomous LED signal lamp. The illuminator is powered by photovoltaic and battery, and LED's operate in flashing mode.*

Keywords: *zebra crossing, luminous flux, photovoltaic, Led's, autonomous power supply.*

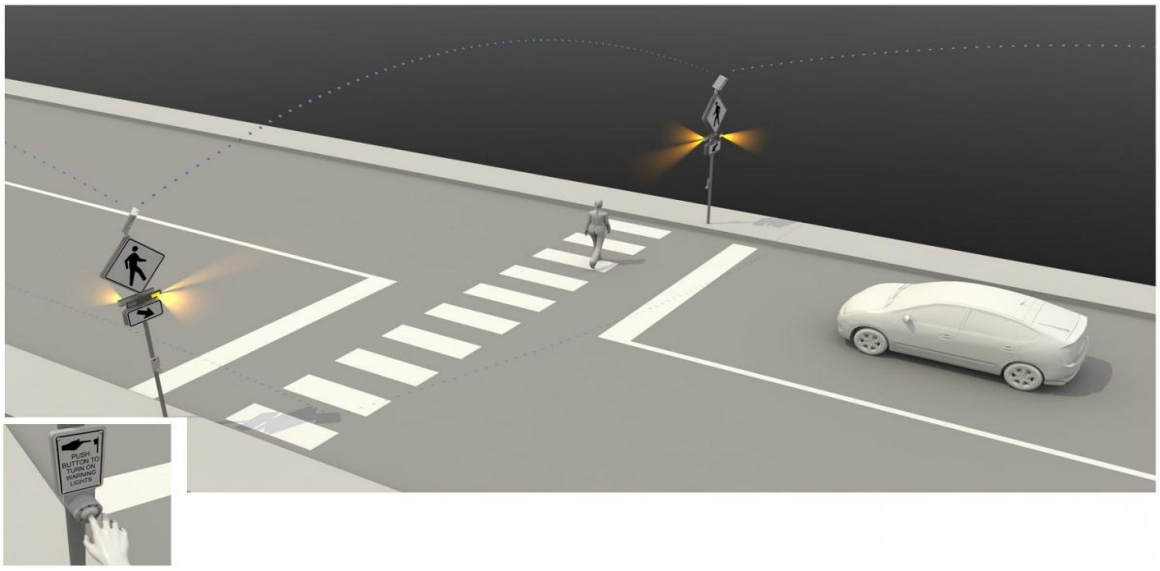
1. Въведение

Проектиран и реализиран е макет на сигнален осветител, със светлодиоди и автономно захранване, под формата на знак А18. Светлинният му ефект привлича внимание от шофьорите и по този начин се намаляват пътнотранспортните произшествия на пешеходни пътеки.

Решаването на този актуален проблем понастоящем е един от основните приоритети на Европейския съюз и в частност България и е предвиден в „Националната стратегия за подобряване безопасността на движението по пътищата на Република България за периода 2011-2020 г.“. Една от основните точки е „Стимулиране използването на съвременни технологии за повишаване на пътната безопасност“. Съгласно тази стратегия, настоящата разработка представя един съвременен технологичен продукт, който би могъл да замени остарелите знаци в пътната инфраструктура. Изпълнението на такъв тип осветители, използващи слънчевата енергия и светлодиодите, може да се приложи за всички групи пътни указателни табели.

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

ISSN 1311-0829



Фиг.1. Използване на сигнални знаци

2. Анализ на пътно - транспортните произшествия на пешеходни пътеки

Всеки ден по пътищата на България има жертви или ранени деца, възрастни хора, мъже и жени в работоспособна възраст. Статистическите данни за страната сочат, че ежегодно по пътищата ни загиват над 1000 души.

Докато в ЕС броят на жертвите от катастрофи намалява с 20% годишно, у нас той запазва средно ниво. Според данни от проучване на Световната банка средно годишно в България се случват около 80 хиляди катастрофи, при които умират около 1000 души, а други 10 хиляди са ранени.

Статистиката на ООН сочи, че до 2020г. пътно – транспортните произшествия ще заемат трето място в класацията на причина за смъртността в света.

Броят на пътните инциденти в България надхвърля средното ниво в Европейския съюз (ЕС) с около 20%. В ЕС около 2 процента от брутния вътрешен продукт на страните се отделя за превенция на катастрофите, за болнична помощ и за издръжка на засегнатите семейства. У нас годишно черната статистика е причина да се харчат между 300 и 400 милиона евро. Най-често катастрофи стават в населените места поради липсата на съоръжения за пешеходци и проблеми с регулирането на движението. Смъртните случаи се дължат обаче най-често на произшествия извън населените места.

През последните години загиналите пешеходци у нас са около една четвърт от общия брой на загиналите при пътно - транспортни произшествия. В тази черна статистика отново България е на челните позиции с два пъти по - висок дял на загинали пешеходци, отколкото във водещите по отношение на безопасността на движението страни в Европейския съюз. Най - застрашени на пътя са децата и хората в напреднала възраст.

Основен вид ПТП, при които загиват хора в населените места е "блъскане на пешеходец" - 49,9% . Над 93% от пострадалите пешеходци са в резултат на произшествия в населените места. Високата конфликтност е и в резултат на недос-

татъци и пропуски в организацията на движението в населените места, в липсата на условия за движение на пешеходците по пътищата и др.

За изминалата 2012 г. в страната са регистрирани 6714 тежки пътнотранспортни произшествия (ПТП), при които са загинали 599 и са ранени 8191 граждани [2]. В сравнение със същия период на 2011 г. тежките ПТП са с 76 повече, загиналите са по-малко с 57, а ранените са със 110 по-малко. От загиналите 599 при ПТП участници в движението 299 (49,92%) са водачи, 166 (27,71%) - пътници, 133 (22.20%) - пешеходци и 1 (0.17%) - работници на пътя. Подробни данни за предходните две години може да се видят в табл.1 [3].

Табл.1.

ПТП с отнемане предимство на пешеходци за 2010 и 2011 година [3].

ПТП с отнемане предимство на пешеходци за 2010 и 2011 година						
Показател	*Брой*		*Проценти*		*Общо на годишна база*	
	2011	*2010*	*2011*	*2010*	*2011*	*2010*
ПТП	945	641	15,1	11,2	6255	5746
Загинали	26	28	4,4	4,2	592	7130
Ранени	971	636	12,3	8,9	7896	7130

3. Обзор и анализ на изискванията към пътни знаци за пешеходни пътеки

3.1. Размери на пътни знаци

Размерите на пътни знаци от първа група - с постоянни размери, трябва да отговарят на изискванията на приложение „Б” на БДС 1517:2006 за съответния типоразмер, определен с Наредба № 01/18 за сигнализация с пътни знаци.

Размерите на пътни знаци от втора група - с променливи размери, определени съобразно предписанията за оформяне на лицевата им страна, трябва да отговарят на конкретен проект, съгласуван и одобрен съгласно Наредба № 1 за организиране на движението по пътищата, удовлетворяващ изискванията на приложение „В” на БДС1517:2006 и Наредба № 01/18 за сигнализация на пътищата с пътни знаци.

3.2. Светлоотразяващи материали

Светлоотразяващите материали, използвани в производството на пътни знаци, са дефинирани в БДС EN 12899-1 и се класифицират както следва: а) - Светлоотразяващо фолио с вградени стъклени перли; б) Светлоотразяващо фолио с вградени микропризми.

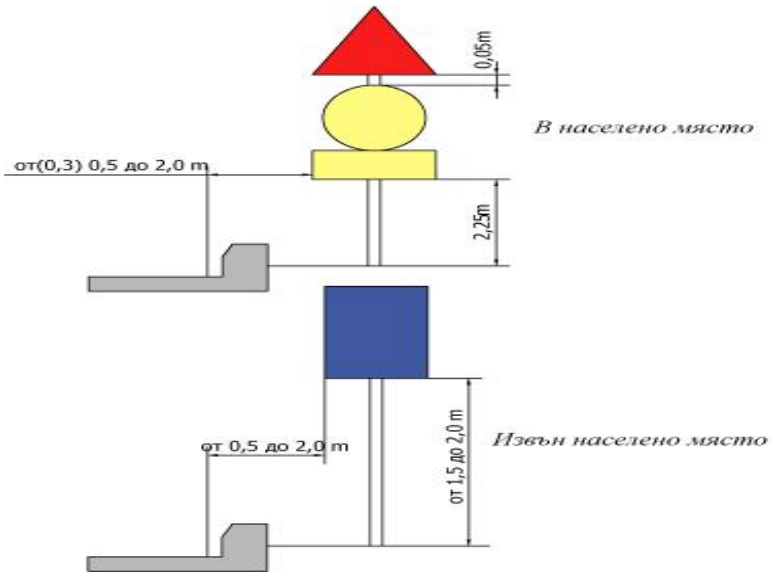
В зависимост от коефициента на обратно отражение, в съответствие с изискванията на БДС EN 12899-1 и съответстващите европейски технически одобрения (ЕТО), издадени в съответствие с изискванията на строителната директива на ЕС и европейска организация за технически одобрения (ЕОТА), светлоотразяващите фолиа се класифицират както следва: а) фолио с вградени стъклени перли – фолио клас RA1 и RA2; б) фолио с вградени микропризми – фолио клас RA1, RA2 и R3A и R3B.

За светлоотразителни фолиа от клас R3A и R3B се поставя допълнително изискване за ротационна симетрия. В съответствие с §4.4.2.4.1 на CUAP 01.06/04 за

ъгъл на наблюдение α =0.33 о и ъгъл на падане β1=5о (β2=0 о), отношението между минималния и максималния коефициент при обратно отражение, при завъртане от ε -75 о до +50 о, със стъпка от 25 о, не трябва да е по-голямо от 2,5:1.

3.3. Изисквания към монтажа

Монтажа на пътните знаци (фиг.2) става съгласно утвърден проект, отговарящ на изискванията на Закона за движението по пътищата, Наредба № 1, Наредба № 01/18 и заявеното от Възложителя. Устойчивостта на монтиран пътен знак трябва да съответства на изискванията за устойчивост при натоварвания съгласно БДС EN 12899-1 и на изискванията за безопасност съгласно БДС EN 12767 [5].



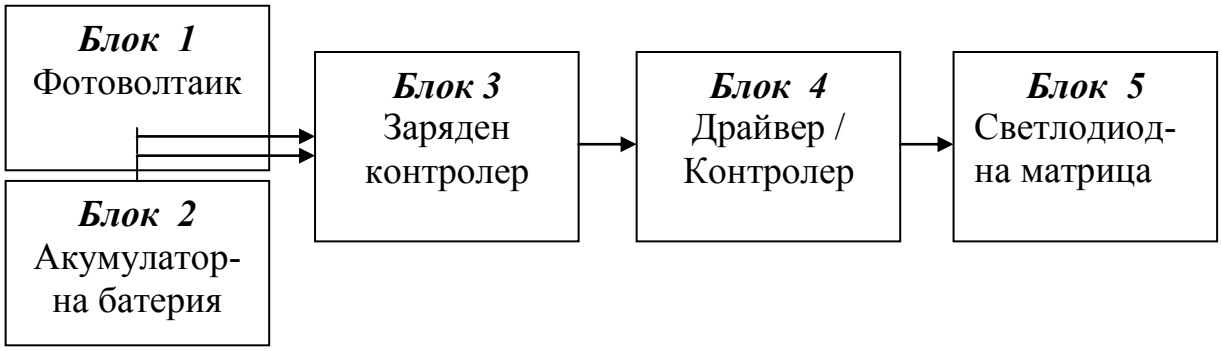
Фиг.2. Монтиране извън и в населено място

4. Разработване на макет на сигнален осветител за пешеходни пътеки със светлодиоди и автономно захранване

4.1. Описание на блоковата схема на макета

Използван е фотоволтаик с нужната мощност и компактен размер. Тъй като максималното му изходно напрежение при празен ход е 21V (при максимално слънцегреене), той е свързан към заряден контролер (ЗК), съобразен с мощността на панела, чието системно напрежение е 12V. Към зарядния контролер също така е свързана акумулаторна батерия, която се зарежда от фотоволтаика.

Нейната цел е осигуряване на непрекъсната работа на сигналния осветител (Светлодиодна матрица) и през тъмната част на денонощието. Драйвер / Контролера се захранва от изхода на (ЗК). Той служи за реализиране на сигнализиращият ефект на светлодиодите и разполага с 10 различни ефекта. Светлодиодната матрица е набор от 102 броя LED диода (5мм, червен, ярък), монтирани през основата на знака които оформят контура на пешеходеца и пътеката, както и светлоотразителния, триъгълен борд.



Фиг.3. Блокова схема на макета

Блок 1 – Фотоволтаик

Модел: FS-M10-36- VEMARK

Вид – монокристален; Брой клетки : 36; Размери : 349 x 298 x18 mm; Максимална мощност : 10W; Толеранс на мощността : + /- 5%; Напрежение при максимална мощност : 17,5 V; Ток при максимална мощност : 0,57A; Напрежение на празен ход : 21 V; Ток на късо съединение : 0,73 A; Температурен коефициент Isc (%) : 0,065 +/- 0.015 % / ºC; Температурен коефициент Voc (%) : -2,23 +/- 0,1mV / ºC ; Температурен коефициент Pm (%) : -0,5 +/- 0,05 / ºC; Температурен коефициент Im (%) : +0,1 / ºC; Температурен коефициент Vm (%) : -0,38 / ºC; Температурен обхват : -40 до +85 ºC; 90 % запазване на мощността за 10 години, 80% за 20 години

Блок 2 – Акумулаторна батерия

Модел: Ultrasell UL 7-12; Напрежение : 12V; Капацитет : 7Ah; Приблизително тегло : 2kg; Размери : 151 x 65 x 95 mm

Блок 3 – Заряден контролер

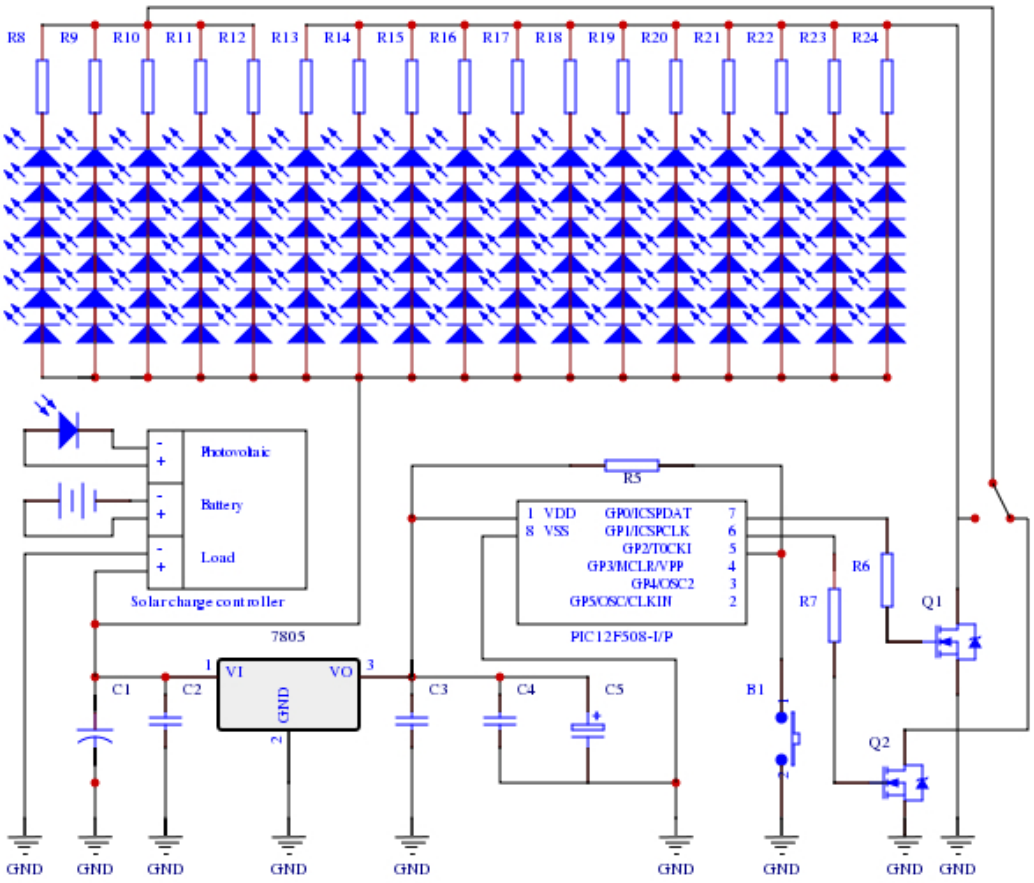
Модел: MPS 12-5-200; Собствена консумация : 200 μA - Малката собствена консумация е доминиращия критерии при избора на контролера; Ток на панела PV : 5A; Ток на товара : 5A; Подходящ за панели : 1÷85 W; Системно напрежение : 12 V; Функция “Night mode”

Блок 4 – Драйвер / Контролер

Реализиран с PIC12F508; Двуканален; Захранващо напрежение : 12V; Максимален товарен ток : 5A; Размери на платката : 50 x 34 mm. Пълното описание на използваните елементи е описано в табл.2. Трипозиционен ключ служи за прехвърлянето на всички диоди само към единия канал на Драйвер /Контролера с различен ефект.

Блок 5 – Светлодиодната матрица

Изградена от 102 LED диода, червени; Модел YQ-514 PRCW; Пад на напрежение в права посока : 1,5 V; Ток в права посока : 20 mA; Дължина на вълната : 630 ÷635 nm; Интензитет на светлината : 1000÷1200 mcd; Пълната мощност на светлодиодната матрица е: Рсв.м=4080 mW. Пълната мощността на сигналния осветител е :P= Рз.к.+ Рд.к. + Рсв.м.= 2,4 + 10 + 4080= 4092,4 mW (при постоянно светене), където : Рз.к.- мощността на зарядния контролер Рз.к.= 2,4 mW; Рд.к.- мощността на Драйвер/Контролера Рд.к.= 10 mW



Фиг.4. Схема на сигналният осветител за пешеходни пътеки

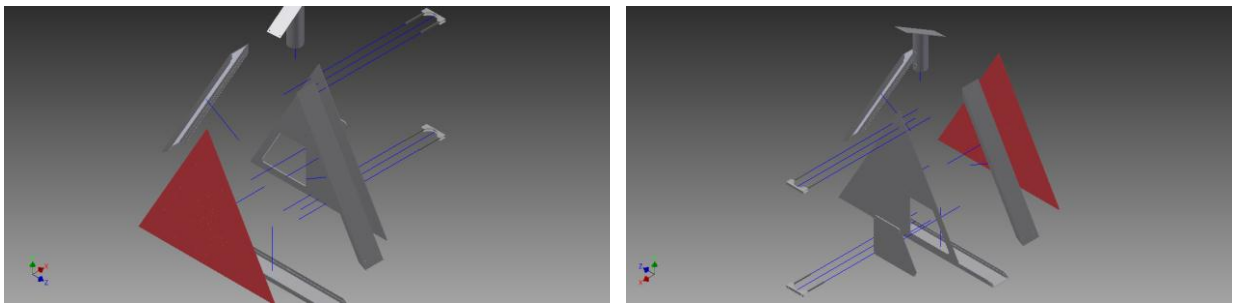
4.2. Проектиране на корпуса на осветителя

Корпусът на осветителя представлява табела на знак А18, апликирана върху бяла основа със светлоотразително, червено фолио по страните на равностранния триъгълник и черно за изобразяване на пешеходец, ходещ по пътека. Всички контури на знака са обточени със 102 отвора Ф5 mm, в които са разположени светлодиоди.

Видимият размер на основата на равностранния триъгълник е избран да бъде 700мм. Спрямо него е конструирана кутия от елоксиран алуминиев профил, в която е осигурено защитено от атмосферните условия място, където да бъдат монтирани компонентите на осветителя. Габаритите на знака, използваните фолиа и начина на закрепване са съобразени с изискванията и нормите.

Конструирана е стоика за фотоволтаичния панел с постоянен ъгъл спрямо хоризонталата 32º и възможност за позициониране спрямо посока юг при каквото и да е положение на знака.

Цялостното проектиране на макета е направено с помощта на програмния продукт Autodesk Inventor 2012. На фиг.5 са показани съставните елементи на триизмерен модел на осветителя.

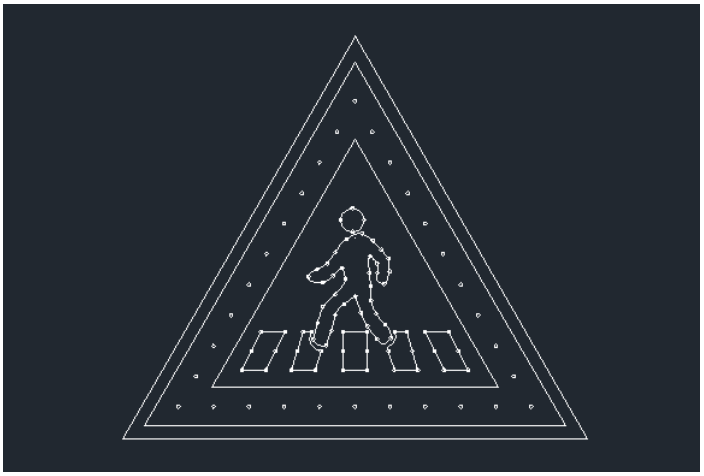


Фиг.5. Съставни елементи на модела на осветителя - преден и заден план

4.3. Изработване на проектирания осветител

Изработката на предната и задната страна на знака е направена на цифрово-програмируема фреза CNC. На базата на чертежите от триизмерния проект, направен на CAD продукта Autodesk Inventor, посредством използването им в CAM продукта EnRoute, се генерират няколко програми, с които се реализира изработката на детайлите.

По този метод е направено и апликирането на фолиата. Върху предната страна на знака, преди изрязването и пробиването на самата плоскост е залепено първо черното фолио. Залепеното парче е с размери по-големи от общия контур на пешеходеца и пътеката, показани на фиг.6, по показаните контури се гравира с тънък инструмент, след което излишното фолио се отстранява и така се получава нужната апликация.



Фиг.6. Контури на апликираните фолиа, знак А18

Материалът, от който са изработени двете страни е разпенено PVC (Forex, дебелина 5 mm), лек и устойчив на атмосферните условия материал, лесен за обработка.

Самозалепващото светлоотразително фолио е ORAFOL 5510 (дебелина 110 микрона). С акрилното си покритие е устойчиво на химикали и корозия. Гарантира видимост и при лоши атмосферни условия. Сертифицирано от оторизирани български лаборатории за изработка на пътни знаци за републиканската пътна мрежа. Трайността му е над 7 години.

Фиг.7. Разработеният макет на сигнален светещ знак А18
със светлодиоди и автономно захранване

4.4. Изследване на разработения образец на осветител

Разработеният осветител трябва да отговаря на следните изисквания:

- Да се забелязва от достатъчно голямо разстояние (по-голямо от това на обикновен знак);
- Да работи постоянно 24 часа в денонощието;
- Да има достатъчен запас от енергия за постоянна работа и в тъмната част на денонощието;
- Да възстанови енергийния си запас по време на светлата част на денонощието;
- Да отговаря на изискванията за монтаж;
- Да е защитен от атмосферните условия .

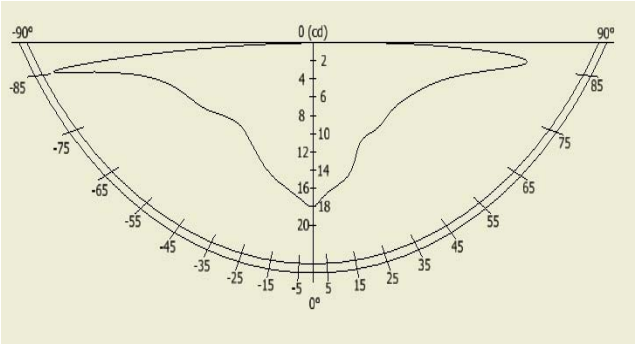
В лаборатория 12303 по „Осветителна и инсталационна техника“ към Технически университет София са направени следните изследвания:

- *Определена е (с луксметър Testo 545) средната стойност на интензитета на светлината по остта на светлодиодите (I=1,2 cd).*
- *Измерената стойност на светимостта* $M \approx 180\ lm/m^2$.
- *Определяне на светлоразпределителна крива на осветителя в напречната (хоризонтална) равнина*
- *Измерването е извършено и в двете посоки във вертикалната равнина (-90°, 0°, 90°). На фиг.8. е дадена светлоразпределителната крива (СРК).*
- *Опитно установяване на честотата на премигване .*

Честотата и начина на премигване може да се променят от Драйвер /Контролера. Измерването е проведено при премигване на всички диоди с най- ниската честота , която опитно установено е 2 Hz.

- *Определяне на времето за работа при напълно заредена батерия*

Опитът е проведен при напълно заредена батерия без зареждане от фотоволтаика. При премигване с установената честота, осветителят работи 170 часа, след което спира да работи.



Фиг.8. Светлоразпределителна крива

- *Определяне на времето за зареждане на напълно разредена батерия*

Опитът показва, че при ясно и слънчево време за приблизително 12 часа разредената батерия се зарежда напълно.

- *Определяне на разстоянието, от което се забелязва сигналния осветител*

Направени са няколко условни измервания на разстоянието, от което се вижда осветителя на прав участък. В светлата част от денонощието се забелязва от 500m , а през тъмната над 700 m, което в градски условия е напълно задоволително.

Табл.2.

Характеристика на разработения сигнален осветител

Общи данни:	
Габаритни размери:	720 x 624 x195, mm
Отстояние от пътното платно :	0,3 ÷ 2, m
Отстояние по вертикала от земя:	2,25, m
Материали:	
Рамка :	Елоксиран алуминий
Основа :	Forex
Фолиа :	Orafol
Уплътнение:	Силикон.
Начин на работа:	
Вид светлинен източник:	СД-102бр., 1200 mcd, 15^0, червен
Време за зареждане:	**3÷4** ч. при дозареждане;
Време на работа при пълен заряд:	**170** ч.
Режим на светене:	**24** ч.
Честота на мигане:	Мигащ. **2 Hz**.
Соларен панел:	
Тип:	Монокристален
Максимална изходна мощност:	10, W
Максимален ток:	570, mA
Напрежение при макс. мощност:	17,5, V
Степен на защита:	IP42
Особености:	Устройството позволява бързо и лесно обслужване или ремонт.

4. Заключение

Направен е анализ на пътнотранспортните произшествия, обзор на изискванията за сигнален осветител (знак А18). На базата на тази информация е разработен и реализиран макет на сигнален осветител със светлодиоди и автономно захранване. Въз основа на изследванията могат да се направят следните изводи: а) Разработеният сигнален осветител се вижда в светлата част на денонощието от 500m, в тъмната над 700m, което го прави много по-забележим от обикновен светлоотразителен знак; б) Работи автономно 24 часа в денонощието/ 7 дни в седмицата; в) Конструктивно отговаря на техническите изисквания; г) Устойчив е на атмосферните условия; д) Разработеният осветител (знак А18) може послужи във вертикалната пътна маркировка или при подмяна на вече съществуващите остарели пътни знаци.

Литература

[1] *http://www.strategy.bg/* –***Национална стратегия за подобряване безопасността на движението по пътищата на Република България за периода 2011-2020 г.***

[2] *http://www.blitz.bg/news/article/175357* - Статия за ПТП през 2012г.

[3] *http://dokkpbdp.mvr.bg* – ***Държавно –обществена консултативна комисия по проблемите на безопасността на движението по пътищата*** ,Статистически данни.

[4] *http://www.bsplpptp.bg/* - ***Българско сдружение за подкрепа на пострадалите при пътнотранспортни произшествия***. Статистически данни .

[5] *http://www.api.government.bg* – Министерство на регионалното развитие и благоустройството, Агенция „ Пътна инфраструктура“ – ***Технически изисквания при изпълнение на пътни знаци***

[6] *www.microasu.com/* - ***Светлоотразителни фолиа***

Автори: Захари Александров Иванов, доц. д-р инж., катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *zai@tu-sofia.bg;* маг. инж. Ясен Динков, E-mail address: *yasen_87@abv.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент:** проф. д-р Хр. Василев

КАК СЕ ОПРЕДЕЛЯ ЕФЕКТИВНОСТТА НА СВЕТОДИОДНИ УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛИ

Ива Драганова

Резюме: *В доклада са разгледани факторите влияещи върху ефективността на светодиодните улични осветители. Обърнато е внимание на влиянието на светлоразпределението, като е разгледан уличен светодиоден осветител с три различни светлоразпределения с мощност 24W. Резултатите илюстрират разликата в коефициента на използване на светлинния поток в различните варианти.*

Ключови думи: *експлоатационен фактор, светодиод, светодиоден осветител*

HOW TO DETERMINE THE EFFECTIVENESS OF LED STREET LUMINAIRE

Iva Draganova

Abstract*: The report examined the factors affecting the efficiency of LED street lamps. Attention is paid to the influence of light distribution, as discussed street LED lamp with three different light distribution and power 24W. The results illustrate the difference in the factor of luminous flux in different variation.*

Keywords: *maintenance factor, LED, LED luminary*

1. Въведение

Ефективността на една светодиодна система се определя от няколко фактора. Това са светлинният добив на светодиода, загубите в пускорегулиращата апаратура - Драйвера, загубите в оптичната система и температурата на p–n прехода. Факторите влияещи върху светодиодните осветители са:

- Сортиране на светодиодите по бин
- Термичното влияние
- Загуби в драйвера
- Загуби в оптичните лещи
- Загуби в защитното стъкло
- Експлоатационен фактор

От фиг.1 се вижда колко интензивно се развиват светодиодните източници на светлина. За период от 10 години светлинният добив е нараснал три пъти.

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

ISSN 1311-0829

Фиг.1. Нарастване на светлинния добив на светодиодите в лабораторни условия Тц = 4000К Ra = 80

Друг съществен фактор е определянето на експлоатационния фактор (MF). Именно с избора на стойността на експлоатационен фактор, се задават условията на експлоатация на осветителната уредба и задължителни действия по нейното обслужване. Експлоатационният фактор MF за външни осветителни уредби се състои от три компонента както е видно от формула (1)

$$MF = LLMF * LSF * LMF \quad (1)$$

LMF (Luminaire Maintenance Factor) - определя деградацията на светлинния поток на осветителите вследствие на замърсяване и стареене на оптичната система. Стойността на този компонент зависи от три неща:

- степента на защита на осветителното тяло IP
- периода на почистване на осветителните тела
- степента на замърсяване на околната среда

LSF (Lamp Survival Factor)

Втория компонент от зависимостта (1) LSF (Lamp Survival Factor) оценява възможността за авария на лампата /светодиодния модул/. Поради прилагането на високи стандарти за качество и използването на най-нови технологии при светодиодните модули тази възможност е много ниска. Процента на авариралите модули е между 1 и 2% или стойността на LSF може да се приеме 0.98 за светодиодни модули.

LLMF (Lamp Lumen Maintenance Factor)

Компонента на експлоатационния фактор LLMF (Lamp Lumen Maintenance Factor) оценява намаляването на светлинния поток през целия живот на източника на светлина. Както при другите източници и при светодиодите се наблюдава намаляване на светлинния поток по време на експлоатация. Деградацията на светлинния поток в края на живота на светодиодния модул светлинния поток намалява с 30% или стойността на LLMF е 0.7 .

Появата на светодиодните източници допринесе основно до промяна в начина по който се определя експлоатационният им фактор поради многократно подългия живот на светодиодните източници, чиято предполагаема продължителност е десетки години и се определя на база апроксимации, екстраполационни и вероятностни показатели.

Светлоразпределение на светодиодните улични осветители

Светлоразпределението на осветителите е друг съществен фактор, които сериозно влияе върху ефективността на светодиодната система. Светодиодите имат Ламбертово светлоразпределение, излъчвания поток е разпределен в ъгъл от 120º, което чрез използването на оптични лещи се преобразува в типичното за уличните осветители светлоразпределение.

Уличните осветители с класически светлинни източници (НЛВН, КЛЛ, МХЛ) се характеризират с много „разпиляна" светлина, попадаща върху фасадите на сградите и околните пространства. При светодиодните осветители, благодарение на оптичните лещи почти цялото количество светлина, излъчено от светодиодите се насочва върху уличното платно и удовлетворяването на показателя SR. За някои оптични лещи, при определени геометрии на уличната уредба, това е проблем.

Чрез намалената разпиляна светлина се създават предпоставки за намаляване на необходимия светлинен поток до 20 - 25%. Това е едно от съществените преимущества на оптични лещи при светодиодното осветление.

2. Изложение

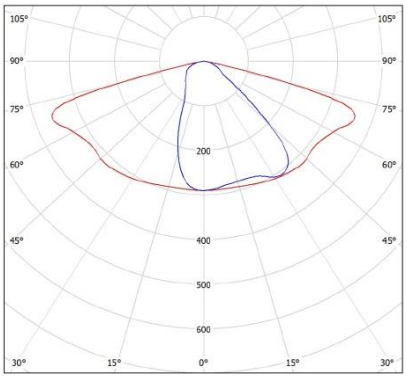
В настоящата разработка е разгледан уличен светодиоден осветител от водещ производител. Светодиодния осветител SpeedStar е изработен в гама от мощности от 16W до 252W. Цветната му температура може да е 5700К, 4000К или 3000К.

Фиг. 2 Уличен светодиоден осветител SpeedStar

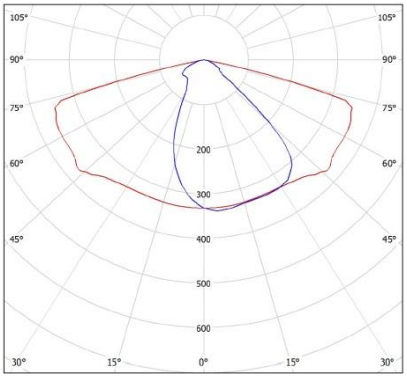
Параметри на осветителното тяло

- Модификация – PHILIPS BGP 322 T35 1x24/830
- Мощност - 24W
- Светлинен поток на осветителя – 2160lm
- Светлинен поток на лампата – 2400 lm
- Цветна температура – 3000К

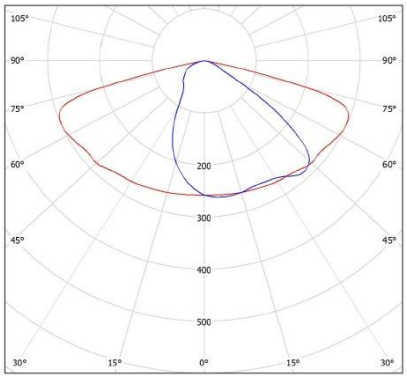
Този светодиоден осветител има три модификации, с три различни светлоразпределения, показани в таблицата, съответно крива DM, крива DN, и крива DW.



Крива - DM

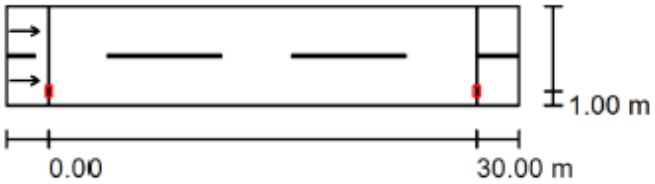


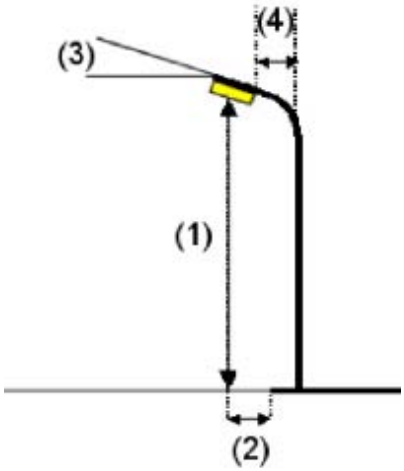
Крива – DN



Крива - DW

Постановка на зрителната задача



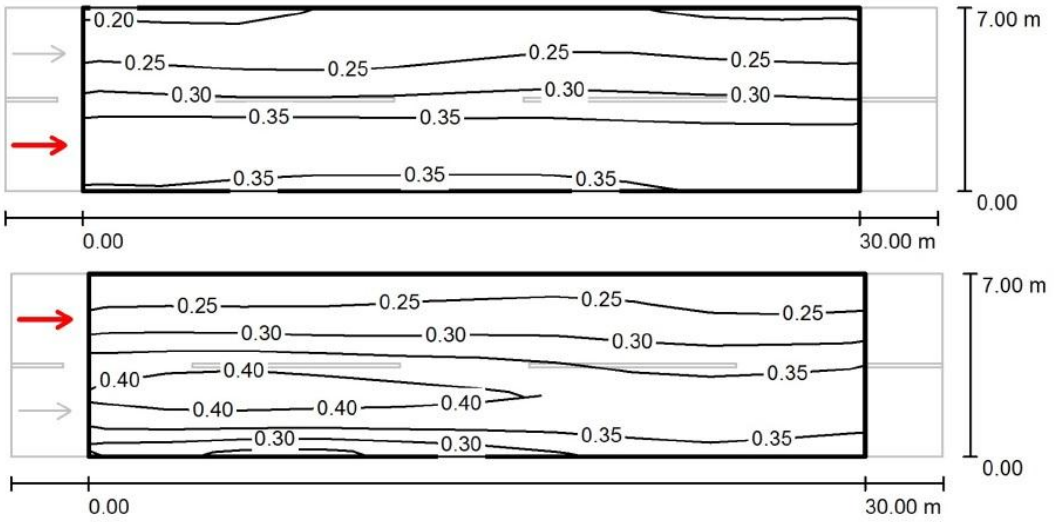


- Клас на уличното платно ME6
- Междустълбие – 30 метра
- Широчина на уличното платно – 7 метра
- Рогатка – 1,20 метра
- Надвес – 1 метър
- Ъгъл на рогатката - 0^0

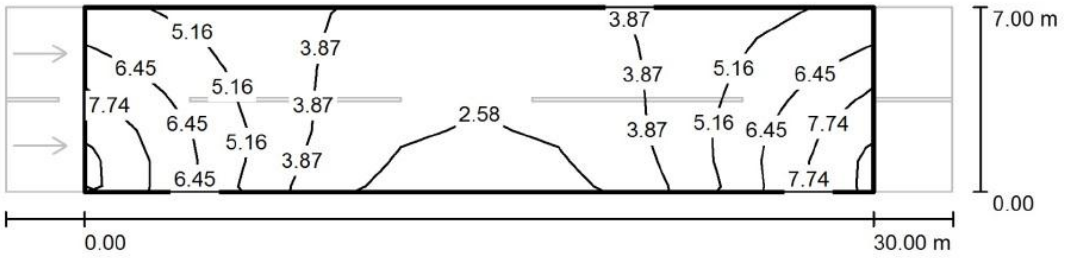
Получени резултати – крива DM

Lav [cd/m^2]	**Uo**	**Ul**	**TI[%]**	**SR**
>0.30	**>0.35**	**>0.4**	**<15**	/
0.31	0.64	0.9	8	0.56
Eav[lx]	**Emin[lx]**	**Emax[lx]**	**Uo**	**Emin/Emax**
4.60	2.00	8.44	0.435	0.237

Разпределение на яркостите по пътно платно за лявото и дясното платно



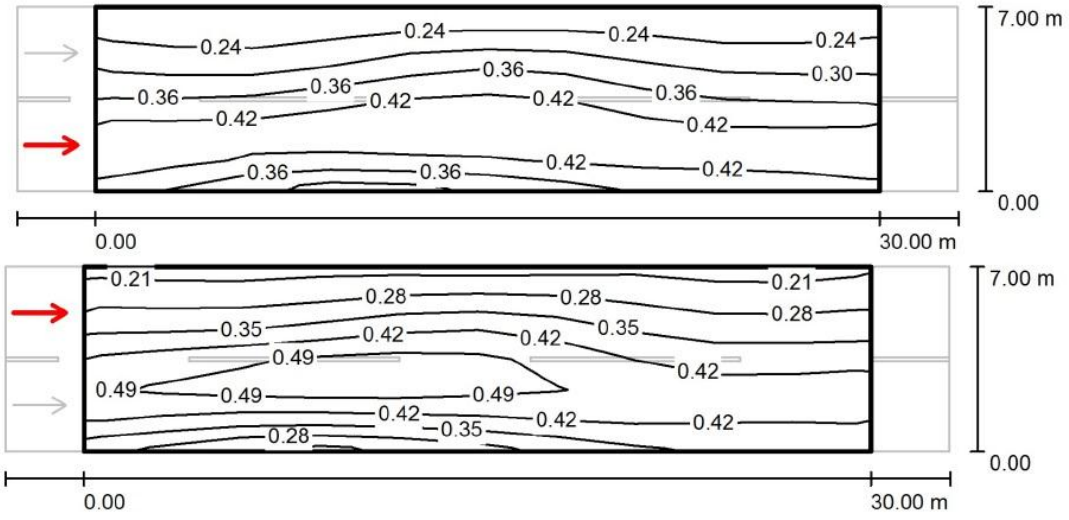
Разпределение на осветеностите по пътното платно



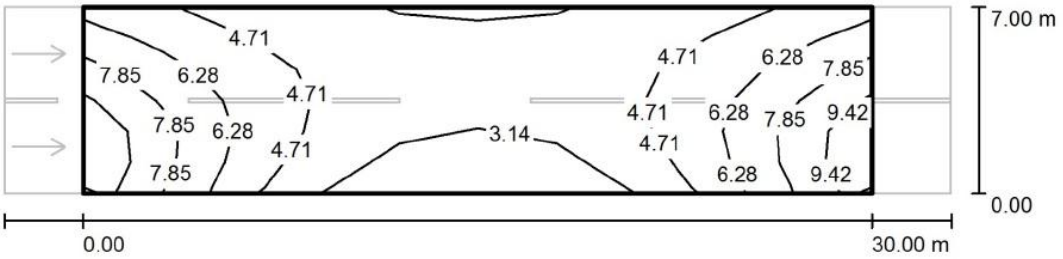
Получени резултати - крива DN

Lav [cd/m^2]	Uo	Ul	TI[%]	SR
>0.30	**>0.35**	**>0.4**	**<15**	/
0.35	0.54	0.75	8	0.43
Eav[lx]	**Emin[lx]**	**Emax[lx]**	**Uo**	**Emin/Emax**
5.21	2.06	9.92	0.395	0.208

Разпределение на яркостите по пътно платно за лявото и дясното платно



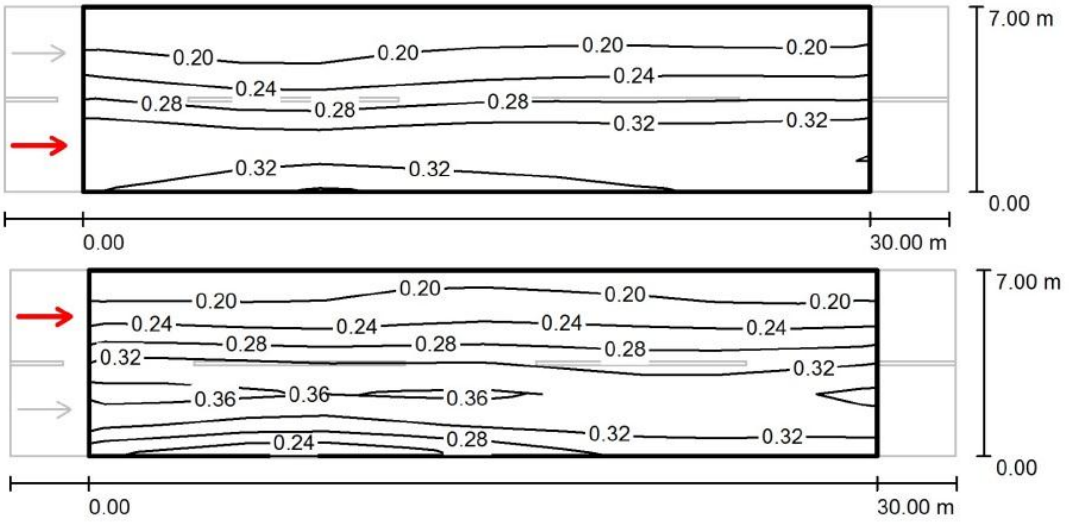
Разпределение на осветеностите по пътното платно



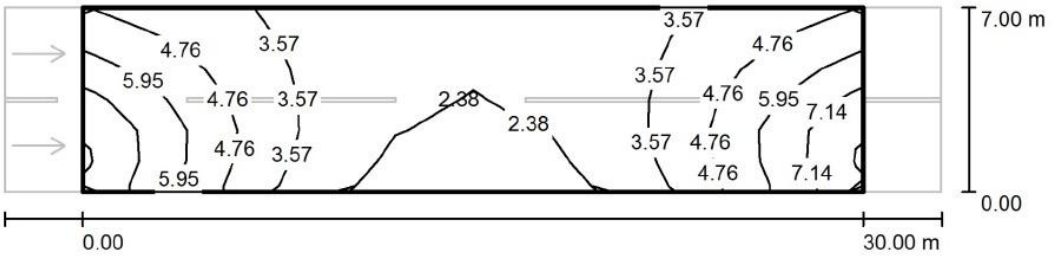
Получени резултати – крива DW

Lav [cd/m^2]	Uo	Ul	TI[%]	SR
>0.30	**>0.35**	**>0.4**	**<15**	/
0.27	0.61	0.93	7	0.69
Eav[lx]	**Emin[lx]**	**Emax[lx]**	**Uo**	**Emin/Emax**
4.05	1.80	7.74	0.445	0.233

Разпределение на яркостите по пътно платно за лявото и дясното платно



Разпределение на осветеностите по пътното платно



Коефициент на използване на светлинния поток

Ки = Ф $_{у.п.}$ / Ф $_{осв}$

Ф $_{у.п}$ = Е $_{ср}$ х S = Е $_{ср}$ х А х В

Коефициент на използване на светлинния поток - **Крива DN**

- Два тротоара х 1,5 метра
- Е $_{ср\ тр}$ = 2,24 lx
- Ф $_{тр}$ = 201,60 lm
- Ф $_{тр+ул.пл}$ = 1295,7 lm
- Ки = 0.74

Коефициент на използване на светлинния поток - **Крива DM**

- Два тротоара х 1,5 метра
- $E_{ср\ тр}$ = 2,58 lx
- $Ф_{тр}$ = 231,84 lm
- $Ф_{тр+ул.пл}$ = 1197,84 lm
- Ки = 0.69

Коефициент на използване на светлинния поток - **Крива DW**

- Два тротоара х 1,5 метра
- $E_{ср\ тр}$ = 2,79 lx
- $Ф_{тр}$ = 251,1 lm
- $Ф_{тр+ул.пл}$ = 1101,6 lm
- Ки = 0.63

3. Заключение

Направените изследвания в доклада са с реалните осветителни тела и показатели декларирани от производителя. След направените изчисления с програма за светлотехнически изчисления DiaLux могат да се направят следните изводи.

1. Светлоразпределението оказва значително влияние върху яркостните коефициенти реализирани върху пътното платно;
2. С добре подбрана светлоразпределителна крива може да се постигнат с 30 % по-добри количествени показатели;
3. Коефициента на използване на светлинния поток е с 15% по-добър;
4. Светодиоден осветител 24W може да реализира всички количествени и качествени показатели за улица клас ME6 (междустълбие 30 метра, ширина на пътното платно 7 метра);

Благодарности

Авторите изказват благодарност на проекта ДУНК 01/3 за подкрепата при проведените проучвания.

Литература

[1] *Бърдарски Н. , Василев Х,* ***Функцията „постоянен светлинен поток” – новата технология в светодиодното улично осветление****, Енергиен форум 2012;*

[2*] http://www.philips.com*

[3] *http://www.ssl.energy.gov*

Автори: маг. инж. Ива Димитрова Драганова, докторант, към катедра “Електроснабдяване,електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivadraganova@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. З. Иванов

ИМПЕДАНСНО РЕЛЕ RIS-2 ЗА СЕКЦИОНЕН ПОСТ НА ТЯГОВИ МРЕЖИ 25KV

Иван Ангелов

Резюме: *Представено е хардуерно решение и софтуерни настройки на цифрово импедансно реле за защита на секционни постове в тягови мрежи за променлив ток с работно напрежение 25kV и промишлена честота.*
Ключови думи: *реле, импедансно, тягови, подстанции*

IMPEDANCE RELAY RIS-2 FOR SECTION PILE OF TRACTION NETWORKS 25kV

Ivan Angelov

Abstract: *Presented is a hardware solution and set points for digital impedance relay to protect the section pile outputs in traction networks for 25kV AC operating voltage.*
Keywords: *relay, impedance, traction, substation*

1. Въведение

В основните секционни постове (ОСП) като елемент на защитата се използва реле тип РТС. Релето РТС, в комбинация с реле за време, се задейства от различна големина на тока в зависимост от процентното съдържание на трети хармоник. При използване на реле за време със зависимо от тока закъснение (РВТ), закъснението е в зависимост от големината на тока по време на късото съединение [1].

При паралелна работа на две тягови подстанции през ОСП и настъпване на авария някъде по трасето, трябва да се изключи селективно първо прекъсвача в ОСП и после прекъсвача на подстанцията от страна на аварията. Тази селективност се постига с по-малко времезакъснение на РВТ в ОСП спрямо съответните РВТ в тяговите подстанции [1].

Трети хармоник в тока има при работата на токоизправителните електрически локомотиви. Вече в експлоатация у нас има по–съвременни електрически локомотиви с електронни преобразуватели, при които работният ток е почти синусоидален с малко висши хармоници. Без висши хармоници в тяговия ток релето РТС няма селективност при големи товарните токове. Налага се да се използва релейна защита, която да реагира на параметрите на тяговата мрежа и товара. Това са така наречените импедансни защити.

Такъв тип е релето RIS-2, разработено за защита на изводите в тягови подстанции [2]. Времезакъснението в зависимост от тока на RIS-2 е със стойности за тягова подстанция [3].

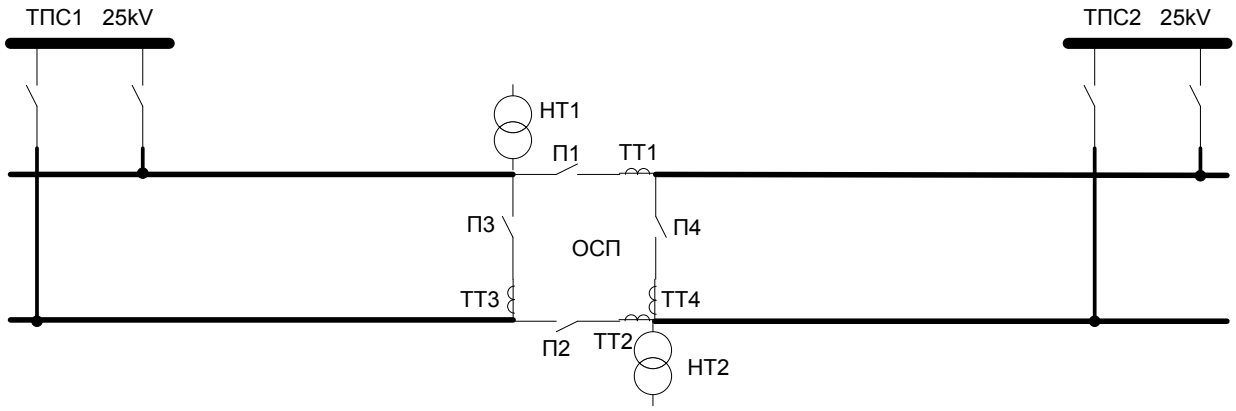
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

За да работи реле RIS-2 в ОСП е необходимо да се направи съответната настройка на времезакъснението според тока, както и да се осигури непрекъснато електрозахранване на апаратурата като в тягова подстанция.

2. Схема на секционен пост при двупътен участък

На фиг.1 са показани схематично контактната мрежа при двупътен участък, изводите в тяговите подстанции и секционния пост. Това е по – сложния вариант с няколко конфигурации според това кои прекъсвачи в ОСП са включени. Възможни са следните режими на работа: - надлъжен паралел между двете подстанции през прекъсвачи П1 и П2; - напречен паралел, между два съседни пътя към една и съща подстанция, през прекъсвачи П2 и П4, както и комбинация от двете.

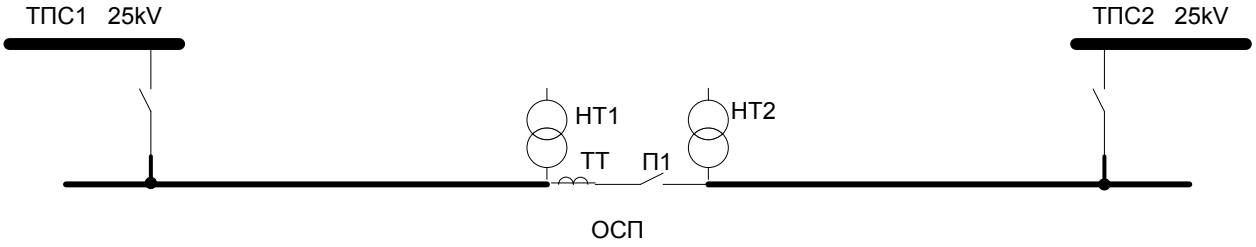


Фиг.1.

Във веригата на всеки прекъсвач има токов трансформатор. По-особено стои въпроса с напреженовите трансформатори. В някои секционни постове те са четири - по един на всеки извод, докато при други са само два - в „диагонала“ на квадрата оформен от прекъсвачите. Втория вариант усложнява свързването на цифрови защити тъй като те трябва да следят и напрежението на контактната мрежа. При захранване от едната подстанция и настъпване на авария след ОСП, част от защитите или всички могат да останат без мерене на напрежение. При схема на секционен пост като на фиг.1 трябва защитите за прекъсвачи П1 и П3 да са включени към напреженов трансформатор НТ1, а за П2 и П4 към НТ2.

3. Схема на секционен пост при еднопътен участък

Еднопътен участък с контактната мрежа между съседни тягови подстанции и секционен пост в средата е показан на фиг.2.



Фиг.2.

Тук има един прекъсвач с един токов и два напреженови трансформатора. При авария между някоя от подстанциите и секционния пост първо трябва да изключи защитата в ОСП, а след това защитата на извода към авариралия участък.

4. Времезакъснение в зависимост от тока на късо

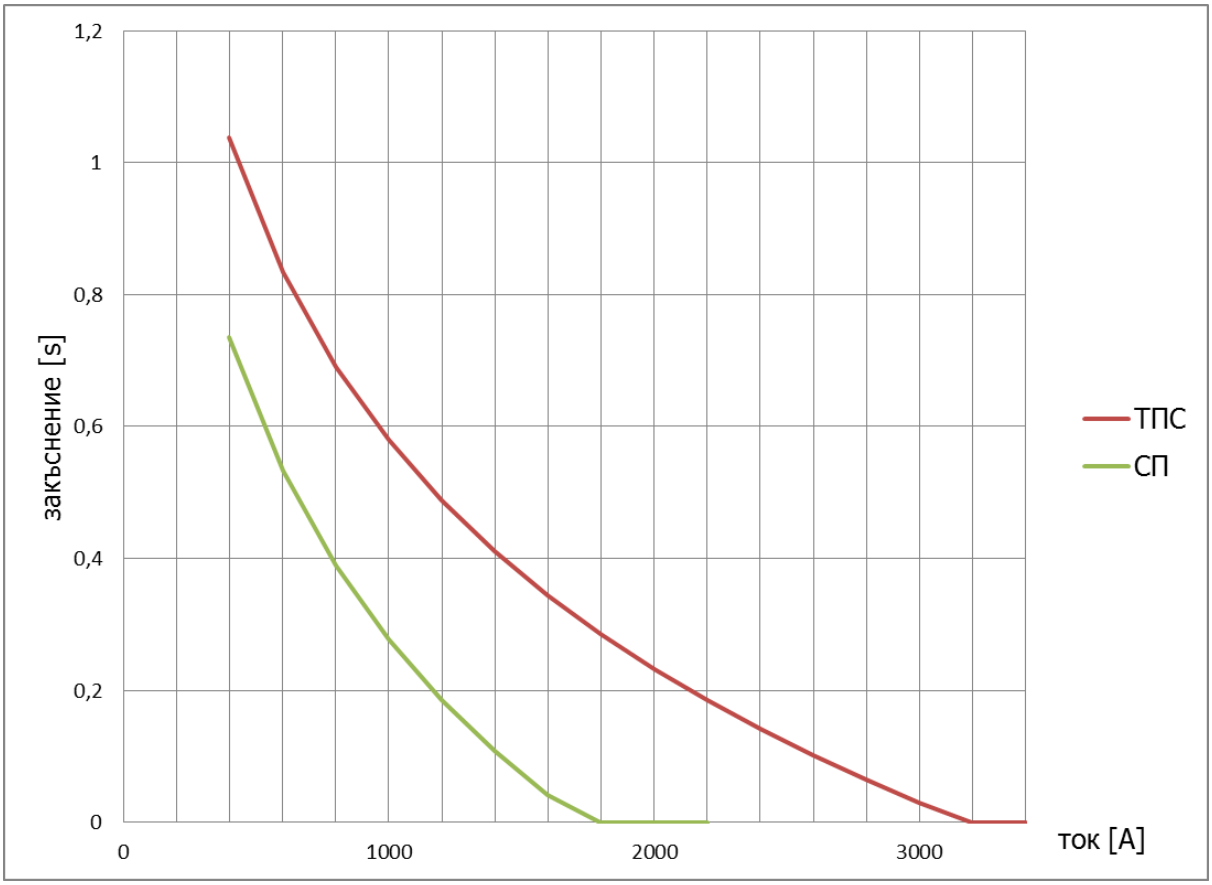
Колкото по-близо до източника е късото съединение толкова по-бързо трябва да се изключи то. Токовата отсечка трябва да задейства при ток над 3000А, което определя тока изключван с нулево закъснение. Минималният очакван ток на късо съединение е 400А. При тези ограничения са получени изразите (1) и (2) за определяне на закъснението в зависимост от тока на късо [1] и [4].
За тягова подстанция времезакъснението е:

$$t_{ТПС} = 0.5 * \ln\left(\frac{3186}{I}\right) \text{ [s]} \quad (1)$$

Съответно за секционен пост:

$$t_{СП} = 0.5 * \ln\left(\frac{1741}{I}\right) \text{ [s]} \quad (2)$$

където I, в ампери, е тока на късо съединение.
За постигане на селективност на изключване при паралелна работа са установени оптимални времезакъснения според големината на тока на късо [4] и [1] за защитата в тягова подстанция ТПС и за основен секционен пост ОСП.
Графиките на зависимостите по (1) и (2) са показани на фиг.3.

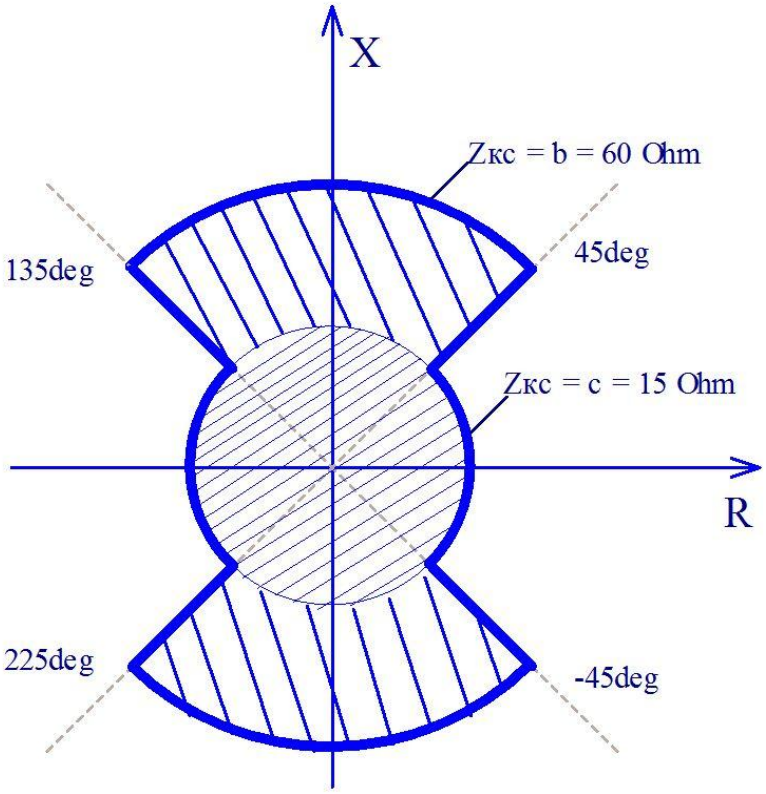


Фиг.3.

Цифровото импедансно реле **RIS-2** е проектирано за тягова подстанция и пресмята времето на изключване по (1). Същото реле пренастроено за работа в секционен пост се именува **RIS-2sp** и пресмята времезакъснението по (2). По този начин се постига селективно изключване на защитите при паралелна работа на тягови подстанции и се изключва само участъка с авария.

5. Симетрия на характеристиката на RIS-2sp

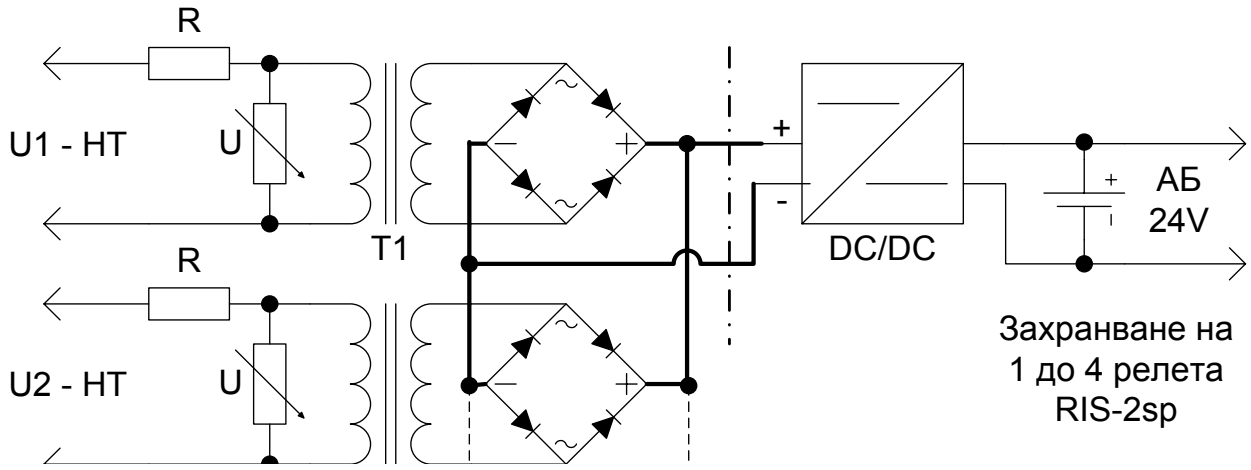
Импедансната характеристика по която изключва релето [3] е симетрична в четирите квадранта и е показана на фиг.4. Тази характеристика е заложена и в релето **RIS-2** въпреки че там не се очаква и не се предвижда работа в друг квадрант освен първи. Във варианта за секционен пост е възможна работа и в другите квадранти. Например от фиг.2 - според това дали късото е в ляво или в дясно от секционния пост, протичащия през прекъсвача ток ще е в различна посока. Съответно в едната посока релето ще го измери със знак „+“ а в другата със знак „-“. При симетрична характеристика като на фиг.4 всяко късо съединение ще бъде изключено селективно и правилно. Иначе казано, релето **RIS-2sp** не се влияе от сфазирането на *U* и *I*.



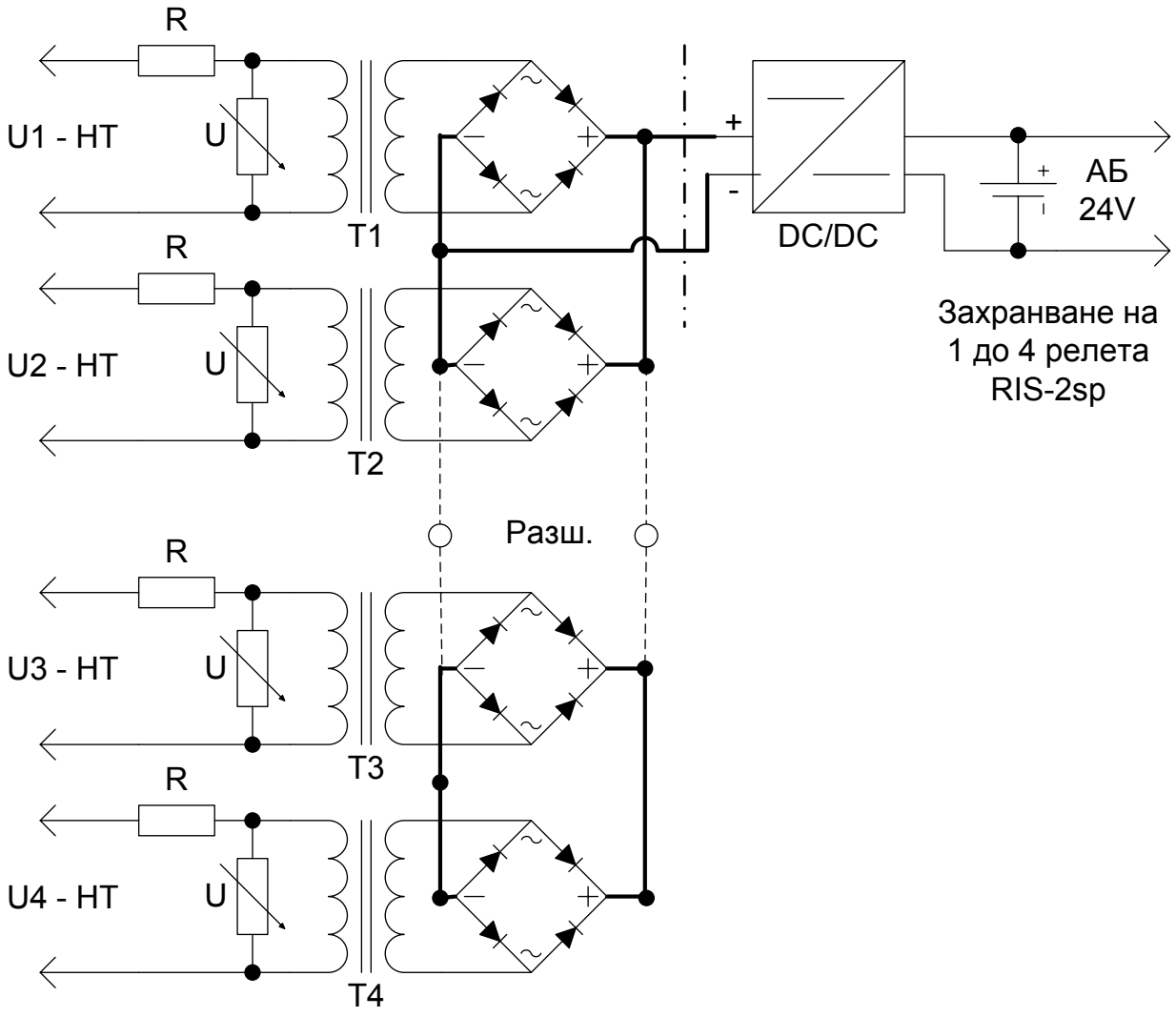
Фиг.4.

6. Захранване на защитите в „ОСП“

За да се осигури непрекъснато захранване на защитите се предвижда акумулаторна батерия АБ с напрежение 24V. Батерията се поддържа заредена от специализиран DC/DC преобразувател (захранващ блок). Схемата на захранващ блок с акумулаторната батерия и входните разделящи трансформатори е показана на фиг.5.


R
U1 - HT
U
T1
R
U2 - HT
U
+
-
DC/DC
АБ
24V
Захранване на
1 до 4 релета
RIS-2sp

Фиг.5.


R
U1 - HT
U
T1
R
U2 - HT
U
T2
Разш.
R
U3 - HT
U
T3
R
U4 - HT
U
T4
+
-
DC/DC
АБ
24V
Захранване на
1 до 4 релета
RIS-2sp

Фиг.6.

Двата разделящи трансформатора T1 и T2 получават захранване от два напреженови измервателни трансформатора. Входовете на T1 и T2 са защитени от пренапрежение с токоограничаващи резистори R и варистори U. Изходите на трансформаторите са свързани в паралел през мостови токоизправители. Така трансформатора с най-високо изходно напрежение захранва DC/DC преобразувателя. При секционен пост с четири напреженови трансформатора се добавя още един модул (в ляво от вертикалната прекъсната линия) с два разделящи трансформатора свързан към клемите „Разш.”. Схемата е показана на фиг.6.
По този начин при наличие поне на едно от входните напрежения има захранване за импедансните релета. Ако за известно време (до няколко часа) липсват всичките захранващи напрежения тогава защитите се захранват от акумулаторната батерия. Това захранване може да се използва и за командните вериги на прекъсвачите, както и за захранване на SCADA системата.

7. Изводи

Разработеното импедансно реле **RIS-2** [2], след съответните промени в настройките, и монтиране на захранващ модул за 24V DC ще може да се използва като защита в секционни постове „ОСП“, като за разпознаване ще носи абревиатурата **RIS-2sp**.

RIS-2sp ще разпознае настъпването на аварийна ситуация и ще изключи независимо от конфигурацията на мрежата и местоположението на аварията спрямо секционния пост.

Технически няма никакви пречки захранващото напрежение да бъде например 48V DC. Определящо е работното напрежение на управляващите вериги на прекъсвачите.

В секционните постове ще се използват съществуващите измервателни трансформатори, като напреженовите трансформатори (2 или 4 броя) ще служат и за захранване на импедансните релета.

уточнение: в някои нови или модернизирани секционни постове се предпочита монтирането на високомощностни разединители. С тях могат да се правят оперативни превключвания, но не заместват прекъсвача. Там няма и не може да има защита както и нормална паралелна работа между две подстанции (два съседни пътя) със селективно изключване при настъпване на авария.

Литература

[1] Матов П., М. Ганов, Резултати от изпитвания на релейна защита на двупътни ЖП участъци. Сп. Железопътен транспорт, 05/1994г., стр. 9-11

[2] Ангелов И., Хардуерна реализация на импедансно реле за тягови мрежи 25kV, годишник на ТУ-София, т.60, кн.2, 2010, стр.193-198

[3] Ангелов И., Алгоритъм на работа на импедансно реле за тягови мрежи 25kV, годишник на ТУ-София, т.60, кн.2, 2010, стр.199-202

[4] Ганов М., Релейна защита на контактна мрежа при паралелна работа на тяговите подстанции. Сп. Железопътен транспорт, 04/1982 г.

Автор: Иван Колев Ангелов, гл. ас. инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivanang@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. Петър Матов

ПРИЛОЖЕНИЕ НА МИКРОКОНТРОЛЕРИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ТИРИСТОРНИ ТОКОИЗПРАВИТЕЛИ

Иван Ангелов, Иван Петров

Резюме: *В статията е разгледано приложението на едночипов микроконтролер за управление на трифазен тиристорен токоизправител. За целта се използва един синхронизиращ сигнал, шест изхода за управление на тиристорите, програмно осигуряване според принципите на управление на трифазен токоизправител и подходящ алгоритъм на работа.*

Ключови думи *микроконтролер, управление, токоизправител*

APPLICATION OF MICROKONTROLLERS FOR THYRISTOR RECTIFIERS MANAGEMENT

Ivan Angelov, Ivan Petrov

Abstract: *The article discussed the use of single-chip microcontroller for control of three-phase thyristor rectifier. For this purpose we use a clock signal, six outputs for control of thyristors, software according to the principles of management of three-phase rectifier and a suitable algorithm to work.*

Key words: *control, microcontroller, rectifier*

1. Въведение

При изграждане на трифазни управляеми токоизправители за захранване на електрически товари, има необходимост от проста и надеждна система за управление на тиристорите. Когато тиристорният токоизправител е напълно управляем се формират управляващи импулси за шеста тиристора. Те могат да бъдат изработени посредством аналогови или цифрови интегрални схеми. Това налага използването на голям брой операционни усилватели, компаратори и RC закъснителни звена. Такива сложни електронни устройства се настройват трудно, намалява се надеждността и се оскъпява системата за управление. Ето защо използването на микроконтролер позволява да се реализират сложни управляващи и регулиращи системи.

2. Структура на микроконтролера

На фиг.1 е показана структурата на микроконтролер от типа **PIC16F87x**. Това е съвременен 8 битов микроконтролер с вградена периферия. Микропроцесорът свързва всички блокове на микроконтролера (памети, таймерни модули, входно

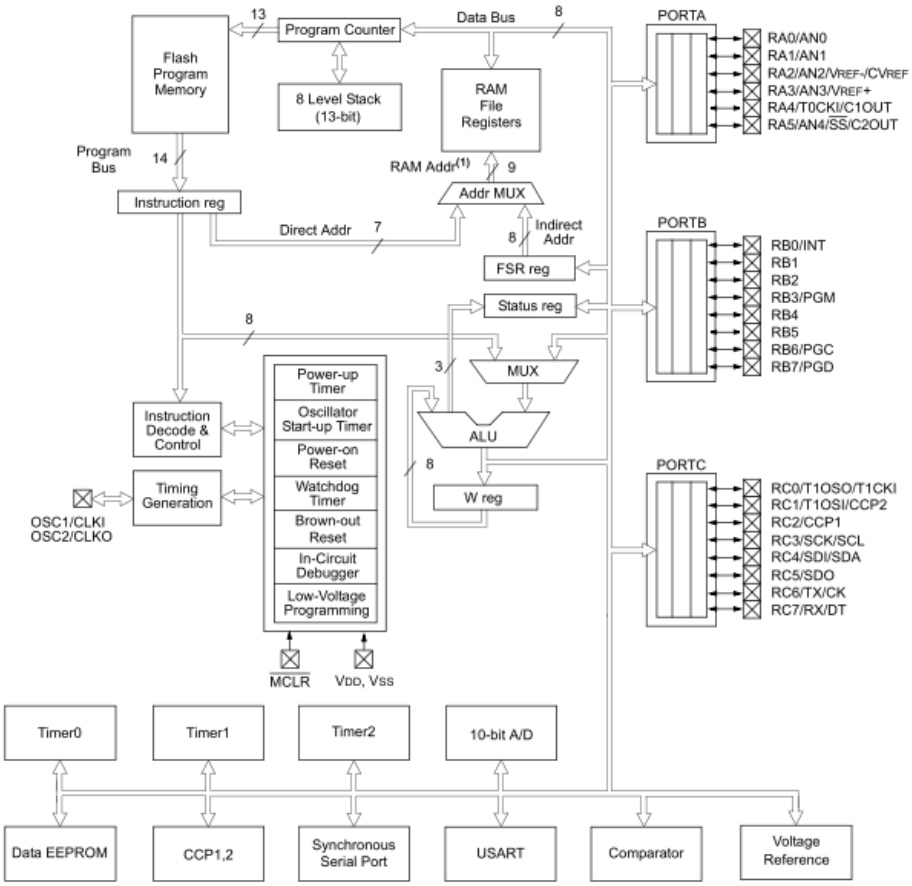
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

- изходни портове) в едно цяло, като управлява работата им и осъществява обмена на данни между тях.

3. Изпълнение на тиристорния токоизправител

Схемата на трифазен симетричен тиристорен токоизправител (ТИ) е показана на фиг.2. Тази схема е намерила широко приложние в съвременните преобразуватели на електрическа енергия. Захранването на токоизправителя е директно от трифазната мрежа 400V, като при необходимост от по-ниски изходни напрежения може да се използва и понижаващ трансформатор. При този токоизправител изходното напрежение пулсира с шест пъти по-висока честота от мрежовата. При електродвигател за товар може да се работи и без дросел в изхода.



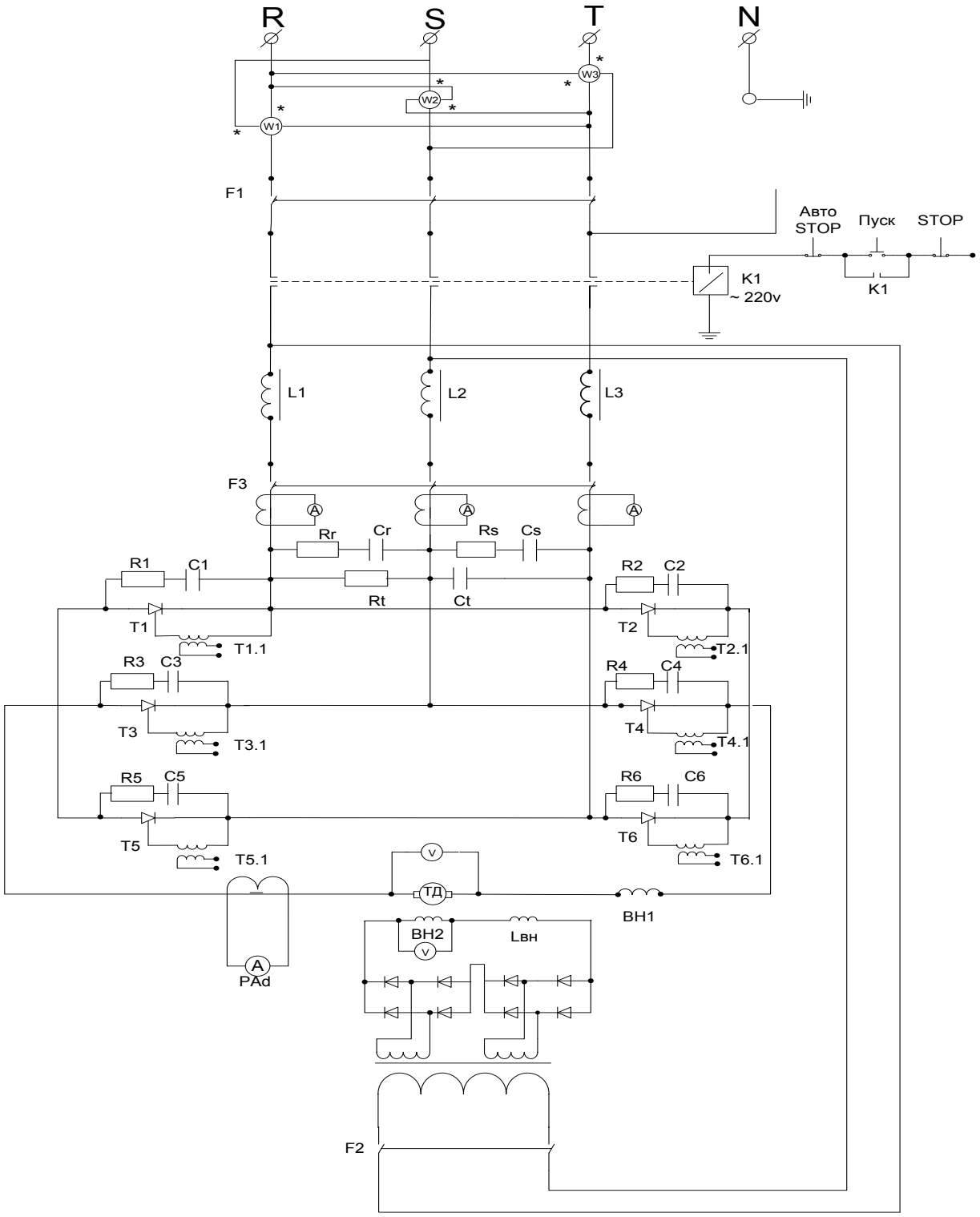
Фиг.1

От фиг.2 се вижда, че ТИ се състои от две групи тиристори: катодна и анодна, или така наречения пълно управляем токоизправител. Използва се за задвижване на постоянно токов електродвигател. Възбудителната намотка се захранва от отделен неуправляем изправител.

Задачата бе да се възстанови токоизправител по схемата на фиг.2. Липсваше цялата система за управление. Налични бяха само импулсните трансформатори Т1.1 до Т6.1. За целта бе използвана съвременна елементна база и подходящи схемни решения в системата за управление и палене на тиристорите.

Разработена е и микрокомпютърна система за управление за трифазен тиристорен токоизправител със синхронизиращ сигнал по фаза *AB* и “палене” на тирис-

торите с импулсни трансформатори.
Заданието за изходно напрежение се командва с преместване на потенциометър от *0* до *МАКСИМУМ*. Програмно се задава максимално изходно напрежение (минимален ъгъл α) според нуждите на товара.



Фиг. 2

4. Електронен блок за управление

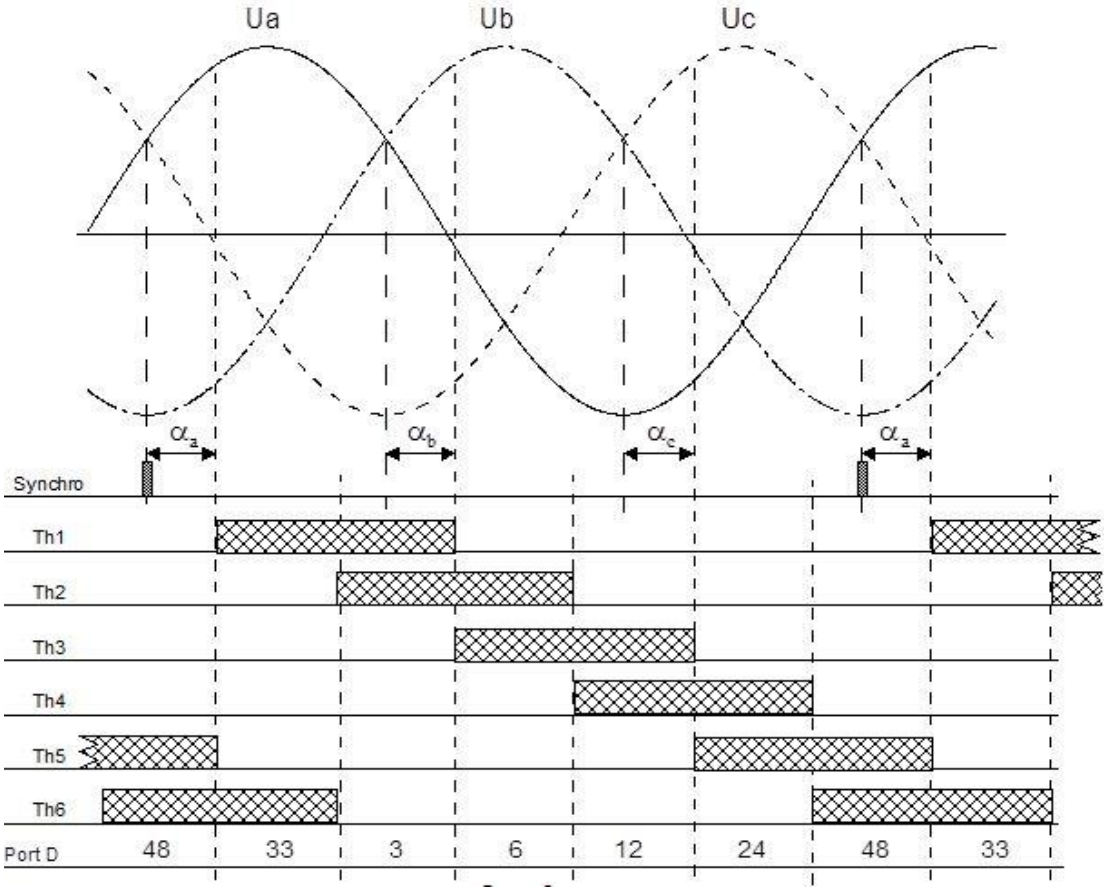
На фиг.3 са показани трите фазни напрежения при права поредност на фазите. Отдолу са показани интервалите в които може да бъде включван всеки от тирис-

торите. Шест от изходите на единия порт на микроконтролера управляват шестте тиристора. Така всеки бит от порта управлява съответен тиристор. Бит *0* – тиристор *Th1*, бит *1 – Th2* … бит *5 – Th6*, фиг.4.

При преминаване на напрежението *Uab* през нула се формира синхронизиращ импулс *Synchro*. След интервал на закъснение съответстващ на необходимият ъгъл α_a се подава сигнал разрешаващ включването на тези тиристори които имат условия за това. В нашият случай това са тиристорите *Th1* и *Th6*. Това значи, че на изходния порт на микроконтролера трябва битове *0* и *5* да са в „1“, а останалите в „0“ (десетично *33*). Веднага след това се подава разрешаващ сигнал за включването на тиристорите. По-нататък след интервал съответстващ на 60 електрически градуса трябва да се включат тиристори *Th1* и *Th2*. В изходния порт битове *0* и *1* са в „1” (десетично *3*) и се подава разрешаващ сигнал. Така се повтаря до края на периода на *Uab* или до новия синхронизиращ импулс който дава началния момент на следващия цикъл.

Първото закъснение съответстващо на ъгъл α се изпълнява еднократно след синхронизиращия импулс и до следващата синхронизация се формира автоматично за фазите *b* и *c*.

Всичките закъснения за отделните цикли на работа се формират от един таймер на микрокомпютъра. При получаване на синхронизиращ импулс се генерира закъснение съответстващо на ъгъл α, а до края на цикъла - повтарящи се закъснения равни на 60 електрически градуса.



Фиг.3

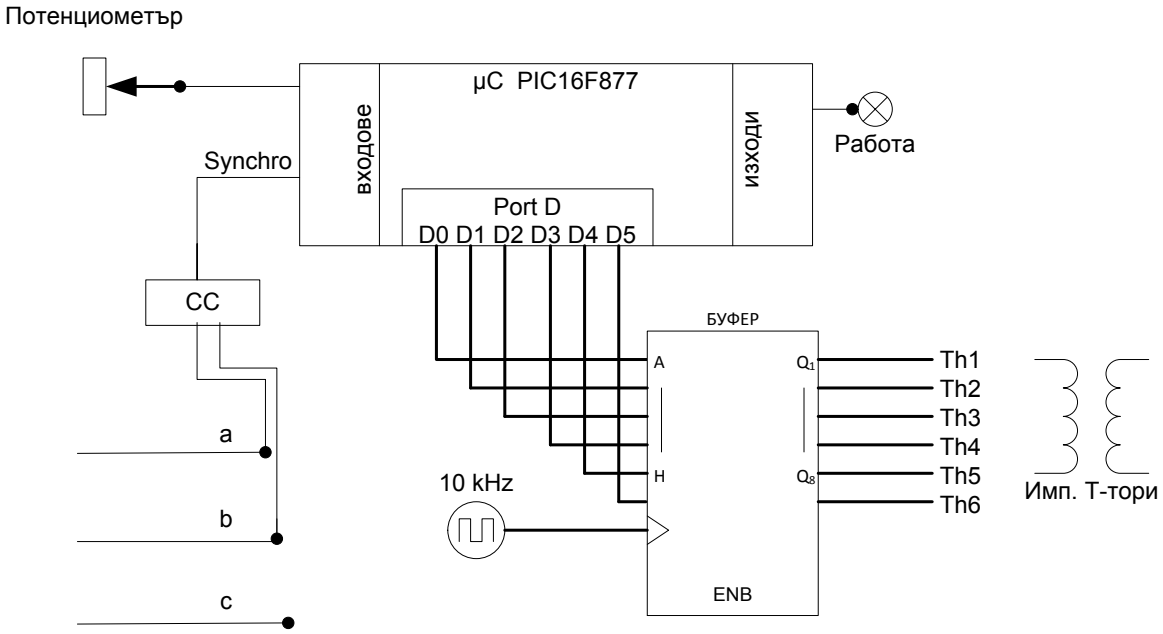
За регулиране на ъгъла на включване на тиристорите се използва един аналогов

вход на микрокомпютъра - $U_{УПР}$. Управляващото напрежение е в диапазона 0 до 5V. Аналогоцифровият преобразовател е 10 битов, но се използват 8-те старши бита. Така максималната стойност получавана от него е 255. От друга страна, ако таймера на микрокомпютъра се тактува с честота 250кHz. за да се формира закъснение от 10mS трябва брояча на таймера да отброи 2500 такта. Оттук ако се формира закъснение Alfa пропорционално на управляващото въздействие X то:

$$\alpha = \mathrm{X}\frac{2500}{255} \tag{1}$$

Зависимостите на Alfa от X е най удобно да се представят като таблици в паметта на микрокомпютъра – при кое X каква стойност за Alfa се задава на таймера. Необходимият обем памет е 2x256x2=1024 bytes. При използване на таблици е много лесно да се зададат ограничения за минималната и максималната стойност на Alfa, и/или нелинейна функция на изменение.

Блокова схема на електронната част за управление на токоизправителя е показана на фиг.4.

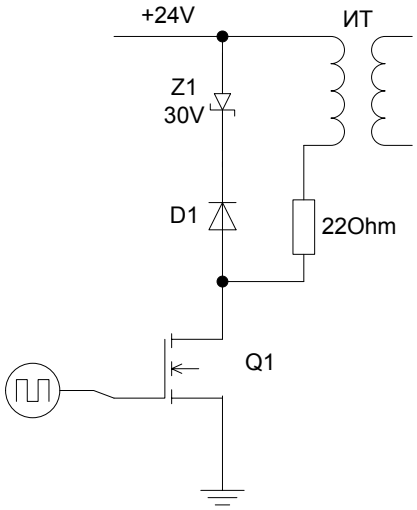


Фиг.4

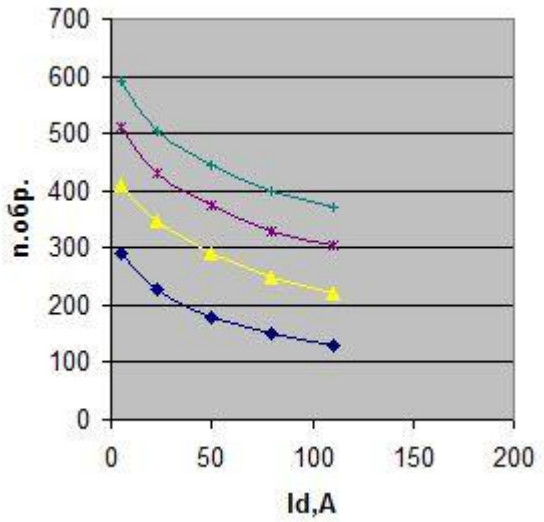
Заданието за изходно напрежение се подава от потенциометър. Синхронизацията е по линейното напрежения *AB* със системата за синхронизация *CC* – оптичен изолатор с необходимите входни вериги за осигуряване на работните режими. Нормалната работа на системата се показва със светенето на индикация „Работа“.

От порт *D* на микроконтролера се разрешава работата на съответните тиристори през буфер, който подава импулсите от генератор на 10kHz, към импулсните трансформатори на тиристорите. Принципната схема на силовия буфер към импулсен трансформатор е показана на фиг.5. Електронния ключ е с транзистора Q1. Диодите Z1 и D1 са веригата за размагнитване на трансформатора, а резистора ограничава тока.

С изпълнения по гореописания начин токоизправител са снети скоростни характеристики на електродвигателя, които са показани на фиг.6.



Фиг.5



Фиг.6

5. Изводи

Предложена система за управление (СУ) на трифазен тиристорен токоизправител с използването на микрокомпютър дава възможност да се осъществят различни методи за управление и да се намалят елементите от системата за управление. Това ще доведе до увеличаване на надеждността, намаляване на обема на СУ и подобряване на енергетичните показатели. Описания начин за управление е приложен в токоизправител за захранване на мощен (32kW) постояннотоков двигател, който задвижва екструдер за производство на полиетиленови продукти.

Литература

1. Стефан Е. Табаков, Промишлени електронни схеми и устройства, държавно изд. „Техника”, София, 1987
2. Милко М. Ганов, Любомир Б. Българанов, Ръководство за лаболаторни упражнение по Електрообзавеждане на електрически транспортни средства - София, 1985г.
3. Ангелов И., Универсално микроконтролерно управление за тиристорни токоизправители. XVIII Международна научна конференция „ТРАНСПОРТ 2008“ - ВТУ

Автори: Иван Петров Петров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше Транспортно Училище „Тодор Каблешков”; Иван Колев Ангелов, гл. ас инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivanang@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. Петър Матов

ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТАТА НА ИМПЕДАНСНО РЕЛЕ RIS-2 В ТЯГОВИ МРЕЖИ ПРИ КЪСИ СЪЕДИНЕНИЯ

Иван Ангелов, Николай Матанов

Резюме: *Представен е модел, в среда Matlab, на импедансно реле RIS-2 свързано към извод в тягова подстанция. На модела може да се симулират близки и далечни къси съединения с различен характер - металически, през къси и през разтеглящи се електрически дъги.*
Ключови думи: *модел в Matlab, импедансно реле*

RESEARCH WORK OF IMPEDANCE RELAY RIS-2 IN TRACTION NETWORKS AND SHORT CIRCUTS

Ivan Angelov, Nikolay Matanov

Abstract: *It is presented a model of an impedance relays RIS-2 in Matlab environment. The relais is connected to the terminal in the traction substation. The model can simulate short and long shorts circuits with different character - metallic, in a short and in a stretching electrical arcs.*
Keywords: *Matlab models, impedance relay*

1. Въведение

При експлоатацията на тяговите мрежи за променлив ток се случват аварии или временни аварийни ситуации. Една част от авариите са къси съединения с причинител елементи на тяговата мрежа или подвижния състав. Друга немалка част от късите съединения се причиняват от краткотрайно нарушаване на изолационните разстояния между проводниците и намиращи се в близост заземени части. Причинителите могат да са люлеещи се клони на дървета, ледени висулки по входовете на тунели, замърсяване на изолатори и други. Характерно за тези аварии е тяхната преходност и случайност. Голяма част от тях протичат през мощна открита електрическа дъга като тя отстранява причинителя за известно време. Релейната защита в тяговата подстанция сработва от тока на късо и изключва авариралия извод. След това повторното включване на извода е успешно.
Съвременните цифрови импедансни защити са снабдени с функция за изчисляване на разстоянието до късото съединение по параметрите на аварийния режим. Това са тока и напрежението на веригата с късо съединение, които зависят от импеданса на същата. Слабата разклоненост на контактните мрежи предполага линейна зависимост на техния импеданс от разстоянието при твърдо (металическо) късо съединение. Това се използва за изчисляване на мястото на пов-

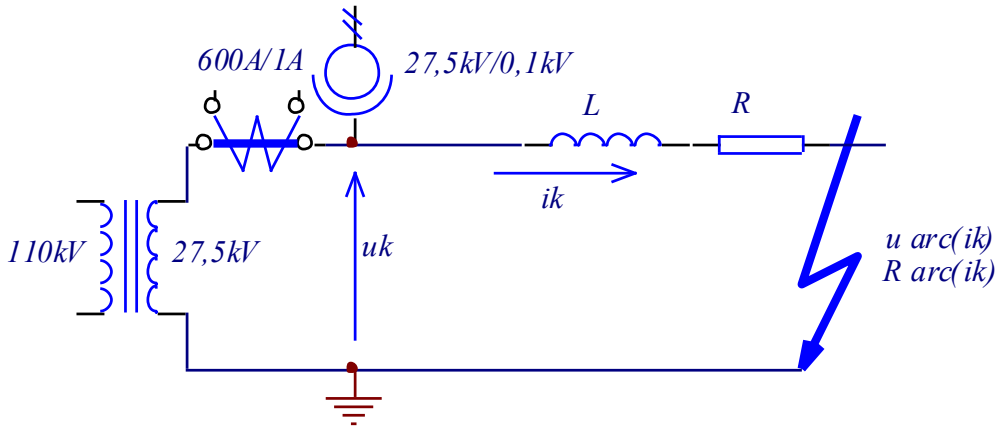
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

реда и нейното отстраняване или заобикаляне.

2. Проблем

Във веригата с късо съединение участват напрежението $u_{arc}(ik)$ и нелинейното съпротивление $R_{arc}(ik)$ на електрическата дъга (фиг.1).



Фиг.1. Заместваща схема на контактна мрежа с късо съединение.

Моментната стойност u_K на напрежението на шините на подстанцията се описва от уравнение (1)

$$u_K = L\frac{di_K}{dt} + [R + R_{arc}(i_K)]i_K + u_{arc}(i_K). \qquad (1)$$

Без участието на дъгата с нейните $u_{arc}(ik)$ и $R_{arc}(ik)$, диференциалното уравнение (1) има класически вид:

$$u_K = L\frac{di_K}{dt} + Ri_K. \qquad (2)$$

Параметрите на дъгата $u_{arc}(ik)$ и $R_{arc}(ik)$, зависещи от големината и формата на тока, деформират и тока на късо съединение, и напрежението на шините на тяговата подстанция. В нелинейните вериги при наличие на дъга, напрежението на късо съединение е по-голямо, токът на късо съединение е по-малък, а еквивалентният импеданс - по-голям отколкото при *„металическо“* късо съединение:

$$Z_{Karc} > Z_K \quad [\text{Ohm}]. \qquad (3)$$

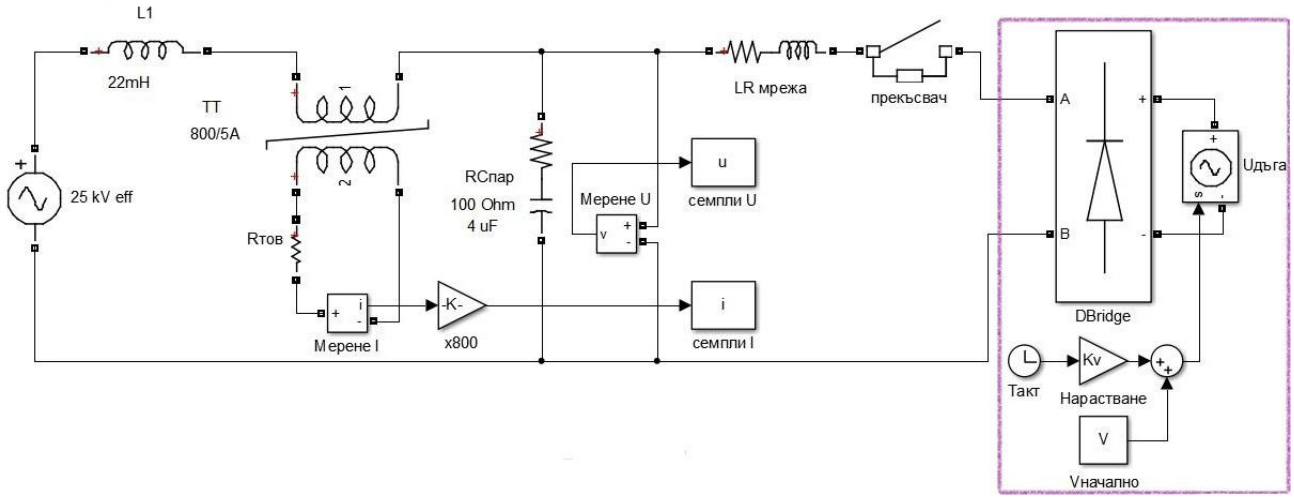
С приетия линеен импеданс на контактната мрежа $z_0=const$ [Ohm/km] и получаваното разстояние l_{Karc} [km] ще бъде по-голямо, в сравнение с разстоянието l_K [km] както е показано в [2].

3. Компютърен модел на RIS-2

За изследване работата на импедансно реле RIS-2 бе разработен компютърен модел в среда Matlab. Моделирани са: захранващ тягов трансформатор, тягова мрежа, токов измервателен трансформатор и нелинейна верига за късо съединение. Схемата на модела е показана на фиг.2. В правоъгълник е ограден модела на веригата в мястото на късо съединение.

При задаване на условията за симулация се определя и типа на късото съедине-

ние. Може да е „металическо“, през дъга с различни параметри или през удължаваща (разтегляща) се дъга [5].
Моментът на настъпване на късото съединение и неговата продължителност се управляват от елемента *„прекъсвач“*, а импедансът на тяговата мрежа, за съответната дистанция до късото, се задава на елемента „*LR мрежа*“.



Фиг.2. Модел за компютърна симулация на контактна мрежа с късо съединение и измерване на ток и напрежение.

Токът в тяговата мрежа се измерва през токов трансформатор ТТ с блока *„Мерене I”*. Стойностите се привеждат към първичната страна с блока *„x800“* и се измерват на семпли през 1,25mS от блок *„семпли I”*. Напрежението на шините в тяговата подстанция се измерва на семпли през 1,25mS от блок *„семпли U”*.
В мястото на късо съединение може да се симулират различни ситуации. От „металическо“ късо съединение до такова през разтягаща се електрическа дъга. Елементите симулиращи късото са оградени в правоъгълник. Дъгата е симетрична в двете посоки като се пренебрегва евентуалния диоден ефект в зоната анод-катод. Може да се задава начално напрежение *„V начално“* на дъгата и нарастване на това напрежение във времето, ако е необходимо. Активното съпротивление на дъгата може да се задава от нула до необходимите за опита стойности.
За сравняване на резултатите при различни режими могат да се правят по няколко симулации и да се прегледат резултатите на една обща графика.
Моделът е подобен на [2], но меренето и пресмятането на резултатите е както във физически реализираното устройство с 16 семпъла за един период [1].

4. Резултати от изследване на RIS-2

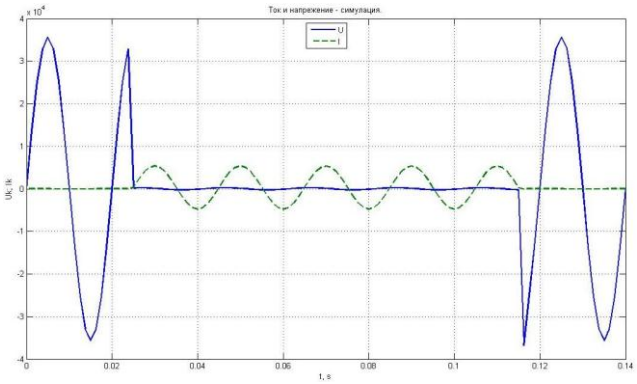
С така разработения модел са направени симулации при различни варианти на къси съединения на разстояние от 0,1 до 25,6 километра. Пресметнато е разстоянието до късото съединение по измерените стойности и е сравнено със задаваното „действително” разстояние. Четири варианта за симулация са показани в табл.1. При всичките случаи съпротивлението в мястото на късо е сравнително ниско. При вариант 1 късите са без дъга – „метални“.
В останалите три варианта са през дъга с различно напрежение, като вариант 3 е през „разтегляща“ се дъга с нарастващо напрежение по време на късото съеди-

нение. Моментът на възникване на късото съединение е подбран така, че апериодичната съставка в тока да е минимална. С увеличаване на разстоянието се променя съотношението на *L* и *R*, а оттам и големината на апериодичната съставка.

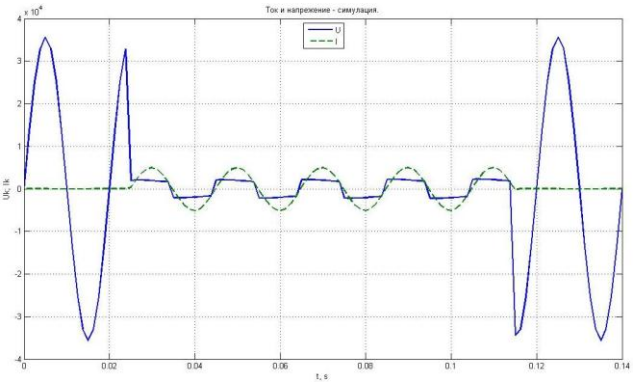
Табл.1

$L_{кс}$ km.	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25,6
1	$U_{дъга} = 0$ V; $R_{дъга} = 0{,}001$ Ohm								
2	$U_{дъга} = 500$ V; $R_{дъга} = 0{,}001$ Ohm								
3	$U_{дъга} = 1800 – 2000$ V; $R_{дъга} = 0{,}001$ Ohm								
4	$U_{дъга} = 3000$ V; $R_{дъга} = 0{,}001$ Ohm								

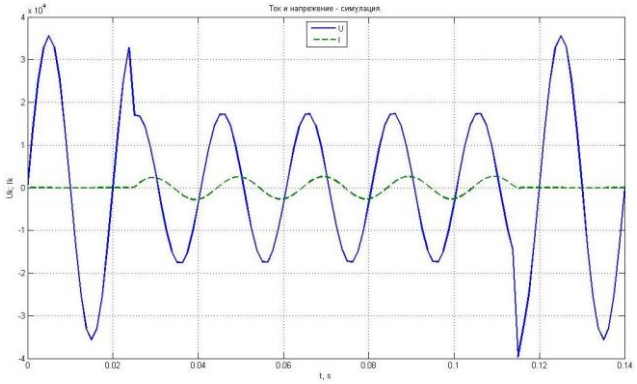
Графики на тока и напрежението при четири от симулациите са показани подолу. Металическо късо съединение на разстояние 0,1km е показано на фигура 3, а на разстояние 12,8km на фиг.5. Съответни, за същите разстояния, но през нарастваща дъга са фиг.4 и фиг.6.



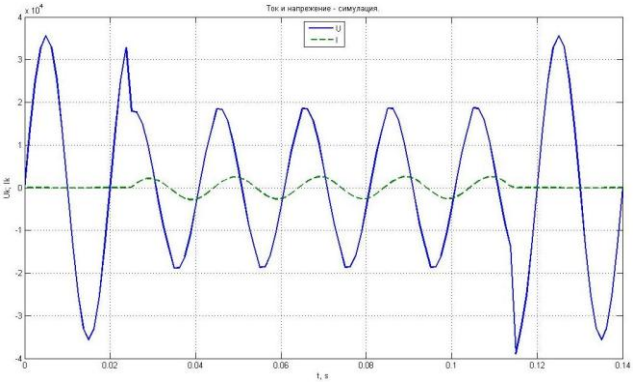
Фиг.3. „металическо“ 0,1km.



Фиг.4. нарастваща дъга 0,1km.



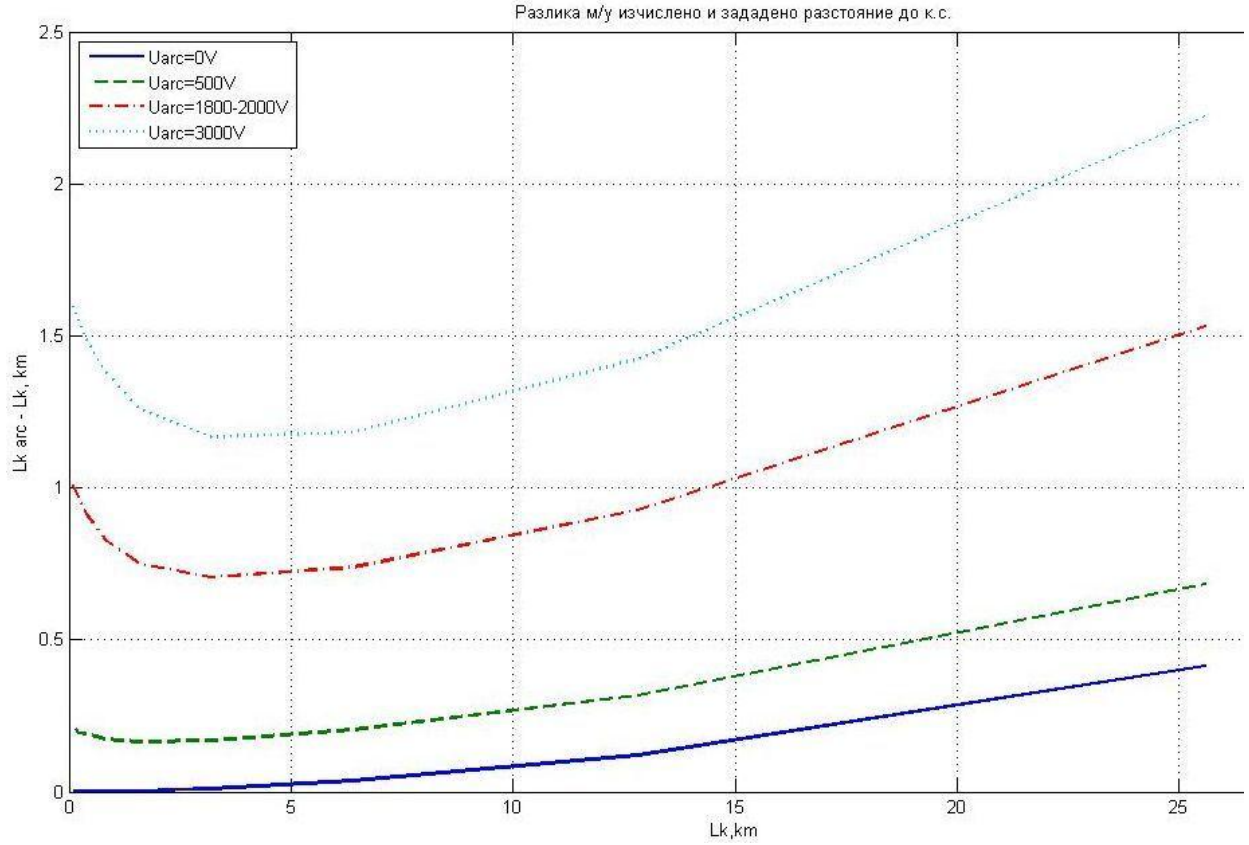
Фиг.5. „металическо“ 12,8km.



Фиг.6. нарастваща дъга 12,8km.

От показаните графики се вижда, че разработения модел работи вярно и получените резултати и форма на тока са близки до измерените в реални условия [6]. Разликите между пресметнато и „действително” разстояние до късото съединение за различни разстояния са показани на фиг.7. Показани са четири резултата за вариантите, описани в табл.1. За да се сравнява лесно един от вариантите е без дъга. Вторият е през сравнително къса дъга с ниско напрежение, а четвър-

тият с дълга дъга с напрежение 3000V. За проверка на влиянието на дъгата, третият вариант е с *„разтегляща“* се дъга за времето на късо съединение.



Фиг.7. Резултати за грешката в km при различни разстояния и при различни дъги

И при четирите варианта има грешка в пресметнатото разстояние до късото. Най-малка е тя при *„металическо“* късо. При близките къси съединения грешката е почти нулева. След това нараства до около 400 метра при разстояние 25,6 km. В останалите случаи има една постоянна съставка на грешката, която зависи от напрежението на дъгата. Един от основните източници на грешка и при това непостоянен е апериодичната съставка в тока. Тя зависи от момента на настъпване на късото съединение и от разстоянието до подстанцията.

5. Изводи

Импедансното реле RIS-2 има основна задача да изключва извода при настъпване на аварийна ситуация или недопустими режими на работа. Тази задача си я изпълнява добре независимо от това какво е късото съединение.

При определяне на разстоянието до аварията се намесват някои параметри и характеристики, които са с много неопределености. Един вариант за повишаване на точността е коригиращ коефициент или функция за разстоянието до аварията. Корекцията може да се определи след по-разширено изследване на резултатите при различни дъги и моменти на възникване на късото съединение.

Такива разнообразни изследвания могат да се направят на разработения компютърен модел, като той може да бъде усъвършенстван и да повтаря напълно начина на работа на импедансното реле.

Литература

[1] Ангелов Ив., Алгоритъм на работа на импедансно реле за тягови мрежи 25 kV, Годишник на ТУ-София, том 60, кн.2, 2010, стр.199-203

[2] Ангелов Ив.,П. Матов, Импеданси на тягови мрежи 25kV с къси съединения през електрически дъги, IV научна конференция ЕФ2012, 28 септ. – 1 окт. 2012, Созопол.

[3] Nagy Ibrahim Elkalashy, Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology Department of Electrical and Communications Engineering Power Systems and High Voltage Engineering, Espoo 2007. pp. 15-17

[4] Naser Zamanan, Jan K. Sykulski, Modeling an arcing high impedances fault Based on the physical process involved in the arc, Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Lisbon, Portugal, September 22-24, 2006, pp. 28-33

[5] Khorashadi Zadeh, An ANN-Based High Impedance Fault Detection Scheme: Design and Implementation, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume 4, Issue 2, 2005, Article 1

[6] Ангелов Ив., П.Матов, Установка за контролируемо разтегляне на открити електрически дъги в контактни мрежи 25 kV, Годишник на ТУ-София, том 59, кн.1, 2009 стр.144-150

Автори: Иван Колев Ангелов, гл. ас. инж. катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *ivanang@tu-sofia.bg;* Николай Стефанов Матанов, гл. ас. инж. катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *nsm@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** доц. д-р инж. Петър Матов

ОПТИМИЗАЦИЯ НА КОНСТРУКЦИЯТА НА СЕНЗОР ЗА ЪГЛОВО ПРЕМЕСТВАНЕ

Иван Костов, Илона Ячева, Стефчо Гунински

Резюме: *Изследвани са модели на конструкцията с канал и зъб на магнитопровода на сензор за ъглово преместване. Стационарното магнитно поле на системата се анализира като плоско паралелно, с отчитане на нелинейните свойства на материалите и се показва при ъгли на отклонение - 0, 45 и 90 градуса. Разгледано е и влиянието на дебелината и материала на външния ринг. Разпределението на полето се моделира числено чрез МКЕ с програмните пакети* ***QuickField*** *и* ***Magnet****.*

Ключови думи: *сензор, ъглово преместване, оптимизация*

OPTIMIZATION OF ANGULAR DISPLACEMENT SENSOR DESIGN

Ivan Kostov, Ilona Iatcheva, Stefcho Guninski

Abstract: *Different models of the construction of angular displacement sensor with tooth and slot in the core are studied. The static magnetic field of the system is analyzed as two-dimensional, taking into account the nonlinear properties of the materials. The study is carried out for different deflection angles - 0, 45 and 90 degrees, and different thickness and material of the outer ring. Field distribution is modeled numerically using FEM software packages* ***QuickField*** *and* ***Magnet****.*

Keywords: *sensor, angular displacement, optimizaton*

1. Въведение

Оптимизацията на всяко едно устройство или механизъм се състои в избора на един от множеството конструктивни варианти, отговарящи на предварително поставените технически условия и удовлетворяващи определен показател. В областта на сензорите обаче изборът на критерий за оптималност, например минимална маса, обем, тегло е твърде условен, тъй като по-важна е максималната експлоатационна надеждност, сигурност при работа и разбира се метрологичните показатели [1,2,3].

Основната конструктивна концепция на сензор за ъглово преместване, притежаващ магнитна система от неподвижна част, цилиндричен постоянен магнит и външен ринг, които представляват подвижната част на сензора е изследван в [4]. Там е показан действащ физически модел и експериментално получени стойности на изходния сигнал при ъглови премествания от 0 до 360 градуса.

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

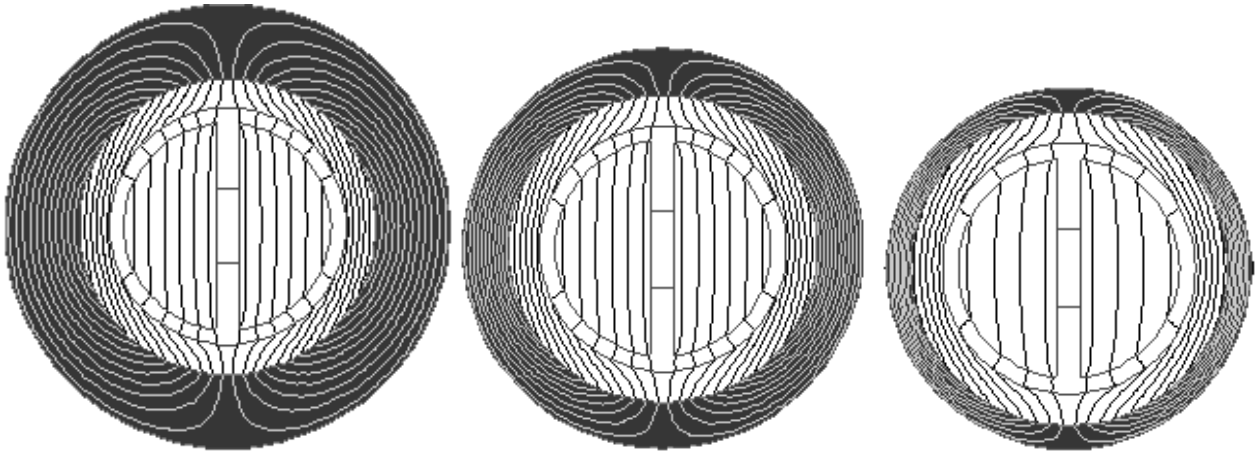
ISSN 1311-0829

Задачата, поставена в настоящата работа е да се оптимизира конструкцията по възли и детайли чрез изменение на формата и размерите им, като се следи за влиянието на тези промени върху ключови стойности на изходния сигнал на сензора за ъглово преместване.

2. Влияние на външния ринг

За да се получи отговор на въпроса за ролята на външния ринг е използвано числено моделиране на основната конструктивна концепция на сензора с помощта на метода на крайните елементи (МКЕ). Използването на програмните продукти ***QuickField*** [5] и ***Magnet*** [6] позволява без експериментални изследвания да се получи представа за картината на магнитното поле както при изменение на размерите на ринга, така и чрез промяна на магнитните свойства на неговия материал. На фиг.1 е показано магнитното поле (МП) на сензора при двукратно и трикратно намаляване на дебелината на ринга. При тези изменения се запазва функционалната му връзка с възбудителя на МП, тъй като рингът е от феромагнитен материал. Тогава ролята на ринга е:

- да концентрира МП на постоянния магнит
- да е като защитен екран от смущаващи външни магнитни полета.

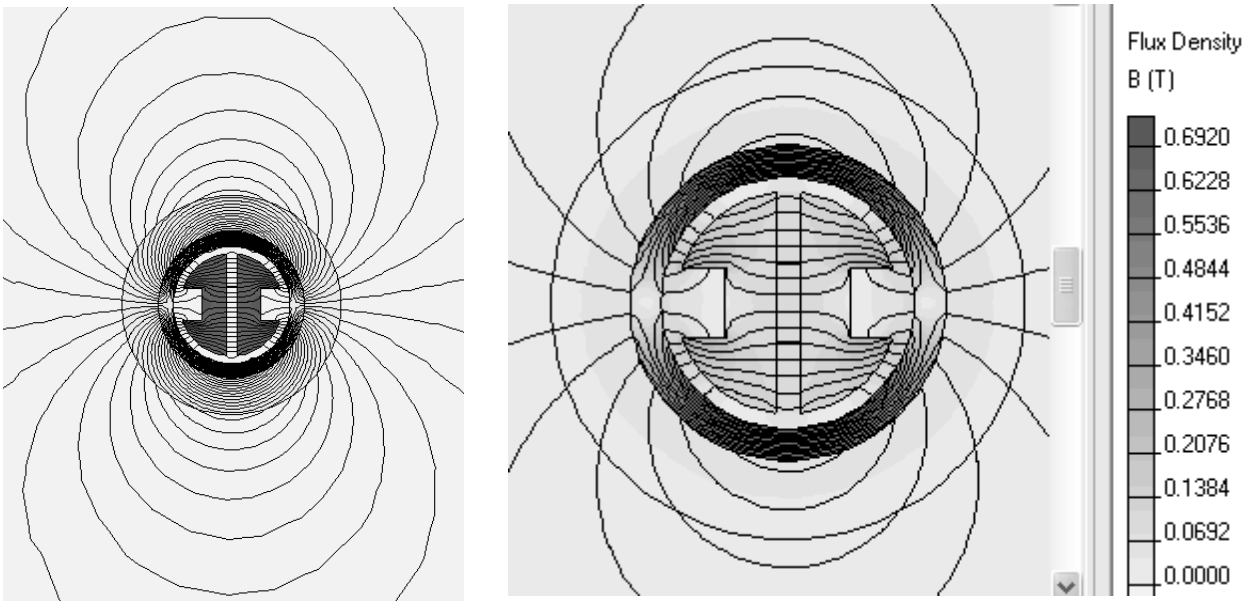


Вмах =0,834 Т; *Вмах* =1,190 Т; *Вмах* =1,730 Т

Фиг.1. Картина на магнитното поле и стойности на магнитната индукция при промяна в дебелината на феромагнитния външен ринг

Естествено, след като се намали сечението на външния ринг, магнитната индукция B_{max} расте при намаляване на дебелината на външния ринг. Следователно, има ограничение, свързано с максимално допустимата стойност на магнитната индукция за материала. Възможно е дори да се използва анизотропна магнитна лента или други специални сплави, но това води до нарастване на цената на изделието.

Показаните на фиг.2 картини на МП , когато отсъства външния ринг или е направен от неферомагнитен материал, например алуминий, потвърждават необходимостта от феромагнитнитен външен ринг.

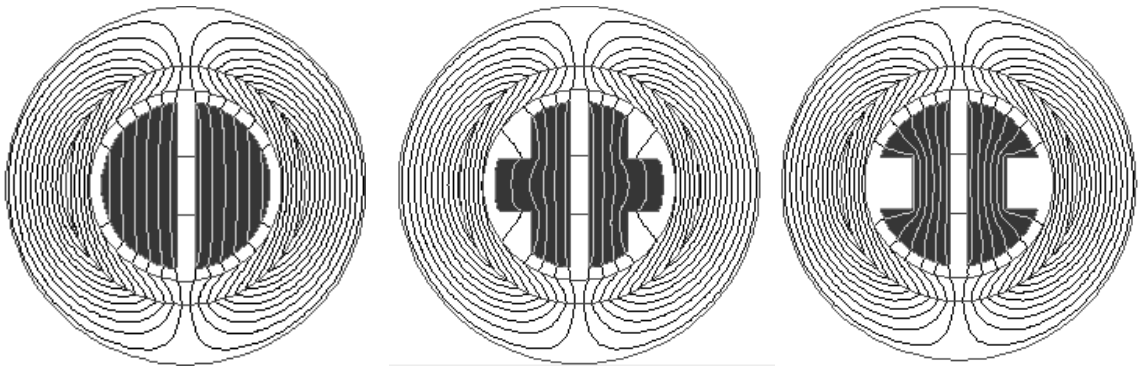


а) Алуминиев ринг б) в отсъствие на ринг

Фиг.2. Картина на магнитното поле при неферомагнитен външен ринг

3. Влияние на формата на неподвижната част

Първоначално неподвижната част на базовата конструкция се разделя на няколко сегмента. Запазва се местоположението на магниточувствителния елемент (МЧЕ) в центъра на сензора. При сравнително лесна промяна на магнитните свойства на материала на определени сегменти се получават следните две форми на неподвижната част: с централно разположен зъб (фиг.3.б) и централно спрямо МЧЕ изрязан канал (фиг.3.в).

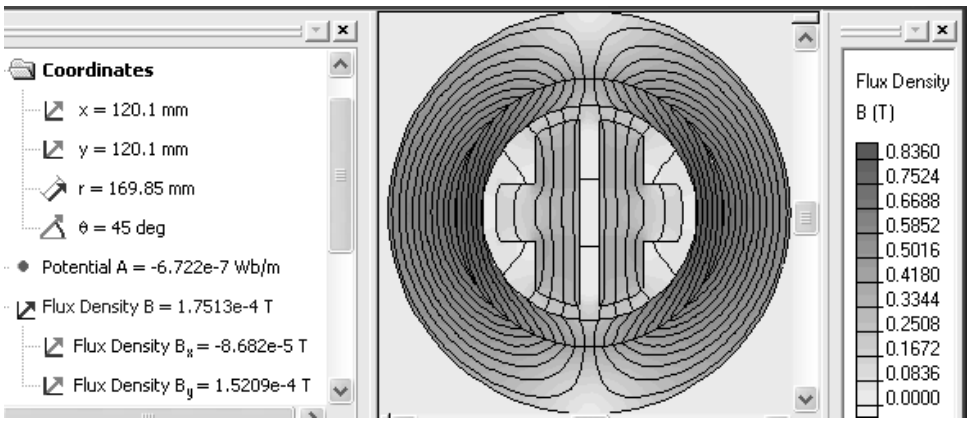


а) базова конструкция б) форма „зъб” в) форма „канал”

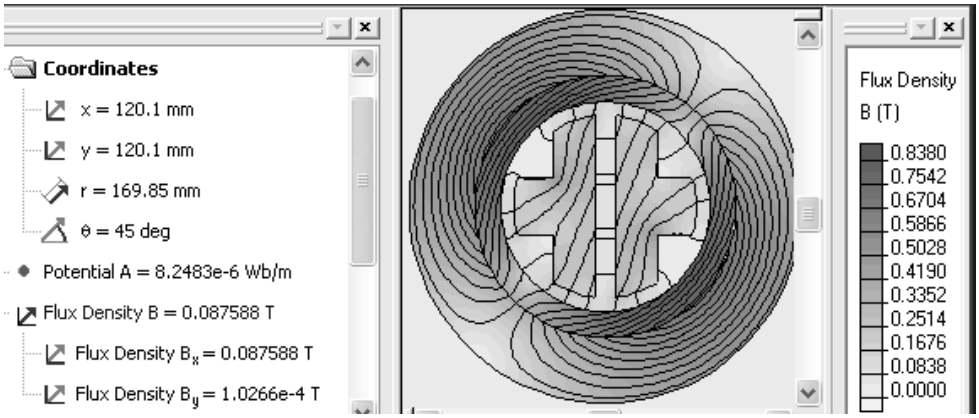
Фиг.3

4. Получени резултати

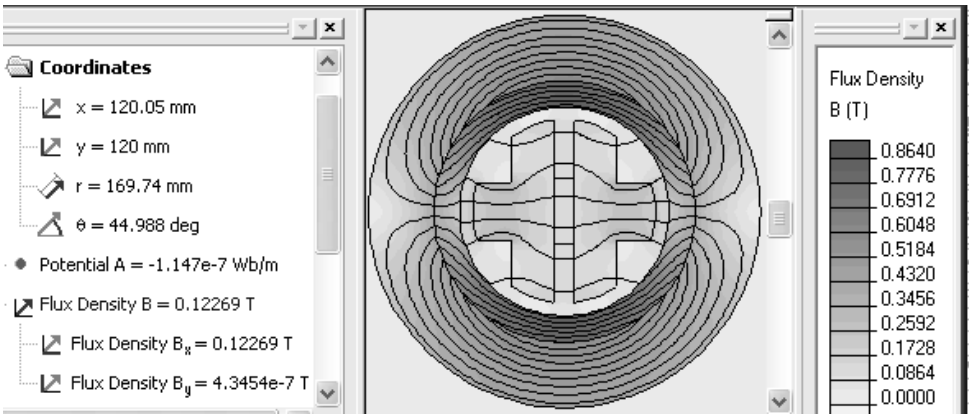
На фиг.4 са показани резултати за картината на МП и стойността на индукцията в точка с координати в центъра на сензора за формата с централно разположен зъб и при три характерни позиции на постоянния магнит. В таблиците 1 и 2 са стойностите на магнитната индукция в областта , в която се разполага магниточувствителен елемент. Размерите в тази област съответстват на размерите на МЧЕ с анизотропни магниторезистори с много висока чувствителност.



Фиг.4.а. Ъгъл на отклонение – 0 градуса, *B=1,75e^{-4}T*



Фиг.4.б. Ъгъл на отклонение – 45 градуса, *B=0,0876T*



Фиг.4.в. Ъгъл на отклонение – 90 градуса, *B=0,1227T*

Табл.1. Резултати за проекциите на магнитната индукция в централната зона на сензора при преместване от ъгъл $\alpha = 0 \div 180^0$ и при форма „зъб”

α	deg	0	15	30	45	60	75	90
B	T	1.75e^{-4} **(0)**	0.032	0.062	0.0876	0.1068	0.1186	0.12696
Bx	T	-8.7e^{-5} **(0)**	0.032	0.062	0.0876	0. 1068	0.1186	0. 12696
By	T	1.52e^{-4} **(0)**	1.46e^{-4} **(0)**	1.28e^{-4} (0)	1.025e^{-4} (0)	7.1e^{-5} (0)	3.6e^{-5} (0)	2.37e^{-7} (0)

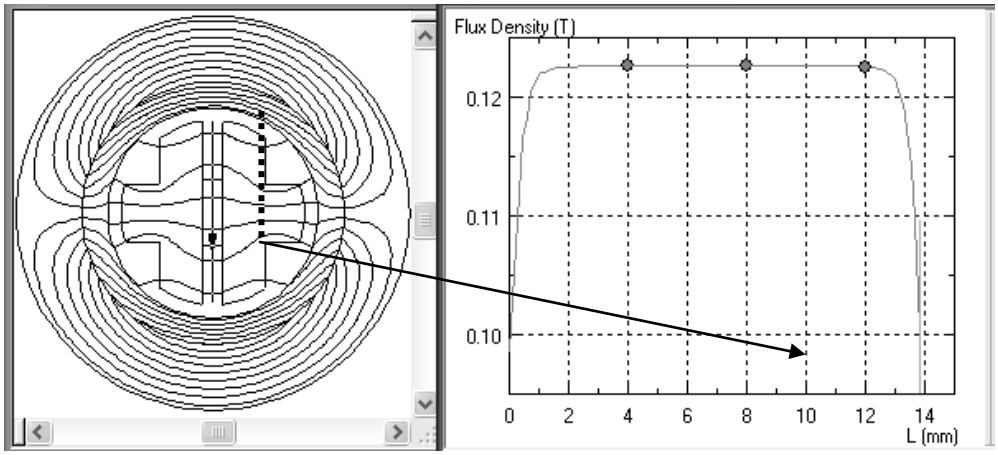
α	deg	105	120	135	150	175	180
B	T	0.1186	0.1068	0.0876	0.062	0.032	1.75e^{-4} **(0)**
Bx	T	0.1186	0. 1068	0.0876	0.062	0.032	-8.7e^{-5} **(0)**
By	T	-3.6e^{-5} (0)	-7.1e^{-5} (0)	-1.025e^{-4} (0)	-1.28e^{-4} (0)	-1.46e^{-4} **(0)**	-1.52e^{-4} **(0)**

Табл.2. Резултати за проекциите на магнитната индукция в централната зона на сензора при преместване от ъгъл $\alpha = 0 \div 180^0$ и при форма „канал”

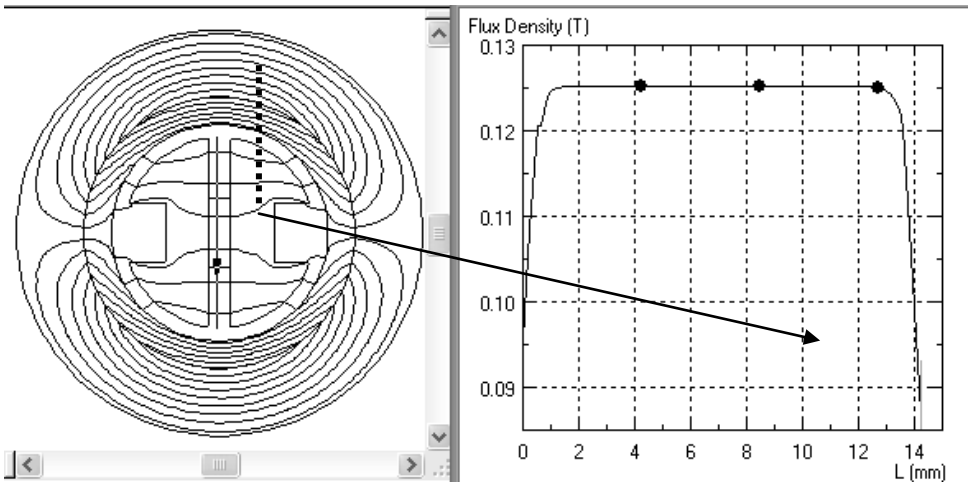
α	deg	0	15	30	45	60	75	90
B	T	$2.86e^{-4}$ **(0)**	0.0338	0.065	0.0907	0.11	0.121	0.129
Bx	T	$7.94e^{-5}$ **(0**	0.0338	0.065	0.0907	0.11	0.121	0.129
By	T	$2.74e^{-4}$ **(0)**	$2.596e^{-4}$	$2.195e^{-4}$	$1.65e^{-4}$	$1.06e^{-4}$ **(0)**	$5.11e^{-5}$ **(0)**	$1.04e^{-7}$ **(0)**

α	deg	105	120	135	150	175	180
B	T	0.121	0.11	0.0907	0.065	0.0338	$2.86e^{-4}$ **(0)**
Bx	T	0.121	0.11	0.0907	0.065	0.0338	$7.94e^{-5}$ **(0)**
By	T	$-5.11e^{-5}$ **(0)**	$-1.06e^{-4}$ **(0)**	$-1.65e^{-4}$ **(0)**	$-2.195e^{-4}$ **(0)**	$-2.596e^{-4}$ **(0)**	$-2.74e^{-4}$ **(0)**

При ъгъл на отклонение 90^0 градуса, при който изходния сигнал има максимална стойност графично е дадено изменението на магнитната индукция по дължината на линията. И при двете форми на неподвижната част, фиг.5.а и фиг.5.б , гъстотата на магнитния поток е неизменна почти по цялото протежение на зоната, което дава възможност МЧЕ да се разполага не толкова прецизно в центъра на магнитната система.



Фиг.5.а. Графика на магнитната индукция при форма „зъб”



Фиг.5.б. Графика на магнитната индукция при форма „канал”

5. Заключение

Изменението на дебелината на външния ринг не променя характера на разпределение на магнитната индукция във всички елементи на сензора. Променя се главно големината на B_{max} в ринга, което не променя основните метрологични характеристики, но дава насоки за икономия на материал.

Аналогичен извод може да се направи и за различните форми на неподвижната част. Въпреки разликата в магнитните проводимости в различните радиуси, картината на полето е различна, но това отново не се отразява на метрологичните му характеристики - чувствителност и изходна характеристика B(α), което отново дава възможност за избор на форма на неподвижната част с оптимален разход на активен материал.

Литература

[1] Jacob Fraden, ***Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications,*** 2nd Edition (Springer-Verlag New York, Inc., New York, 1996)

[2] Haibin Gao , Uwe Hartmann. ***Einsatz hochempfindlicher Magnetfeldsensoren zur Erfassung von Fahrzeugen***, Magazin forschung 1/2004, Universität des Saarlandes

[3] *www.bosch.de/aa/de/fachliteratur/index.htm*

[4] И. Костов, Ст. Гунински, Ил. Ячева. ***Моделиране на магнитно поле на сензор за ъглово отклонение***. 4-та научна конференция ЕФ 2012 , Том 2 , стр.171-179.).

[5] QuickField, ***Version5.6, User`s Guide***, Tera Analysis Ltd., 2009

[6] 2D Tutorial, Preparing. ***Solving and Interpreting NDT Problems in 2D***, Infolitica Corporation, 2005

Автори: инж. Иван Костов, доц. д-р, катедра “Обща електротехника”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *igkostov@tu-sofia.bg;* инж. Илона Ячева, доцент д-р, катедра “Теоретична електротехника”, Факултет Автоматика, Технически Университет - София, E-mail address: *iiach@tu-sofia.bg;* инж. Стефчо Гунински, доц. д-р, катедра “Обща електротехника”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *sgg@tu-sofia.bg*

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** проф. дтн Р. Станчева

ВЛИЯНИЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ НА ЛОКОМОТИВНИТЕ МАШИНИСТИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИЯ ПОДВИЖЕН СЪСТАВ

Иван Петров, Иван Лалов

Резюме: *В статията е разгледано влияние на квалификацията на локомотивните машинисти за подобряване на енергийната ефективност на електрическия подвижен състав. За тази цел е направено експериментално изследване на разхода на енергия с електрически локомотиви серия 44-02,44-098 и46-221. Изчислени са относителната процентна и средна грешка. Получените резултати дават възможност да се търси подобряване енергийната ефективност на електрическия подвижен състав с подобряване на квалификацията на машинистите.*

Ключови думи: *енергийна ефективност, електрически подвижен състав, електрически локомотиви.*

INFLUENCE OF LOCOMOTIVE DRIVERS SKILLS FOR IMPROVEMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE ELECTRICAL ROLLING STOCK

Ivan Petrov, Ivan Lalov

Abstract*: Influence of the increase of locomotive drivers for improvement of the energy efficiency of the electrical rolling stock is examined. For this purpose an experimental study on the energy consumption of electric locomotive class 44 end 46 has been performed. Average percentage error as well as mean error were calculated. The obtained results enable to look forward for improvement of the energy efficiency of electrical rolling stock together with improvement of locomotive drivers qualification.*

Key words: *energy efficiency, electrical rolling stock, electrical locomotive*

1. Въведение

Подобряването на енергийната ефективност в железопътния транспорт може да доведе до намаляване на експлоатационните разходи за ел. енергия. Това може да се осъществи чрез избор на различни критерии за оптимизиране на енергийната ефективност. Най-често се използва обобщен показател „Специфична консумация на крайната енергия за пътническия транспорт и товарен транспорт". Неговото подобряване може да се осъществи чрез:

- увеличаване на броя на превозените пътници и обема на превозените товари;

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

ISSN 1311-0829

- удвояване и електрифициране на железопътните магистрали с голямо натоварване;
- създаване на високоефективна железопътна мрежа;
- подновяване на подвижният състав с автоматично микропроцесорно управление;
- подобряване на графика на движение;
- подобряване квалификацията на локомотивните машинисти и др.

Голяма част (около 90%) от електрическият подвижен състав намиращ се в експлоатация в Република България е изпълнен с косвено неавтоматично управление. Това дава възможност енергийната ефективност на транспортното средство преди всичко да зависи от квалификацията на локомотивния машинист.
Отчитайки задълбочената икономическа криза в световен мащаб, много подходящ метод за подобряване на енергийната ефективност на електрическия подвижен състав се оказва влиянието на квалификацията на локомотивните машинисти.

1. Постановка на задачата за оптимално управление

Определяне на оптималната енергийна ефективност може да се осъществи чрез избор на модела на оптимално управление. Той може да бъде статичен и динамичен. Първият разглежда установените режими, тъй като се предполага, че са пренебрегнати преходните процеси в енергетичните вериги на локомотива. При къси междуспиркови разстояния характерни за градски условия и метрополитен, тези процеси са съществена част от изразходваната енергия и следва да се използва динамичния модел. При по-големи междугарови разстояния, както са в железопътният транспорт преходните процеси са пренебрежително малки и следва да се използва статистическия модел. Ние именно сме се спрели на последния.

2. Избор на критерии за сравнение

За изследване влиянието на възможностите на локомотивните машинисти за подобряване на енергийната ефективност на електрическия подвижен състав могат да се изберат следните критерии за сравнения:
- по относителен разход на енергия;
- по разход на енергия за повишаване на средната скорост на движение с 1 км/ч;
- по критерий за оптималност;
- в зависимост от образованието на машиниста;
- в зависимост от придобитият трудов стаж на машиниста.

3. Експериментално заснемане на данни

Експериментално заснемане на данни бе реализирано с магистрални електрически локомотиви 46-221, 44-002 и 44-098 и 11 броя локомотивни машинисти. Записван бе участъка София – Бургас на влак № 3625 с тегло на влака 231 t.
Относителният разход на енергия се изчислява по формулата:

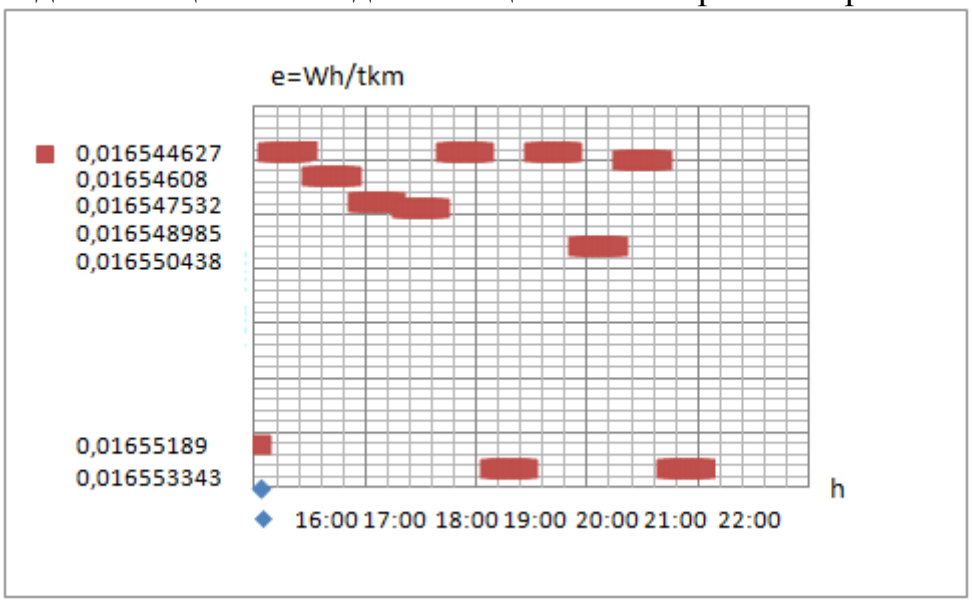
$$e = \frac{E}{QS}, \text{ Wh / tkm}, \quad (1)$$

където: E – разход на енергия /Wh/,

Q – тегло на вагоните в състава на влака t /тон/,

S – изминат път /km/.

На фиг.1 е показана зависимостта на относителния разход на енергия от времепътуването през денонощието. Изследването обхваща 11 броя локомотивни машинисти с един и същи влак и едно и също начално време на тръгване.



Фиг.1

От нея се вижда, че машинисти с номера 9,7 и 11 водят влака с минимален разход на енергия. За да определим отклоненията на изразходвания относителен разход на ел. енергия при различните машинисти е необходимо да се определи относителната процентна грешка по формулата, а именно:

$$\Delta_{E_{отн}} = \frac{E^i_{изм} - E^i_{опт}}{E^i_{изм}}, \quad (2)$$

и средна грешка

$$\Delta E_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{N} |\Delta E_{отн}|}{N}, \% \quad (3)$$

където: $E\frac{i}{изм}$ - измерена стойност на функция в i-тата точка, която се определя за i-тия машинист;

$E\frac{i}{опт}$ - стойност на функция, получена при оптимален разход на ел. енергия на i-тия машинист;

N- брой на точките, в които се сравняват измерената и оптималната стойностна функцията и стойността ѝ, определени при различните машинисти.

От съществено значение е избора на броя на табличните точки, описващи ха-

рактеристиката и стъпката между тях. Получените резултати при провеждане на практическия експеримент таблично са показани в табл.1.

Табл.1

N	$E\frac{i}{изм}$, kwh	$E\frac{i}{опт}$,kwh	$\Delta E_{отн}$	$\Delta E_{ср}$,%
1	1719814	749566	0.5642	56.41%
2	1719965	749627	0.5641	
3	1720116	749689	0.56416	
4	1720267	749750	0.56416	
5	1720418	749812	0.564168	
6	1720569	749873	0.5617	
7	1720720	749935	0.56417	
8	1720871	749997	0.56417	

4. Изводи

От така направеното експериментално изследване върху влиянието на възможностите на локомотивните машинисти за подобряване на енергийната ефективност могат да бъдат направени следните изводи:

1. При използване на локомотиви с косвено неавтоматично управление има съществен запас за намаляване на разхода на енергия и подобряване на енергийната ефективност;

2. Повишаване на квалификацията на локомотивните машинисти може да доведе до намаляване на разхода на ел. енергия.

Литература

[1] Ненов Н., Движение на влаковете и оптимални режими на управление, София, 2008 г.

[2] Българанов Л., Електрически транспорт, С, 2004.

[3] Гунчев Л. А., Оптимално управление, С., Техника 1987.

Автори: Иван Петров Петров, доц. д-р инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше Транспортно Училище „Тодор Каблешков”; Иван Георгиев Лалов, маг. инж., катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше Транспортно Училище „Тодор Каблешков”

Постъпила на 02.09.2013 **Рецензент** гл. ас. д-р Т. Йонов

ОПРОСТЕН ТОПЛИНЕН МОДЕЛ НА АВТОМАТИЧЕН ПРЕКЪСВАЧ

Иван Ячев, Диан Маламов, Иван Хаджиев

Резюме: *В работата е предложен опростен топлинен модел на триполюсен автоматичен прекъсвач, който е синтезиран в средата на програмния продукт COMSOL на базата на каталожни и експериментални данни на прекъсвача. Главните вериги на полюсите са заместени с тоководещи елементи, чийто загуби отговарят на каталожните данни на прекъсвача. Топлофизичните характеристики в обема на прекъсвача са определени експериментално. Чрез разработения модел е направено изследване за загряването на клемите и корпуса на прекъсвача в преходен и установен режим.*

Ключови думи: *автоматичен прекъсвач, загряване, топлинен модел.*

SIMPLIFIED THERMAL MODEL OF AN AUTOMATIC CIRCUIT BREAKER

Ivan Yatchev, Dian Malamov, Ivan Hadzhiev

Abstract: *The paper proposes a simplified thermal model of a three-pole automatic circuit breaker, synthesized in the environment of the programming product COMSOL based on catalogue and experimental data of the breaker. The main circuits of the poles are replaced by current-carrying elements, whose losses correspond to the catalogue data of the breaker. The thermal-physical characteristics in the volume of the breaker have been experimentally defined. By means of the developed model investigation over the heating of the terminals and the case of the breaker has been carried out both in transient and steady modes.*

Key words*: automatic circuit breaker, heating, thermal model.*

1. Въведение

Автоматичните прекъсвачи са основните комутационни апарати за разпределение и защита в мрежите за ниско напрежение. Един от основните фактори, които определят работоспособността на автоматичните прекъсвачи е техният топлинен режим. В [1], [2] са нормирани изискванията по отношение на допустимите загрявания на автоматичните прекъсвачи за ниско напрежение. Номиналното токово натоварване на прекъсвачите се гарантира до околна температура 40 ^{o}C. Обикновено автоматичните прекъсвачи се вграждат в комплектни комутационни устройства (ККУ), температурата на въздуха в които може да пре-

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

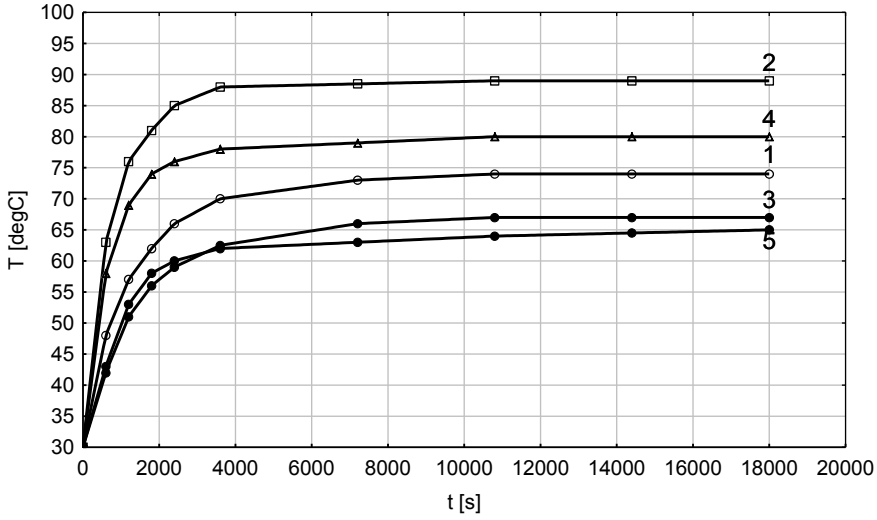
ISSN 1311-0829

виши значително околната температура. Това налага да се намали допустимото токово натоварване на автоматичните прекъсвачи съгласно предписанията на производителите [3]. Важно е още на етапа на проектиране да се анализира топлинния режим в ККУ. Един от проблемите при създаването на компютърни модели за анализ на топлинното поле в ККУ е задаването на топлинните модели на автоматичните прекъсвачи. Известни са модели за определяне на топлинното поле на автоматичните прекъсвачи [4], [5], [6], които са изградени на базата на конструктивните им данни. Тези модели са синтезирани от техническата документация на прекъсвачите и са сравнително сложни. Прилагат се в процеса на разработка за моделиране и оптимизация на конструкцията на прекъсвачите. Те не са подходящи за използване в топлинните модели на ККУ.

В настоящия доклад се предлага опростен топлинен модел на автоматичен прекъсвач в средата на програмата COMSOL, който е подходящ за използване в компютърните модели за изследване на топлинните процеси в ККУ. Моделът е създаден на базата на каталожните данни за прекъсвача, както и на данни получени чрез експериментални изследвания.

2. Експериментално изследване на загряването на автоматичен прекъсвач

Обект на изследването е автоматичен прекъсвач на ABB от серията Tmax тип T1B160-TMD 80 с номинален ток 80 A. На фиг.1 са дадени получените експериментални криви за преходния режим на загряване.



Фиг.1. Експериментална крива за преходния режим на загряване на прекъсвач от серията Tmax тип T1B160-TMD 80 с номинален ток 80 A:

1 - средна горна клема; 2 - средна долна клема; 3 - крайна горна клема; 4 - крайна долна клема; 5 - странична стена на корпус

Измерено е загряването в преходен и установен режим за клемите и странична стена на корпуса на прекъсвача. Условията на изпитване са съгласно [1] и [2], като температурите са измерени чрез калибрирани термодвойки тип J.

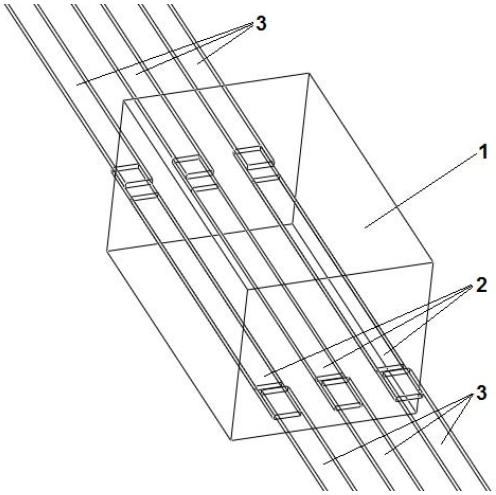
Наблюдава се значителна разлика между температурите на клемите в горната и долната части на прекъсвача. Основната причина за това е, че загубите са разп-

ределени неравномерно по тоководещата верига. За прекъсвачите с термомагнитен изключвател, какъвто е изследвания, основните загуби са съсредоточени близо до клемите в долната част на прекъсвача, но точното им количествено разпределение не е известно.

3. Синтезиране на опростен компютърен 3D топлинен модел на автоматичен прекъсвач

3.1. Геометричен модел

Компютърният модел е създаден за автоматичния прекъсвач съгласно т. 2. На фиг.2 е показан геометричният модел на прекъсвача, заедно с входните и изходните захранващи проводници, с които са проведени и експерименталните изследвания.



Фиг.2. Геометричен модел на прекъсвача
1 - автоматичен прекъсвач; 2 - тоководещи елементи; 3 - свързващи шини

Корпусът на прекъсвача е представен като хомогенно тяло, чийто габаритни размери се определят съгласно каталожните данни. Всеки полюс на прекъсвача е представен чрез еднороден тоководещ елемент с равномерно разпределени загуби. Загубите отделени в тоководещите елементи трябва да отговарят на каталожните загуби съгласно данните на производителя на прекъсвача или на данни получени експериментално. На този етап, се приема, че загубите са разпределени равномерно по дължината на тоководещата верига на прекъсвача. При тези условия специфичното съпротивление, което трябва да се зададе за елементите в модела, които заместват тоководещите вериги на прекъсвача, се определя по формулата:

$$\rho = \frac{P_{loss} S}{I_n^2 l} \tag{1}$$

където: ρ е специфично съпротивление на тоководещия елемент; P_{loss} - загуби на полюс съгласно каталожните данни на прекъсвача или експериментални данни; S - сечение на тоководещия елемент; l - дължина на тоководещия елемент; I_n - номинален ток на прекъсвача.

Загубите в контактните съединения се отчитат чрез равномерно разпределени

повърхностни съпротивления в местата на контактните повърхности. Стойности са зададени на базата на експерименталните резултати съгласно [7].

3.2. Математичен модел

Математическият модел се състои от две компоненти (електрически и топлинен), които са свързани чрез специфичната електрическа проводимост, която зависи от температурата.

Електрическото поле се определя със следната система уравнения:

$$\nabla.\boldsymbol{J} = 0 \tag{2}$$

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{E} = -\nabla V \tag{4}$$

$$q = \sigma.\boldsymbol{E}^2 \tag{5}$$

където: $\boldsymbol{J}$ е токова плътност; $\boldsymbol{E}$ - интензитет на електрическото поле; V - скаларен електрически потенциал; q - специфични загуби на мощност; σ - специфична електрическа проводимост:

$$\sigma(T) = \frac{1}{\rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]} \tag{6}$$

където: ρ_o е специфично електрическо съпротивление при температура T_o; T - температура в елементарен обем от тоководещия елемент; α - температурен коефициент на специфичното съпротивление.

Решението на електрическата задача е при следните начални и гранични условия:

- Начално условие:

- температурата на тоководещите елементи и корпуса на прекъсвача е приета равна на околната температура 30 ^{o}C.

- Гранични условия:

- на сечението на входните шини е зададен електрически ток;
- на сеченията на изходните шини е зададен електрически потенциал 0 V;
- по повърхността на тоководещите елементи е изпълнено граничното условие:

$$\boldsymbol{n}.\boldsymbol{J} = 0 \tag{7}$$

Получените загубите на мощност от решението на електрическата задача, представляват източници на топлина за решаване на задача за топлинното поле. Топлинното поле се описва с уравнението на топлопроводимостта:

$$\gamma c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(\lambda \nabla T) + q \tag{8}$$

където: γ е плътност на материала; c - специфичен топлинен капацитет; λ - коефициент на топлопроводимост.

Топлоотдаването на тоководещите елементи и корпуса на прекъсвача към околната среда се описва чрез формулите за конвекция и лъчение:

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) = h(T - T_0) \tag{9}$$

$$\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)=\varepsilon\sigma\left(T^4-T_0^4\right) \tag{10}$$

където: h е коефициент на конвекция, определен по критерия на Нуселт в програмата; $\sigma = 5{,}67\ [W/m^2.K^{-4}]$ - константа на Стефан Болцман; ε - коефициент на лъчение, зададен съгласно [8].

На базата на геометричния модел е синтезиран в средата на програмата COMSOL компютърен топлинен модел на автоматичния прекъсвач. Програмата решава задачата за определяне на топлинното поле в преходен режим на основата на описания математичен модел, чрез метода на крайните елементи.

Разликата между загряването на клемите, получени от модела и експеримента, се дължи на факта, че в модела е прието равномерно разпределение на загубите по дължината на тоководещата верига на прекъсвача.

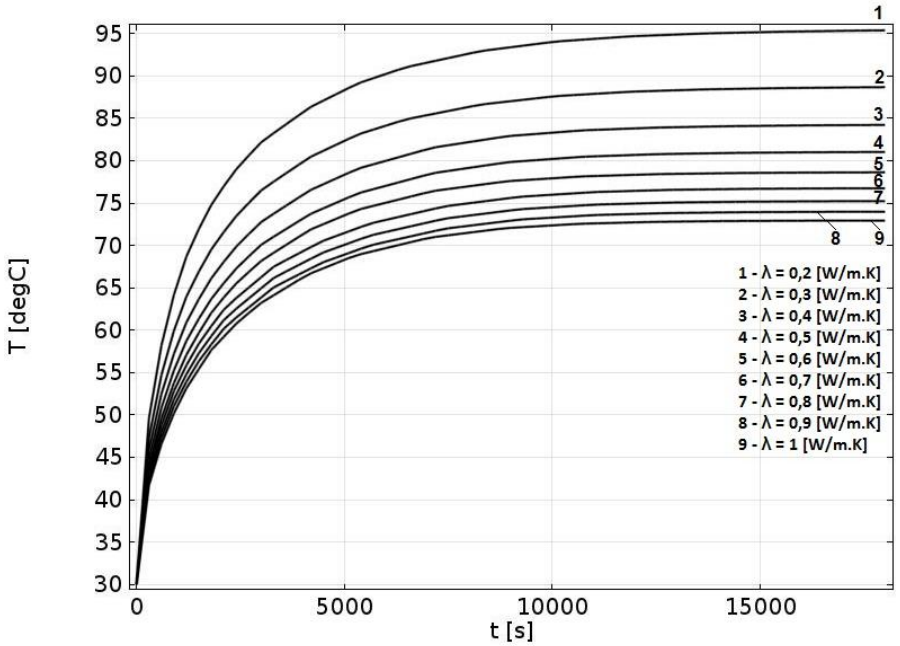
3.3. Определяне на коефициента на топлопроводимост и специфичния топлинен капацитет на корпуса на модела на прекъсвача

3.3.1. Коефициент на топлопроводимост

Клемите се явяват характерни елементи по отношение на загряването на прекъсвача. В резултат на това изследванията за определяне на топлофизичните характеристики се реализират на базата на експерименталните и числени резултати за средната клема.

На фиг.3 са показани семейство характеристики за преходния режим на загряване на горна средна клема при изменение на коефициента на топлопроводимост.

Те са построени от числените данни, получени от компютърния модел на прекъсвача.



Фиг.3. Преходен режим на загряване, получен от модела на горна средна клема при ток 80 А и различни коефициенти на топлопроводимост

От условието за равенство между установената температура, получена от експеримента и същата, получена от модела, се определя коефициента на топлопроводимост. За установена температура от експеримента се приема средната стойност между измерванията за горната и долна средни клеми. При тези условия за корпуса на прекъсвача в модела се получава коефициент на топлопроводимост $\lambda = 0,5\ [W/m.K]$.

3.3.2. Специфичен топлинен капацитет

Предложената по долу методика за определяне на специфичния топлинен капацитет на корпуса на модела на прекъсвача, се основава на следното:

- специфичният топлинен капацитет влияе съществено върху топлинната времеконстанта на модела;

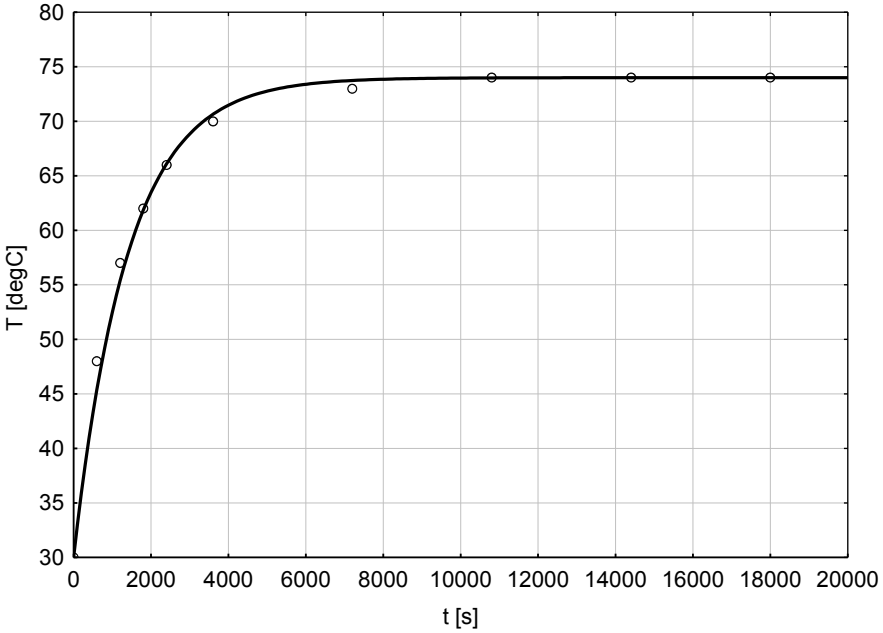
- специфичният топлинен капацитет не влияе върху установената температура.

Известно е [8], че температурата при преходния режим на загряване на хомогенен проводник, поставен при еднакви условия на охлаждане от всички страни е:

$$T = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_в^*}} \right) + T_0 \tag{11}$$

където: T е температура; τ_y - установено прегряване; t – време; $T_в^*$ - времеконстанта; T_0 - околна температура.

Най-близката функция, с която да се интерполират експерименталните резултати за загряването на прекъсвача, е (11). Това е направено във средата на програмния продукт STATISTICA 8 за преходния режим на загряване на средната клема, показан на фиг.4.



Фиг.4. Интерполираща крива към експерименталните данни

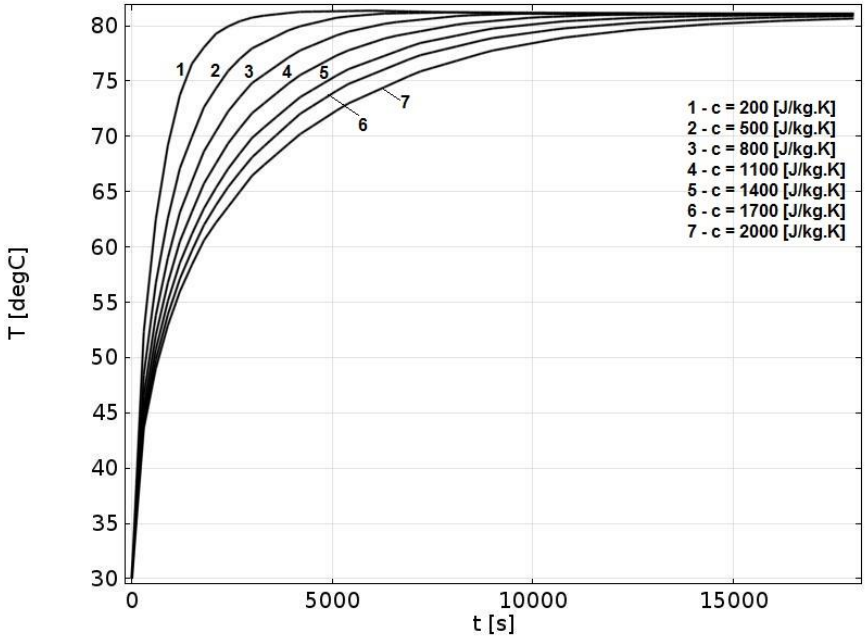
Полученият израз, описващ преходния режим на загряване на горна средна клема е:

$$T = 44.\left(1 - e^{-\frac{t}{1400}}\right) + 30 \tag{12}$$

От (12) се определя времеконстанта на топлинния модел $T_в^* = 1400$ *сек*.

Специфичният топлинен капацитет се определя чрез компютърния модел при отчитане на определения вече коефициент на топлопроводимост по следния начин:

а) Провеждат се съвкупност от числени експерименти чрез модела за определяне на преходния режим на загряване на средната клема при различни стойности на специфичния топлинен капацитет. На фиг. 5 са показни част от получените резултати в графичен вид.



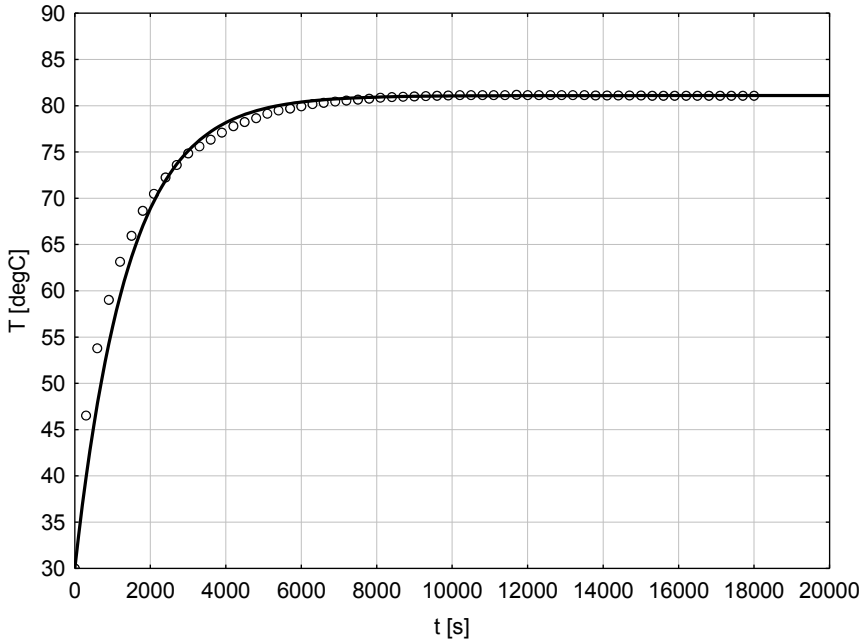
Фиг.5. Преходен режим на загряване, получен от компютърния модел на горна средна клема при ток 80 А и различни стойности на специфичния топлинен капацитет

б) За всеки резултат от числения експеримент се определя в средата на STATISTICA 8 интерполираща функия от вида (11). От получените функции за всеки числен експеримент се определя топлинната времеконстанта.

в) Чрез последователност от итерационни операции се задават стойности за специфичния топлинен капацитет, до изпълнение на условието за равенство между топлинните времеконстанти от експеримента и от модела. Окончателният израз за резултата от модела, който отговаря на това условие, е показан на фиг. 6, и се описва със следната интерполираща функция:

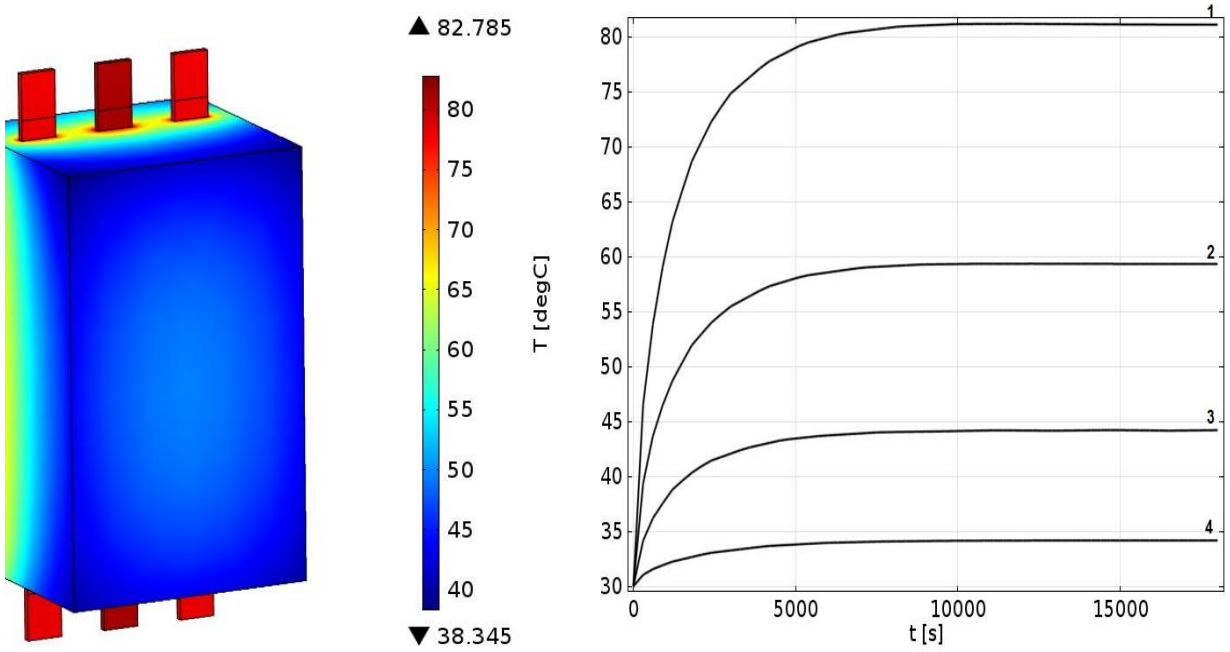
$$T = 51{,}1.\left(1 - e^{-\frac{t}{1400}}\right) + 30 \tag{13}$$

Получената стойност за специфичния топлинен капацитет на корпуса на модела е $c = 800$ *[J/kg.K]*.



Фиг.6. Интерполираща крива към числените данни при топлинен капацитет *c = 800 [J/kg.K]*.

На фиг.7 чрез разработения компютърен модел са определени загряването на клемите и корпуса на прекъсвача в преходен и установен режим.



а) б)

Фиг.7. Разпределение на температурата при:
а) - ток 80 А за установен режим в тоководещите елементи и корпуса на прекъсвача; б) - преходен режим на загряване на горна средна клема при ток:
крива 1 - 80 А; крива 2 - 60 А; крива 3 - 40 А; крива 4 - 20 А.

4. Заключение

1. Предложен е опростен топлинен компютърен модел на автоматичен прекъсвач. Методът е приложен за прекъсвач тип T1B160-TMD 80 с номинален ток 80A.

2. Резултатите за загубите и температурата, получени от компютърния модел и експериментално, се различават с грешка до 5%.

3. Предложеният топлинен модел на автоматичен прекъсвач може да се използва при синтезирането на топлинни модели на ККУ.

Литература

[1] БДС EN 60947-1:2007 ***Комутационни апарати за ниско напрежение. Част 1: Общи правила***.

[2] БДС EN 60947-2:2006 ***Комутационни апарати за ниско напрежение. Част 2: Автоматични прекъсвачи***.

[3] ABB - ***Методические рекомендации по выбору иразмещению автоматических выключателей в распределительных сетях 0,4 кВ инизковольтных комплектных устройствах***, Серия инженера-конструктора, Апрель 2008 г.

[4] Frei,P.U., Weichert,H.O**.,** ***Advanced thermal simulation of a circuit breaker***, Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Volume, Issue, 20-23 Sept. 2004, Page(s):104-109

[5] Paulke J., Weichert H., Steinhauser P., ***Thermal simulation of switchgear*****,** Proceedings of the Forty- Seventh IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2001, Page(s): 6-11

[6] Honggang Xiang, Degui Chen, Xingwen Li, Liang Ji, Weixiong Tong, ***Calculation of the Short-time Withstand Current for Air Circuit Breaker*****,** Proceedings of the 53rd IEEE Holm conference on Electrical contacts, 2007, Vol. , Issue, 16-19 Sept. 2007 Page(s):251-255

[7] Хаджидончев И., Марков Ст., Маламов Д., ***Експериментално изследване на контактното съпротивление на равнинни контактни съединения чрез сравнителен метод***, Сборник с доклади на VIII-та Национална студентска научно-техническа конференция НСТК 2012, Созопол, 19-23 септ. 2012 г. стр. (127-132)

[8] Александров А., ***Електрически апарати част I – Електромагнитни и топлинни проблеми***, Херон прес, София, 2002 г.

Автори: Иван Ячев, проф. дтн., катедра „Електрически апарати” Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *yatchev@tu-sofia.bg*; Диан Маламов, гл. ас. д-р, катедра „Електротехника” на ТУ-София, филиал Пловдив, E-mail address: *deanmalamov@abv.bg*; Иван Хаджиев, маг. инж. докторант, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *hadzhiev_tu@abv.bg*

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

ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ, ТОПЛИННИ И МЕХАНИЧНИ НАТОВАРВАНИЯ В СИЛОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ - МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ

Йордан Ботев

Резюме: *В работата са показани различни подходи за анализиране на електромагнитни, топлинни и механични проблеми в силовите трансформатори. Обърнато е особено внимание на изследване на електромагнитните полета в машината по метода с крайните елементи, тъй като с усъвършенстването на компютърната техника той става все по- използван поради високата си точност.*

Ключови думи: *силов трансформатор, метод с крайни елементи (МКЕ)*

ELECTROMAGNETIC, THERMAL AND MECHANICAL LOADS IN POWER TRANSFORMERS –METHODS FOR ANALYSIS

Yordan Botev

Abstract: *In the work some approaches for electromagnetic, thermal and mechanical analysis in power transformer. Due to the improvement of estimation machines and accuracy of the method it is particular attention paid to electromagnetic field estimation using finite element method.*

Keywords: *power transformer, finite element method (FEM)*

1. Въведение

Процесът на преструктуриране и приватизация в енергетиката, създаде световен електроенергиен пазар. В тази нова и предизвикателна среда е налице необходимостта да се внедряват нови методи и средства за проектиране и производство, с помощта на които да се изпълняват повишените изисквания на клиентите към техническите характеристики, качеството и надеждността на трансформаторите и другите електроенергийни съоръжения. Те позволяват интензифициране на процеса на проектиране, по-ефикасно използване на основните материали, намаляване на размерите и общите разходи за производство. Резултатът се изразява в повишаване на ефективността и значително подобряване на надеждността за срока на експлоатация.

Ефективността на трансформаторите се повишава чрез намаляване на загубите на празен ход и загубите под товар. Надеждността им, освен от качеството на изработване, зависи от натоварванията в определени локални зони, за които не трябва да се допуска да превишават критични стойности.

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

ISSN 1311-0829

Точното определяне на разпределението на магнитното и топлинното полета на етапа на проектиране е необходимата предпоставка за намиране на рационални и ефективни конструктивни решения, водещи до намаляване на загубите. За повишаване на надеждността от съществено значение е по-точно изчисляване на потоците на разсейване, напрежението на късо съединение и силите действащи върху намотките на трансформатора вследствие на късо съедниние, тъй като това позволява да се избегнат механични повреди по време на изпитванията и при поява на къси съединения в мрежата [1].

Електромагнитните натоварвания на трансформатора се проявяват чрез загряването на неговите активни и конструктивни части и електродинамичните сили, действащи върху тях при различните режими на работа.

- Загряване на трансформатора: Топлинното състояние на трансформатора е основен фактор, влияещ върху надеждността му. Загряването на трансформатора е онзи фактор, който ограничава мощността му при продължителен или кратковременен режим на работа. То е в резултат от загубите на електрическа енергия в намотките, магнитопровода и други елементи на трансформатора, поради което температурата в отделните части става по-висока от температурата на околната среда. Освен от натоварването, загряването зависи още и от начина на охлаждане.

- Механични сили в трансформатора: Електродинамичните сили в силовите трансформатори са резултат на протичащият ток в намотките им. Изследването на тези сили в силовите трансформатори е от голямо значение и се разглежда обстойно на етапа проектиране на трансформатора. Изчислявайки силите в различни режими на работа и аварийни режими се избира нужната здравина на проводника, използван за изработката на намотките, ширината и броя на подложките и най-важното по тези сили се оразмерява притегателната система на цялата активна част.

2. Методи за изчисляване и анализ на трансформаторите

Аналитични методи

Класическите аналитични методи са базирани на описанието на физическите процеси, протичащи в трансформатора при различните режими на работа. Изразяват се в системи уравнения, обвързващи електрическите и магнитните величини с параметрите и геометричните размери на елементите на трансформаторите. Характеризират се с ясна логическа връзка между величините, не голяма сложност и времеемкост, поради което в продължение на десетилетия се използват от всички производители при проектирането на трансформаторите.

Аналитичните методи са разработени при допускането за симетрична работа в установен режим, поради което не могат да бъдат достатъчно ефективни при пространствени или електрически несиметрии, несиметрични натоварвания или неустановени режими на работа. Математичните модели, разработени с аналитичните методи, съдържат интегралните стойности на величините и затова оп-

ределените с тях електромагнитни, топлинни или механични натоварвания показват средните стойности за съответния участък. Това не позволява да се намерят зоните, в които натоварванията имат повишени стойности и да се анализира въздействието им върху загубите и надеждността на трансформатора, както и да се търсят конструктивни решения за отстраняване или намаляване на локалните проблеми.

Числени методи

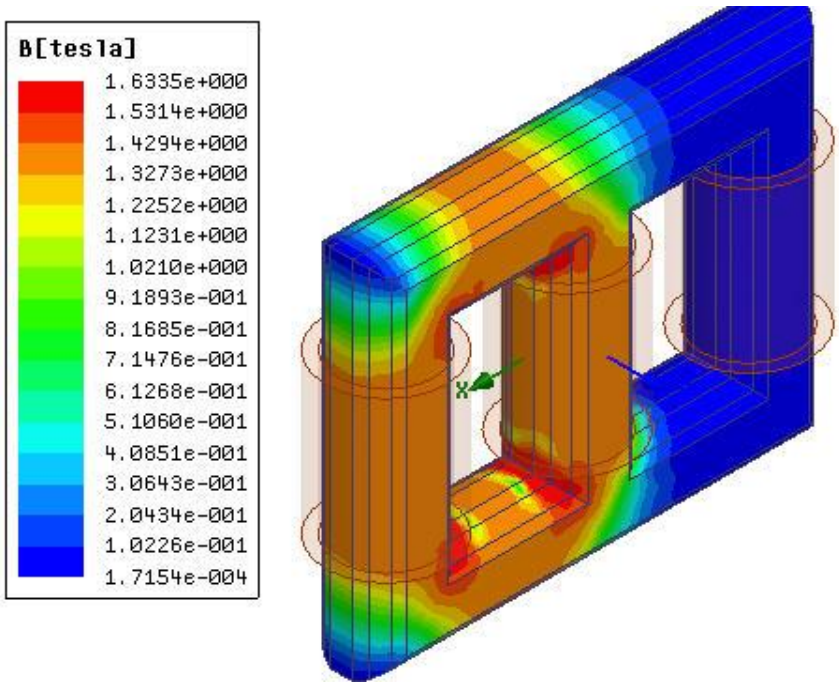
Детайлното изследване на разпределението на електромагнитното поле стана възможно с разработването на числени методи за решаване на уравненията на Максуел. В последните години методът с крайни елементи (МКЕ) се наложи като мощен и надежден инструмент за анализ на полеви задачи в областта на електростатиката, електромагнетизма, термодинамиката, аеродинамиката, механиката и др. и е заложен в много от комерсиалните и фирмени CAD системи. С развитието на изчислителната техника той масово навлезе в сферата на проектирането на електрическите машини и в частност на силовите трансформатори. Оптималното им проектиране изисква прецизно анализиране на електромагнитните, топлинните и механични полета, за да се определят точно параметрите и техническите характеристики на машините. В зависимост от конкретната задача се прави анализ на двумерна или тримерна област, която се дискретизира на много на брой и малки по размер елементи и това дава възможност за получаване на детайлна картина на изследваното поле.

При силовите трансформатори полевият анализ позволява да се определят с висока точност най-натоварените зони в електромагнитно и топлинно отношение, потоците на разсейване и загубите, които те създават.

3. Изследване на електромагнитното поле. Загуби от потока на разсейване

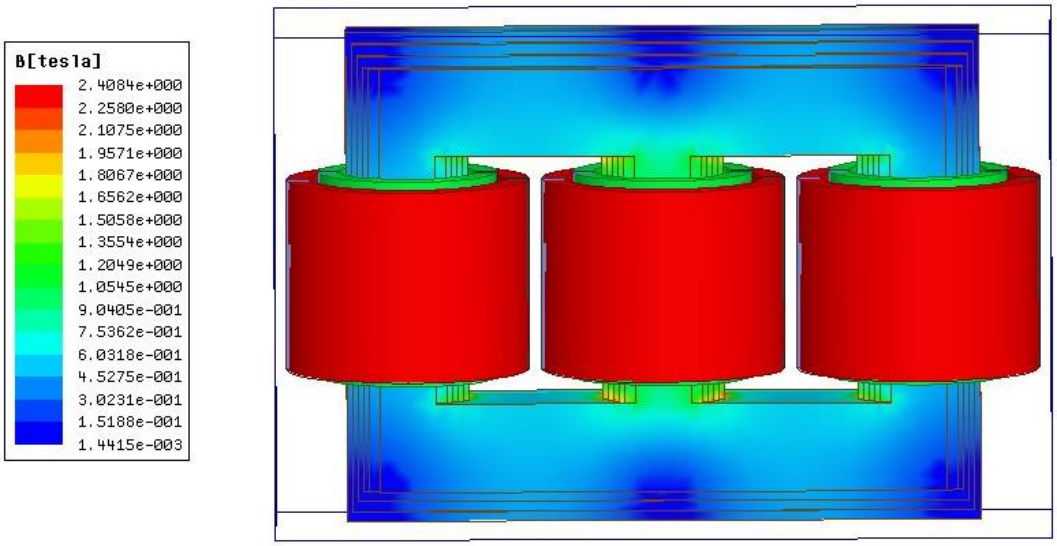
Детайлният триизмерен (3D) анализ на потока на разсейване ни дава възможност да определим загубите в металните нетоководещи части на трансформатора. Тези загуба са функция на преминаващия през тях поток на разсейване от намотките. Те не могат да се определят аналитично с голяма точност, каквато методът с крайни елементи ни дава. В продължение на десетки години различни учени и инженери са разработвали различни техники, които да им позволят използването на МКЕ. И докато преди е било важно да се опрости задачата с цел продължителността на решаването да се намали, то с увеличаване на бързината на изчислителната техника се цели увеличаване и на точността на получените резултати.

Както е известно трансформатора се захранва от източник на променливо напрежение със съответна честота. В такъв случай и магнитната индукция не е постоянна и равномерно разпределена по цялото протежение на матнитопровода. Това е ясно показано на фиг.1, където е представено разпределението на магнитната индукция в магнитопровода в момента, когато захранващото напрежение на едната фаза минава през нулата. [9]



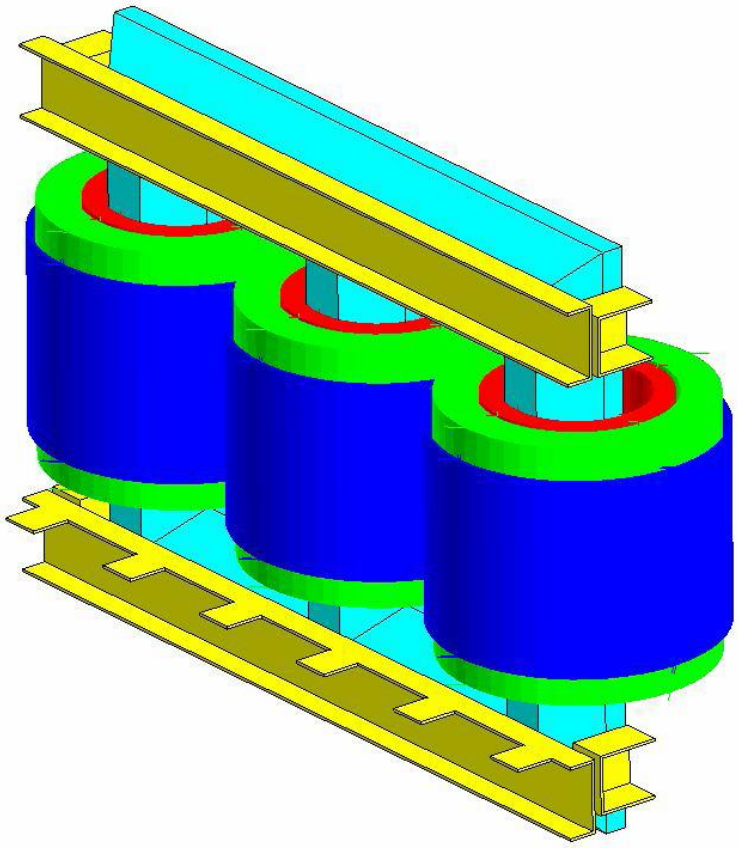
Фиг.1. Триизмерен модел на магнитопровод и намотки ниско на трифазен силов трансформатор [9]

На фиг.2 е представен модел на трансформатор като е показано в кои части на мангитопровода е най-висока магнитната индукция и къде е значително по-ниска.



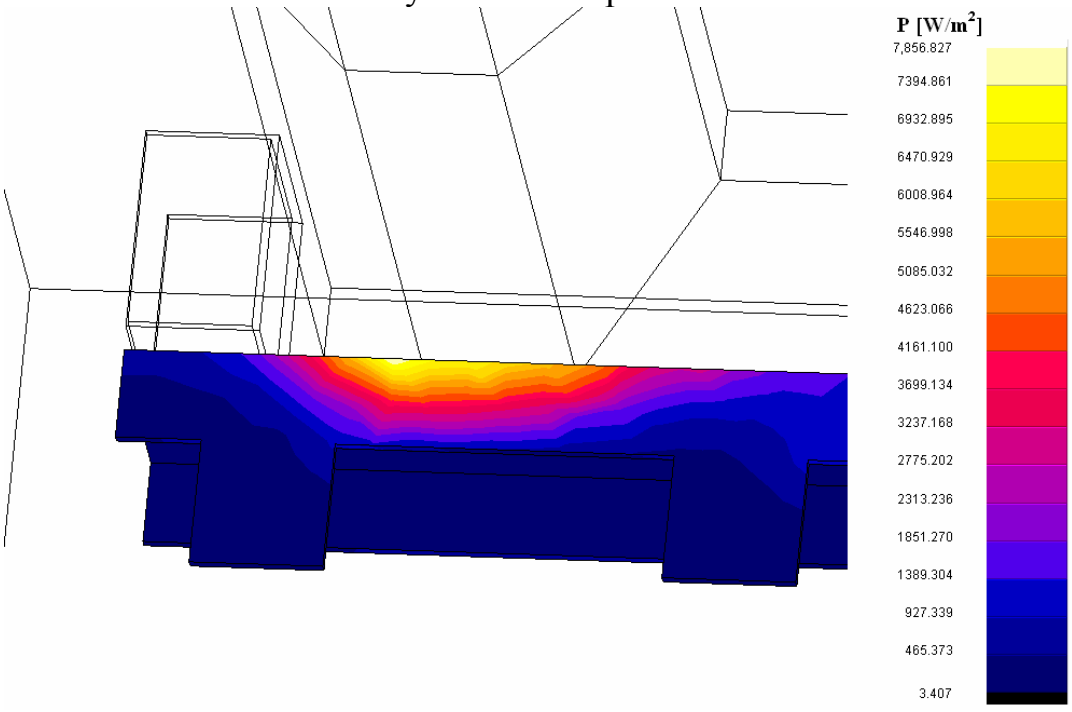
Фиг.2. Разпределение на магнитната индукция в магнитопровода на трифазен силов трансформатор. [2]

В [8] разглеждат загубите от потока на разсейване в стените на казана и други нетоководеща метални части на трансформатора. На фиг.3 е показан модел на една втора от активната част на трансформатора. Моделирани са и горната и долната греда поради това, че след стената и шунтовете те са другите най-натоварени части на трансформатора в следствие на потока, който минава през тях.

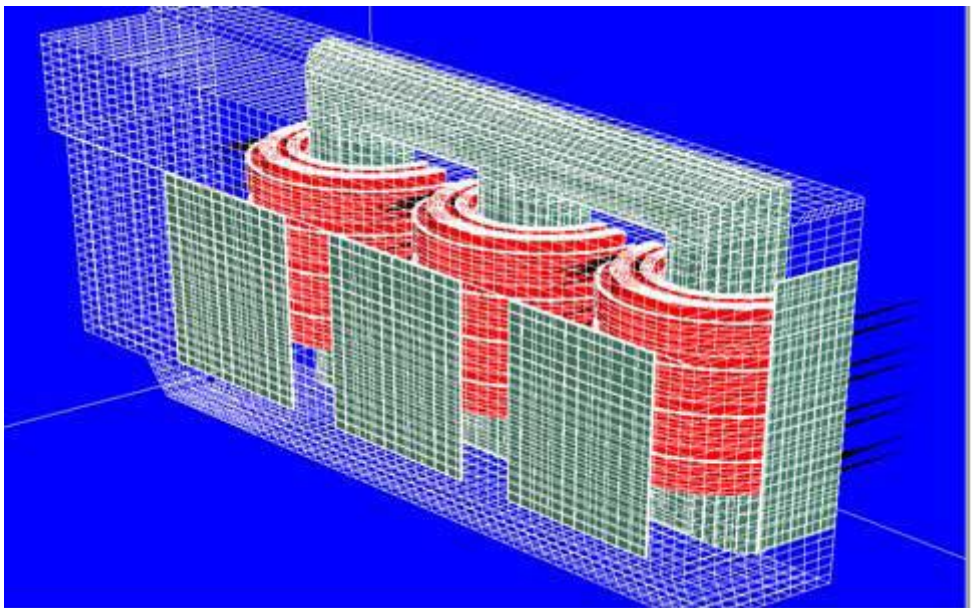


Фиг.3. Триизмерен модел на една втора от активната част
на силов трансформатор.[8]

На фиг.4 са показани загубите от вихрови токове в долната греда в областа на намотките. Ясно се вижда, че колкото по-близко до намотката е изследваната област толкова по-големи са загубите от вихрови токове.



Фиг.4. Загубите от вихрови токове в долната греда на трансформатор
в областта на намотките [8]



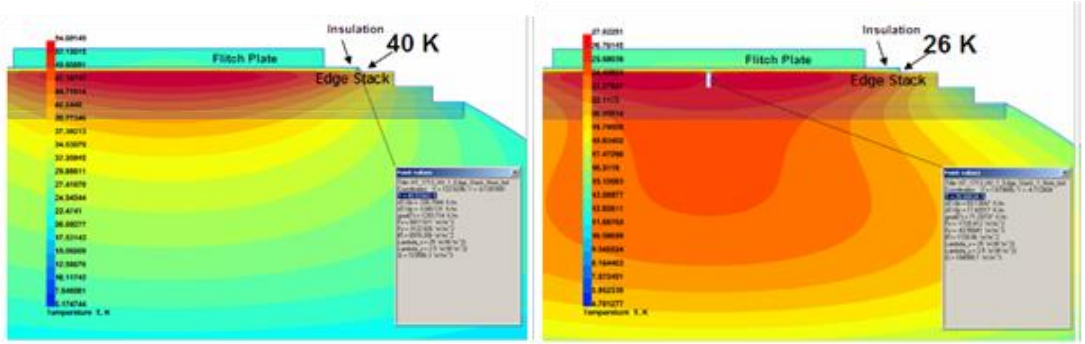
Фиг.5. Триизмерен модел на активна част и казан с шунтова система на трифазен силов трансформатор [1]

Използването на МКЕ дава възможност да се определят различни параметри в области и детайли където други методи са трудно приложими. В [1], задавайки захранване на намотките на трансформатора, са определили полето на разсейване от където и индукцията по височината на шунтовете.

4. Изследване на топлинни полета в силовите трансформатори с МКЕ

Както вече беше споменато топлинните параметри са водещи за определяне на натовареността на силовите трансформатори. Те са дефинирани и в международните стандарти IEC и ANSI като допустими прегрявания на масло-въздух, намотка - масло, нетоководещи метални части - масло и температура на най-горещата точка на трансформатора.

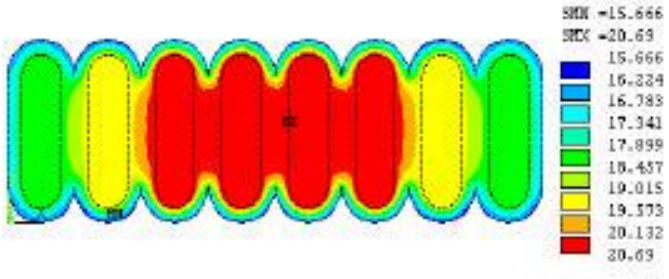
МКЕ дава възможност за подробно изследване на неравномерни полета. А в трансформаторите топлинните полета са предимно неравномерни в пространството.



Фиг.6. Разпределение на топлинното поле в напречното сечение на магнитопровода. [3]

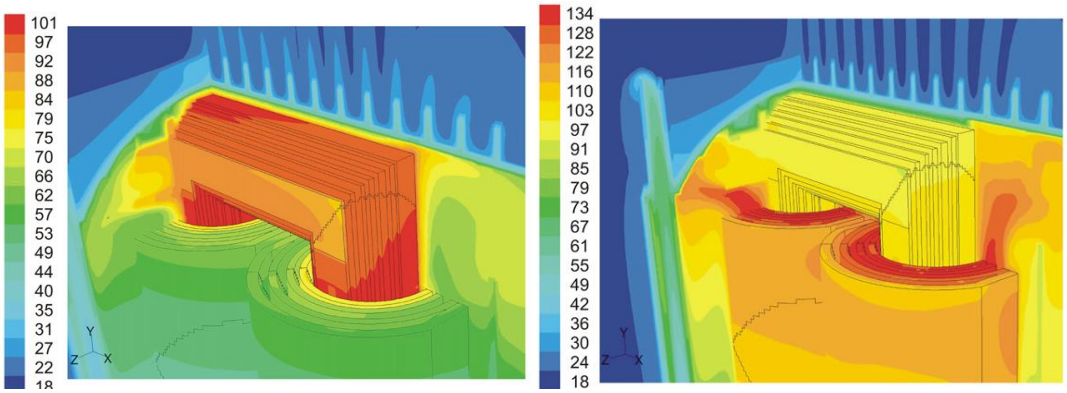
На фиг.6 са показани резултатите от изследване на температурното поле в последните пакети от магнитопровода при номинално натоварване на трансформатора [1]. На първата картина е представено разпределението на температурата

при изходния проект, която показва висока стойност на прегряването в крайния пакет. В резултат от този анализ е приложено разделяне на крайния пакет на два отделни, отстоящи на няколко милиметра. Изследването на температурното поле след тази намеса показва значително по-равномерно разпределяне на температурата в магнитопровода и намаляването в крайния пакет с около 35% без да се налага да се влагат допълнително материали.



Фиг.7. Разпределение на температурата в една секция на дискова намотка [3]

В [3] е направен анализ на разпределението (фиг.7) на температурата в една секция от дискова намотка. Той показва значително по–високата температура в средата на секцията, дължаща се на по-лошите условия на охлаждане и ниската топлопроводност на изолацията.

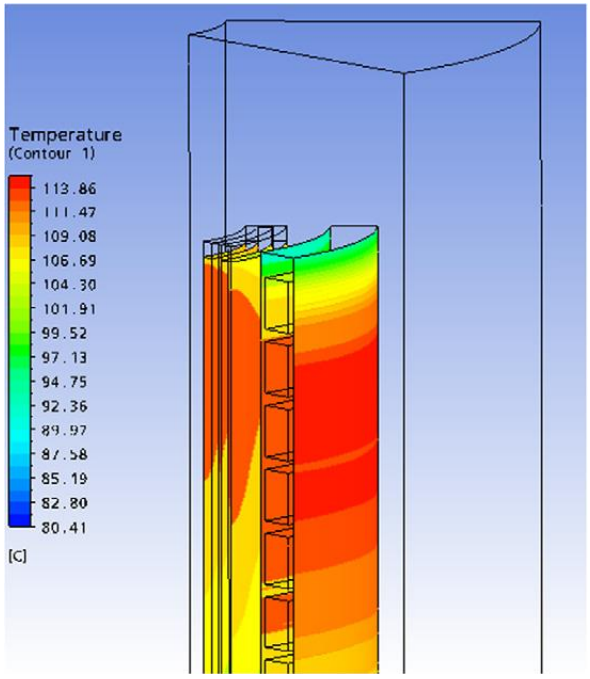


а) б)

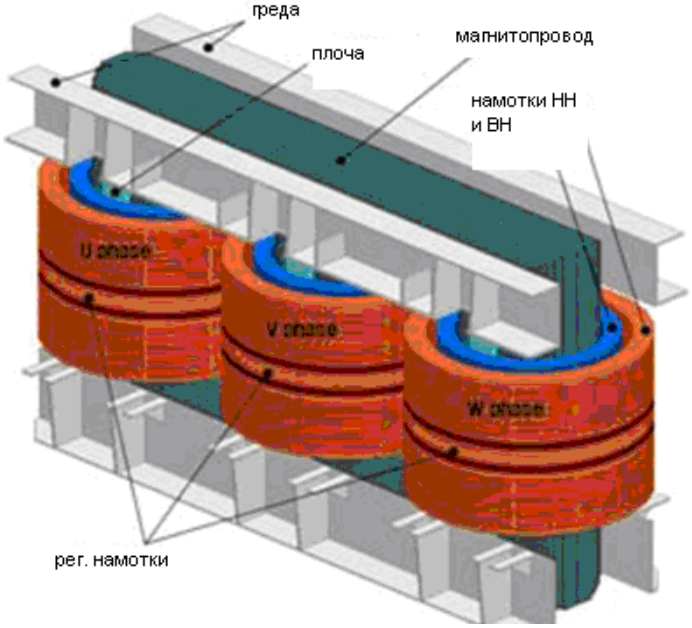
Фиг.8. Разпределение на температурата в трансформатора
а) по време на опит на празен ход, б) по време на опит на късо съединение [4]

В [4] са направили топлинен модел (фиг.8) на активната част на сух трансформатор. МКЕ дава възможност за точното определяне на топлинните полета по време на различни режими на работа на трансформатора. На базата на получените резултати може да се оптимизира позицията и капацитета на охладителната система, с което да се подобрят параметрите на трансформатора.

В [5] са изследвали разпределението на температурата в сух трансфроматор като са отчели и циркулацията на въздуха. Освен че са направили топлинен анализ са използвали МКЕ за решаване на флиуден проблем с цел по-голямо приближаване до реалното топлинно разпределение. Този подход изисква повече ресурси, което налага до опростяване или намаляване на изследваната геометрия, но получените резултати много се приближават до реалните.



Фиг.9. Разпределения на температурата на повърхността на намотката [5]



Фиг.10. Активната част на силов трансформатор [10]

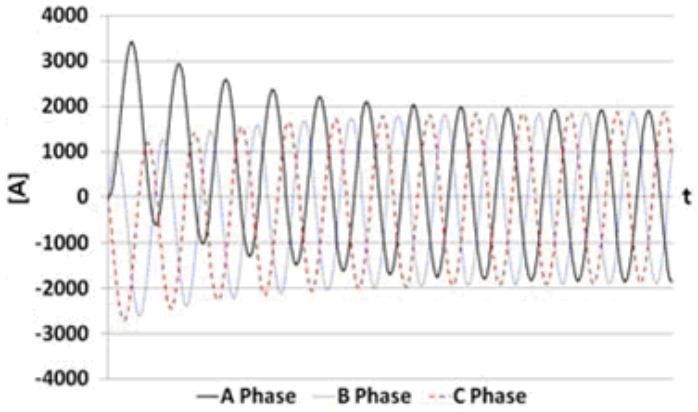
5. Изследване на механични сили в силовите трансформатори с помощта на МКЕ

Механичните сили, които се появяват при къси съединения, в силовите трансформатори. подлежат на внимателно изследване, а понякога и на реален тест в специализирана лаборатория. Това се прави с цел да се осигури механичната устойчивост на трансформатора. По време на късо съединение на клемите на трансформатора или в електропреносната система, през намотките на трансформатора протичат значително по-големи токове от номиналния. Тези токове предизвикват големи електромагнитни сили, и ако трансформатора не е проектиран да ги издържи, може да се стигне до значителни поражение по активната

част на трансформатора.

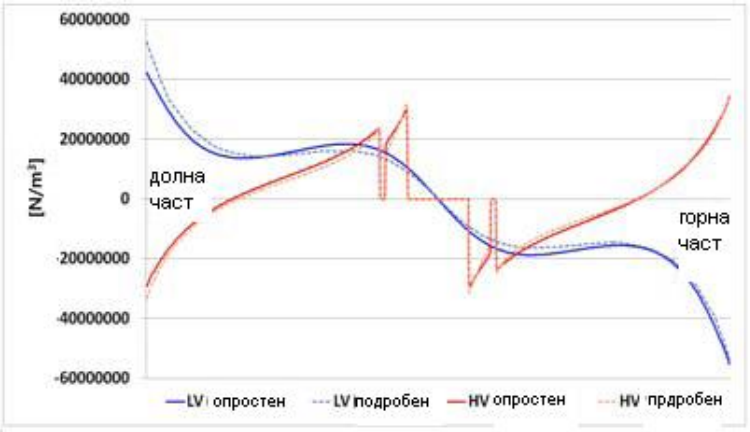
В [10] е направен 3D модел на активната част на силов трансформатор с цел да бъдат изчислени силите в намотките по време на късо съединение. На фиг.10 е показана активната част на изследвания модел.

На фиг. 11 са показани изчислените токове на късо съединение за трите фази.



Фиг.11. Токове на късо съединение по време на късо съединение [10]

На фиг.12 са показани механичните напреженията в резултат от силите в аксиална посока. Ясно се вижда, че те имат максимални стойности в двата края и сравнително малки стойности в средната област.



Фиг.12. Аксиална съставка на силите на късо съединение [10]

6. Заключение

В дни на световна икономическа криза и огромна конкуренция целта на всеки производител на силови трансформатори е да намали себестойността на изделието си и подобри неговите параметри с цел да придобие предимство пред конкуренцията. МКЕ дава възможност за детайлно определяне на полетата (било то електрически, магнитни, топлинни или механични),като в голямата си част те са неравномерни. МКЕ се явява мощен инструмент в това начинание, поради което голяма част от производителите на силови трансформатори работят в тясно сътрудничество с софтуерни компании с цел адаптиране на програмите за анализ конкретно към дадено производство.

Литература

[1] Chetan C. Adalja, M.L. Jain, Analysis of Stray Losses in Power Transformers by3-D Magnetic Field Simulation, *Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, December 2008*

[2] Digalovski, M. L. Petkovska, K. Najdenkoski. Determination of Three-Phase Transformer Reactances with 3d Finite Element Method, *Thirteenth International Conference on Electrical Machines, Drives And Power Systems - ELMA 2011*

[4] Smolka, J. A. J. Nowak, Experimental validation of the coupled fluid flow, heat transfer and electromagnetic numerical model of the medium-power dry-type electrical transformer, *International Journal of Thermal Sciences 47 (2008) 1393–1410*

[5] Eslamian, M., B. Vahidi, A. Eslamian, Thermal analysis of cast-resin dry-type transformers, *Energy Conversion and Management*

[6] Ангелов, А., Д. Димитров, Електрически машини първа част, Техника, 1976

[7] Дачев, А. Специални силови трансформатори, Техника, 1967

[8] Lenart Kralj, Damijan Miljavec, Stray losses in power transformer tank walls and construction parts.

[9] MAXWELL 3D – user's guide

[10] Hyun-Mo Ahn1, Joong-Kyoung Kim, Jung-Woo Ha, Yeon-Ho Oh, Ki-Dong Song, Sung-Chin Hahn, An Efficient Numerical Investigation for Short-Circuit Force Prediction of Power Transformer Considering 3-D Effects.

Автори: маг. инж. Йордан Ботев, Хюндай хеви индъстрис - България; E-mail address: *yordan_h_botev@abv.bg*

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

ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ ДРОСЕЛИ

Йордан Шопов

Резюме: *Магнитопроводите за различни видове трансформатори и дросели, се изработват във вид на пакети от ламели, най-често с правоъгълна, с Е-,с П-, или с Г-образна форма. Изработват се чрез щанцоване, след което се сглобяват чрез подреждане на ламелите. И за двете технологични операции са необходими освен специализирани машини и съоръжения, а така също и технологично време. Всичко това оскъпява изделията. В работата е предложена технология, при която всички елементи на магнитопровода се изработват чрез навиване от ленти от електротехническа стомана. В резултат на това процесите значително поевтиняват, а времето за изработка на готово изделие чувствително се съкращава.*

Ключови думи: *магнитопроводи, дросели, ламели за магнитопроводи*

TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF ELECTROMAGNETIC CHOKES

Yordan Shopov

Abstract: *Magnetic cores for different types transformers and chokes makes as a package of lamellas usually with rectangular, Ш, П- or Г-shaped form. They produce by stamping and then they mount by ordering the lamellas. Both two technological operations require machines and equipment as well as technological time for their realization. These make more expensive the products. In the paper, the technology where all elements of the magnetic core are manufactured by winding up the electrical steel, which is cut into ribbon, is suggested. As a result the durations of the processes and the price of the final product significantly decrease.*

Keywords: *magnetic cores, chokes, lamellas for magnetic cores*

1. Въведение

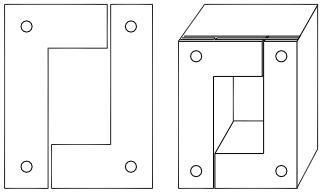
Магнитопроводите са съоръжения, предназначени да концентрират в себе си магнитните потоци. Използват се във всички видове електрически ма-шини, трансформатори, дросели, електромагнити и други електротехнически съоръжения. Разнообразието на различните видове магнитопроводи и използваните технологии за изработка е много голямо. Основният проблем е да се получи максимално запълване на отворите на бобините, в които се поместват магнитопроводите. Когато отворите са с квадратна или правоъгълна форма това условие се изпълнява без проблем със набор от пластини с еднакви размери. В слу-

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

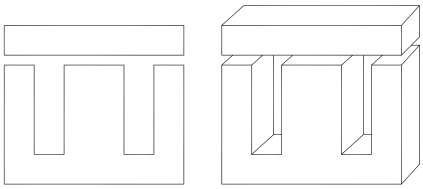
ISSN 1311-0829

чаите, обаче, когато отворите са с кръгла форма, теоретично е необходимо пластините (по двойки) да бъдат с различни размери.

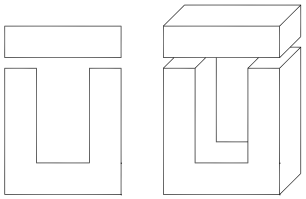
2. Конвенционална технология за изработване на магнитопроводи



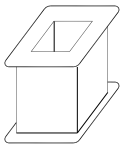
фиг.1.а. Ламели с Г-образна форма



фиг.1.б. Ламели с Е-образна форма



фиг.1.в. Ламели с П-образна форма

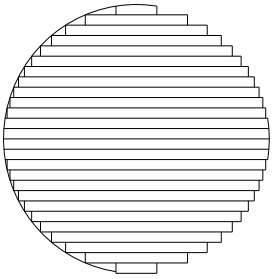


фиг.2. Бобина с правоъгълен отвор

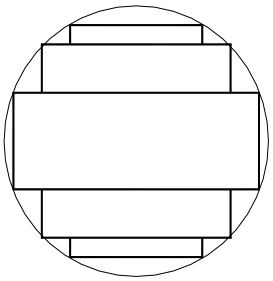
Магнитопроводите за различни видове трансформатори и дросели, най-често се изработват чрез щанцоване на ламели с правоъгълна, с Е-, с П- или с Г-образна форма – фиг.1а – 1в. След това те се сглобяват във вид на пакети. Щанцоването е скъпа операция, необходими са специализирани машини и съоръжения, а освен това и времето, необходимо за подреждане на ламелите допълнително оскъпява изделията. При този тип магнитопроводи формата на отвора на бобините, който се запълва с ламели, е правоъгълна - фиг.2. Навиването на такива бобини с тънък проводник не е проблем, но при мощните съоръжения се използва профилен проводник с голямо сечение и ***в този случай нормалното изпълнение е навивките да са с кръгла форма.***

За целта те се навиват върху тънкостенни цилиндри от изолационен материал. Както беше казано по-горе от тук идва и допълнителен проблем – за ефективното запълване на кръглия отвор на бобината е необходимо пакета на магнитопровода също да бъде с подобна форма.

Едно от прилаганите решения на проблема за максимално запълване на отвора, което се прилага за да се изпълни това изискване, е да се използват пластини, всяка една от които да бъде с различна ширина, подредени по начина, показан на фиг.3. Това решение гарантира почти максимално запълване на кръг-лата форма, но не е технологично, защото би изисквало машината за изрязване на отделните пластини непрекъснато да се пренастройва, а подреждането им в пакета би било изключително сложно. Поради това се прибягва до компро-мисния вариант, показан на фиг.4. Ядрото е сглобено във вид на стъпаловиден пакет от ламели с една и съща ширина за всяко отделно стъпало (в случая пет стъпала). В този случай частично (в някои случаи под 90%) е изпълнено изискването за максимално запълване на отвора. По-съществено при това решение е, че намаленото сечение на магнитопровода изисква увеличаване на броя на навивките т.е. допълнителен разход на меден проводник.



фиг.3

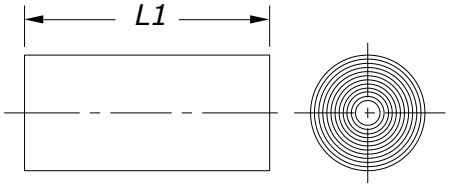


фиг.4

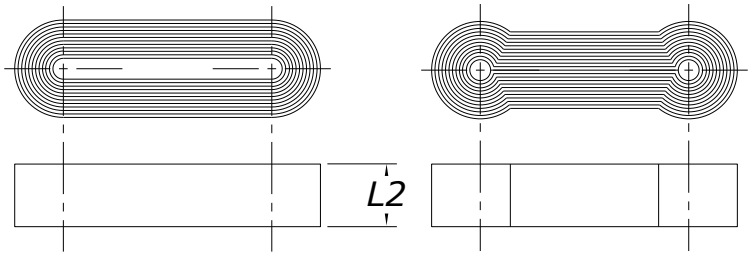
3. Иновативно решение

В работата се предлага технология, при която всички елементи на магнитопровода се изработват чрез навиване от лента от електротехническа стомана със съответната широчина. Двете ядра се навиват във вид на цилиндри (фиг.5) от лента с широчина ***L1***. При навиването е желателно да се използва подходящо лепило и изолационна лента. Яремите са с форма, показана на фиг.6 и се навиват по същия начин върху подходящ „дорник" от лента с широчина ***L2***.

В резултат на така предложената технология, процесите за изработка на магнитопроводи значително се опростяват и поевтиняват, а времето за изработка на готово изделие чувствително се съкращава. Решението е подходящо за приложение при изработката на филтрови дросели за мощни токоизправители.



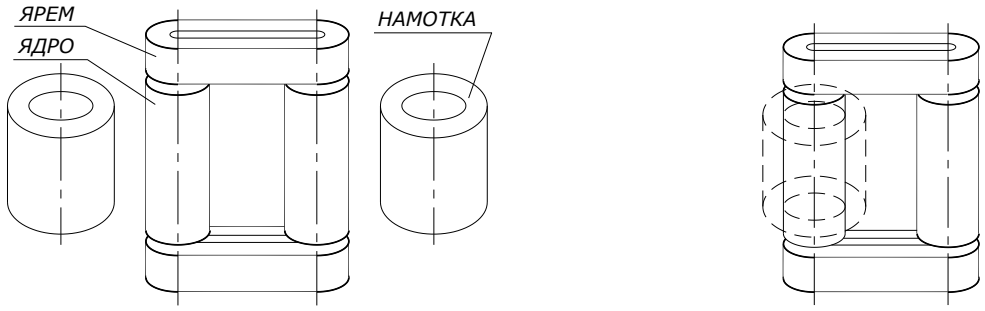
фиг.5



фиг.6

4. Анализ и изводи

Предложеното решение на проблема при изработката на дросели за големи мощности има няколко съществени предимства спрямо вариантите, показани на фиг.1. Най-важното предимство е бързината и простотата при изработката на магнитопроводите. Освен това се спестява операцията "щанцоване" на стотици ламели и последващо им нареждане в пакети. Вместо това се използва простата и бърза операция "рязане" на електротехническата стомана с ролкова ножица на ленти и последващо навиване, като веднага след навиването им може да се сглоби готовата конструкция. Не без значение е и факта, че сглобяването на цялото изделие се опростява значително, а освен това конструкцията се отличава със своята стабилност. Съвсем схематично, без технически подробности, на фиг.7 са показани отделните възли на един дросел и вариант за конструкция с една намотка.



фиг.7

5. Заключение

Предложеното решение е подходящо за прилагане при изработката на мощни дросели, при които се изисква наличие на въздушна междина. В случая въздушната междина е разпределена на четири части, което е благоприятно по отношение на полето на разсейване на магнитните потоци. Предимство е и обстоятелството, че регулирането на размера на въздушните междини се осъществява с елементарни операции и с желаната точност.

Литература

[1] Масларов И., Шопов Й., ***Технологии в електротехниката и електрониката***, Авангард Прима, 2008, стр. 116-124

[2] Купенов Д., ***Технология на електрически машини и апарати***, Техника, София, 1990, стр. 156-159

[3] Стоянов П., ***Технология на електроприборостроенето***, Техника, София – 1982, стр. 129-134

[4] Минчев М., Н.Трифонов, ***Ръководство за проектиране на безконтактни апарати,*** Техника, София, 1987, стр. 111-114, 166-172

Автори: Йордан Шопов, доц. д-р, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *shopov@tu-sofia.bg*

Постъпила на: 02.09.2013 **Рецензент:** доц. д-р Диляна Господинова

ПРИЛОЖЕНИЕ НА СВЕТОДИОДИ ПРИ ПРОМЕНЛИВО-ТОКОВИ РЕЖИМИ

Йордан Шопов, Симона Петракиева

Резюме: *В работата са предложени опростени схемни решения за захранване на светодиоди от променливотокови източници или от захранващата мрежа. Това е възможно чрез свързване на светодиодите антипаралелно по двойки. Ограничението на тока се реализира чрез използване на реактивни импеданси. Анализирани са предимствата и недостатъците на различните схеми и са дадени препоръки за подходящи области на приложение. Основни положителни качества на предложени-те решения са сравнително евтините възможности за реализация и повишената надеждност при експлоатация.*

Ключови думи: *захранване на светодиоди, схемни решения със светодиоди, реактивни импеданси, приложения на светодиоди*

APPLICATION OF LIGHT EMITTING DIODS IN AC SWEEP

Yordan Shopov, Simona Petrakieva

Abstract: *In the paper, some simplified scheme solutions supplying light emitting diodes from either AC sources or supplying electrical network, are suggested. It is possible if the light emitting diodes are connected in pairs as anti-parallel. The limitation of the current realizes by the reactive impedances. The advantages and disadvantages of different proposed scheme solutions are analyzed and some recommendations for appropriate application areas are given. Main priority of suggested solutions are both theirs comparatively easily realization and increased exploitation reliability.*

Key words: *LED supplying, scheme solutions with LED, reactive impedances, applications of LED*

1. Въведение

За гарантиране на нормална и продължителна експлоатация, светодиодите в повечето случаи се захранват със стабилизиран източник на ток или на напрежение [1], [2]. Това се налага поради нелинейността на волтамперната им характеристика. Конвенционалното решение е прилагане на стабилизация по ток. За ограничаване на тока до допустима стойност може да се използва и последователно включен импеданс. При елементарните схемни решения с постояннотоково захранване ограничението на тока се реализира с последователно включен във веригата резистор.

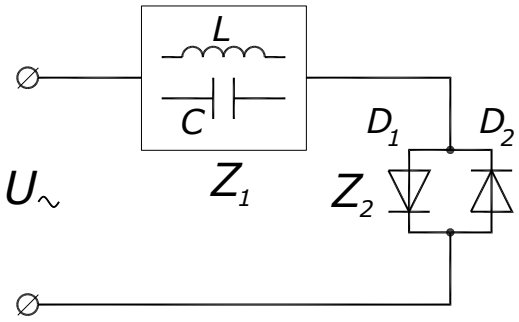
© 2013 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

В различните схеми на устройства със светодиоди (за осветление, реклама, индикации и т.н.) за захранване обикновено се използват драйвери с подходящи параметри – ток, напрежение и мощност. Това са различни по сложност и възможности AC/DC преобразователи за ниско напрежение с постояннотоков изход, към който се включват един или повече светодиоди. В повечето случаи преобразователите имат и системи за защита от недопустими режими, както и възможности за контрол и регулиране на светлотехническите параметри.

2. Захранване на светодиодите с „условен" източник на ток

Когато, обаче, е необходим евтин и прост за изпълнение вариант, вместо използването на скъпи стабилизирани преобразователи може директно да се използва захранващата мрежа. В този случай е необходимо светодиодите да бъдат свързани антипаралелно по двойки. Ограничаването на тока се реализира с последователно включен реактивен елемент, напр. индуктивност или кондензатор. Подходящи са кондензатори, предназначени за работа във вериги за променлив ток, напр. кондензаторите за компенсиране на ***cosφ*** при луминесцентни и други газоразрядни лампи. Най-прост вариант е показан на фиг.1. Със $\boldsymbol{Z_1}$ е означено реактивното съпротивление на кондензатора (или индуктивността), а със $\boldsymbol{Z_2}$ – динамичното съпротивление на двата светодиода.



Фиг.1. Схема с условен „източник"на ток

В този случай може да се приеме, че имаме захранване с „условно" стабилизиран източник на ток. Това е така, защото при захранване с мрежово напрежение ***230V***, основно значение за тока през веригата има стойността на реактивното съпротивление на кондензатора.

Известно е, че динамичното съпротивление на светодиодите, в зависимост от тяхната мощност, е от няколко ***Ω*** до няколко стотин ***mΩ***. За ток съответно ***20, 100*** и ***350 mA*** общото съпротивление във веригата трябва да бъде:

$$R_{20} = {}^{230}/_{0,02} = 11500\ \Omega, \quad \text{при } (R_d \approx 10\ \Omega)$$

$$R_{100} = {}^{230}/_{0,1} = 2300\ \Omega, \quad \text{при } (R_d \approx 2\ \Omega)$$

$$R_{350} = {}^{230}/_{0,35} = 657\ \Omega \quad \text{при } (R_d \approx 0{,}5\ \Omega)$$

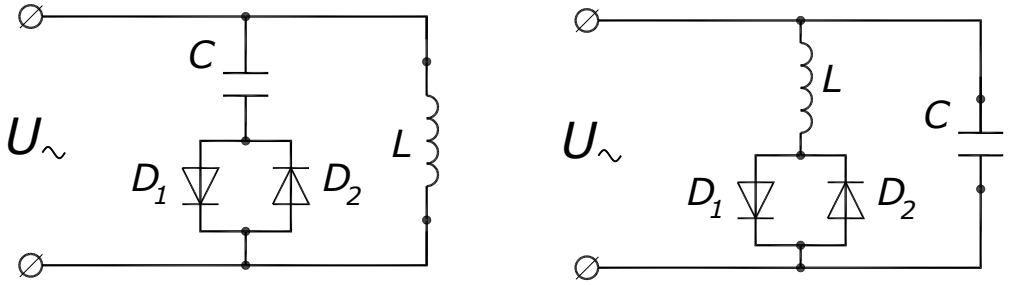
Очевидно е, че динамичното съпротивление на светодиодите (приблизителни стойности са показани в скоби) практически няма никакво влияние върху тока във веригата тъй като е с два до три порядъка по-малко.

На базата на пресметнатите по-горе стойности без проблем може да се пресметнат необходимите реактивни съпротивления при честота ***50 Hz***. Важна особеност, която трябва да се има предвид при изчислението е, че всеки светодиод работи само през единия полупериод и за да бъде достатъчен токът за двата, импедансът трябва да бъде два пъти по-малък. Например, ако реактивният елемент е кондензатор необходимата стойност може да се пресметне от израза:

$$X_c = \frac{1}{2.\omega.C} = \frac{1}{628.C},\ C = \frac{1}{628.X_c},\ F$$

1. Схемни решения при променливотокови режими с компенсиране на реактивната мощност

Основен недостатък на показания пример е, че от мрежата се консумира реактивна енергия. За да се отстрани този недостатък е достатъчно да се реализира схема за ограничение на тока през светодиодите с два реактивни елемента, както е показано на фиг.2**.** В зависимост от параметрите на избрания тип светодиоди, последователно включения с тях реактивен елемент се оразмерява така, че неговото съпротивление да се осигури необходимия ток и за двата.



Фиг.2

За пълна компенсация на реактивната енергия, стойностите на ***L*** и ***C*** трябва да бъдат такива, че да се изпълни условието за паралелен резонанс във веригата т.е.

$$\omega^2.L.C=1, \quad \text{или} \quad X_L=X_C;$$

Най-напред се пресмята необходимия импеданс за ограничаване на тока през избрания тип двойка светодиоди, а след това и стойността на съответният реактивен елемент включен последователно:

$$Z=U/2.I_{av},$$

Ако това е кондензатор, неговият капацитет трябва да бъде:

$$C = \frac{2.I_{av}}{\omega.U},\ F$$

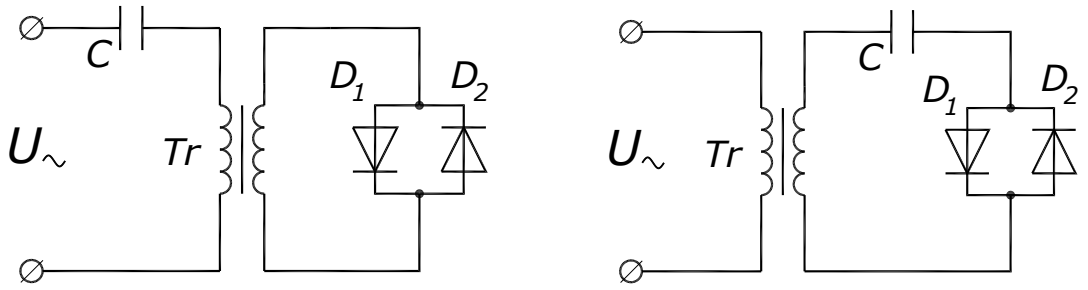
а съответната стойност на компенсиращата индуктивност:

$$L = \frac{1}{\omega C} = \frac{U}{\omega.2.I_{av}},\ H$$

По подобен начин може да се пресметне и вариант, ако ограничението на тока се реализира с индуктивност, а компенсиращия елемент е кондензатор.

Разгледаните дотук схемни решения не осигуряват галванично отделяне от мрежата. Друга възможност за променливотоково захранване на светодиоди е с галванично отделяне чрез използване на мрежов трансформатор. Това решение се прилага от фирмите, които произвеждат ЕПРА, като след трансформатора има изправител или AC/DC-преобразовател [2], [3], [4], [5]. Наличието на допълнителен изправител или AC/DC-преобразовател снижава коефициента на полезно действие на изделието и, поради наличието на допълнителни елементи, намалява неговата надеждност.

На базата на разгледаните по горе схемни решения тук се предлагат два варианта на схема без изправител или AC/DC-преобразовател, при които обикновен трансформатор в единият случай работи в режим на токов трансформатор, а в другият ограничението на тока зависи от включен във веригата кондензатор – фиг.3.



Фиг.3

На практика, за гарантиране на режим „стабилизация по ток”, в първия случай реактивното съпротивление на кондензатора трябва да бъде поне с един порядък по-голямо от индуктивността на трансформатора.

4. Анализ на предимствата и недостатъците

Част от най-съществените предимства и недостатъци на описаните схеми бяха разгледани при анализа на принципа на действие на съответния вариант. В обобщение на казаното като основни предимства могат да се изтъкнат следните:

1. Директно се използва захранващата мрежа;

2. Прости решения с минимален брой елементи;

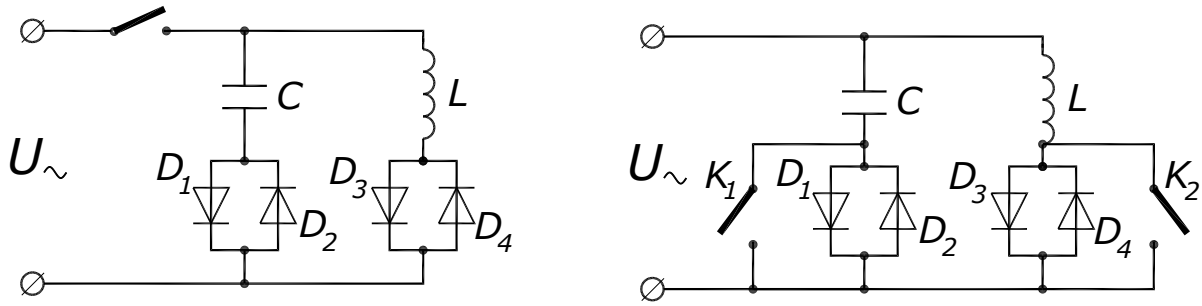
3. Повишена надеждност и к.п.д., поради липса на ЕПРА;

4. По-малка температурна зависимост на пасивните елементи (***L*** и ***C***), в сравнение с електронните елементи в *ЕПРА.*

Като недостатък може да се посочи това, че светодиодите се захранват с импулсен ток без филтър, а не с постоянен, в резултат на което честотата на светлинните импулси е ***100 Hz***.

5. Заключение

С предложените схемни решения за използване на светодиоди могат да се реализират евтини и прости за изпълнение варианти в случаите, когато не се поставят строги изисквания за високо качество на осветлението, а същевременно се изисква надеждност и малки разходи при експлоатацията. Възможни схеми за реализация са показани на фиг.4. Във всеки клон на веригата могат да се монтират по няколко двойки светодиоди последователно.



Фиг.4.

Идеята за използване на двойки антипаралелно включени диоди може да се приложи директно при съществуващите луминесцентни лампи, без каквито и да било изменения в основната схема. Двойката светодиоди (една или няколко) се включва последователно на компенсиращия кондензатор. По този начин ще се увеличи светлинният поток, а при повреда на луминесцентната лампа светодиодите ще осигурят резервно осветление.

Литература

[1] Иванов, З., (2008), ***Светлинни източници,*** София 2008, Авангард Прима, стр. 92-101

[2] *http://www.cree.com/led-components-and-modules*

[3]*www.tridonic.com.*

[4]*http:/www.gelighting.com/LightingWeb/na/solutions/technologies/ballasts-and-drivers/ge-lightech-led-drivers.jsp*

[5] *http://db.lightechinc.com/*

Автори: Йордан Шопов, доц. д-р, катедра „Електрически апарати”, Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: *shopov@tu-sofia.bg* ; Симона Петракиева, доц. д-р, катедра „Теоретична електротехника”, Факултет Автоматика, Технически Университет - София, E-mail address: *petrakievas-te@tu-sofia.bg*

Постъпила на: 02.09.2013 г. **Рецензент:** доц. д-р Вълчан Георгиев