



ISSN 1311-0829

**ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ
УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ
Том 69, книга 1, 2019**



**PROCEEDINGS OF TECHNICAL
UNIVERSITY OF SOFIA
Volume 69, Issue 1, 2019**

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. дтн Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. дтн Елена ШОЙКОВА

членове

проф. дтн Георги ПОПОВ

проф. дтн Иван КОРОБКО

проф. дфн Иван УЗУНОВ

проф. дтн Иван ЯЧЕВ

проф. дтн Кети ПЕЕВА

проф. дтн Ганчо БОЖИЛОВ

проф. дтн Евелина ПЕНЧЕВА

проф. д.и.н. Младен ВЕЛЕВ

проф. д-р Бончо БОНЕВ

проф. д-р Иво МАЛАКОВ

проф. д-р Огнян НАКОВ

секретар-организатор

инж. Мая СТОЙЧЕВА

EDITORIAL BOARD

Editor -in -Chief

Prof. D.Sc. Emil NIKOLOV

Editor -in -Vice -Chief

Prof. D.Sc. Elena SHOYKOVA

Editors

Prof. D.Sc. Georgi POPOV

Prof. D.Sc. Ivan KOROBKO

Prof. D.Sc. Ivan UZUNOV

Prof. D.Sc. Ivan YACHEV

Prof. D.Sc. Ketii PEEVA

Prof. D.Sc. Gantcho BOJILOV

Prof. D.Sc. Evelina PENCHEVA

Prof. D.Sc. Mladen VELEV

Prof. Ph.D. Boncho BONEV

Prof. Ph.D. Ivo MALAKOV

Prof. Ph.D. Ognyan NAKOV

Organizing Secretary

Eng. Maya STOYCHEVA

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

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



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

ISSN 1311-0829

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

форум

„ДНИ НА НАУКАТА НА ТУ-СОФИЯ“ Созопол'2018

X-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „БулЕФ 2018“

11 - 14 септември 2018 г., Созопол, България

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

Председател

проф. д-р Иван ЯЧЕВ

Зам. Председател

проф. д-р Валери МЛАДЕНОВ

Научен секретар

доц. д-р Николай МАТАНОВ

Членове

проф. д-р	Габриеле	КОМОДО
проф. д-р	Ламброс	ЕКОНОМОУ
проф. д-р	Даниел	НАНКОО
проф. д-р	Балинт	НЕМЕТ
проф. д-р	Христос	ПАВЛАТОС
проф. д-р	Педро Кортес	РОДРИГЕС
проф. д-р	Георге	СЕРИТАН
проф. д-р	Василики	ВИТА
проф. д-р	Владимир	ЛАЗАРОВ
проф. д-р	Захари	ИВАНОВ
проф. д-р	Илиана	МАРИНОВА
проф. д-р	Райна	ЦЕНЕВА
проф. д-р	Иван	ИВАНОВ
проф. д-р	Петър	НАКОВ
проф. д-р	Ангел	ЦОЛОВ
доц. д-р	Светлана	ЦВЕТКОВА
доц. д-р	Димитър	БОГДАНОВ
доц. д-р	Диляна	ГОСПОДИНОВА
доц. д-р	Вълчан	ГЕОРГИЕВ
доц. д-р	Захари	ЗАРКОВ
доц. д-р	Иван	КОСТОВ
доц. д-р	Валентин	МАТЕЕВ
доц. д-р	Иван	АНГЕЛОВ
доц. д-р	Пламен	РИЗОВ
доц. д-р	Димо	СТОИЛОВ
доц. д-р	Рад	СТАНЕВ
доц. д-р	Калинка	ТОДОРОВА
доц. д-р	Георги	ТОДОРОВ
доц. д-р	Кръстьо	ХИНОВ
доц. д-р	Ивайло	ДОЛАПЧИЕВ
доц. д-р	Ива	ПЕТРИНСКА

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Forum

„DAYS OF SCIENCE OF TU-SOFIA“ Sozopol'2018

Xth CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING “Bulef 2018”

September 11 - 14, 2018, Sozopol, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEE

Chair of PC

Prof.	DSc	Ivan	YATCHEV
-------	-----	------	---------

Dpt. Chair

Prof.	PhD	Valery	MLADENOV
-------	-----	--------	----------

Scientific Secretary

Assoc. Prof.	PhD	Nikolay	MATANOV
--------------	-----	---------	---------

Members of PC

Prof.	PhD	Gabriele	COMODI
Prof.	PhD	Lambros	EKONOMOU
Prof.	PhD	Daniel	NANKOO
Prof.	PhD	Bálint	NÉMETH
Prof.	PhD	Pavlatos	CHRISTOS
Prof.	PhD	Pedro	CORTÉS RODRÍGUEZ
Prof.	PhD	George	SERITAN
Prof.	PhD	Vasiliki	VITA
Prof.	PhD	Vladimir	LAZAROV
Prof.	PhD	Zahari	IVANOV
Prof.	DSc	Iliana	MARINOVA
Prof.	PhD	Raina	TZENEVA
Prof.	PhD	Ivan	IVANOV
Prof.	PhD	Peter	NAKOV
Prof.	PhD	Angel	TZOLOV
Assoc. Prof.	PhD	Svetlana	TZVETKOVA
Assoc. Prof.	PhD	Dimitar	BOGDANOV
Assoc. Prof.	PhD	Dilyana	GOSPODINOVA
Assoc. Prof.	PhD	Vulchan	GUEORGIEV
Assoc. Prof.	PhD	Zahari	ZARKOV
Assoc. Prof.	PhD	Ivan	KOSTOV
Assoc. Prof.	PhD	Valentin	MATEEV
Assoc. Prof.	PhD	Ivan	ANGELOV
Assoc. Prof.	PhD	Plamen	RIZOV
Assoc. Prof.	PhD	Dimo	STOILOV
Assoc. Prof.	PhD	Rad	STANEV
Assoc. Prof.	PhD	Kalinka	TODOROVA
Assoc. Prof.	PhD	Georgi	TODOROV
Assoc. Prof.	PhD	Krastyo	HINOV
Assoc. Prof.	PhD	Ivailo	DOLAPVHIEV
Assoc. Prof.	PhD	Iva	PETRINSKA

СЪДЪРЖАНИЕ том 69, книга 1 (2019)

1.	Калоян Бурванов.	11
	<i>Ограничаване нивата на токовете на късо съединение в електрическа мрежа високо напрежение чрез използване на високотемпературни проводници</i>	
2.	Калоян Бурванов.	21
	<i>Сравнителен анализ на математически модели за определяне мълниебезопасните зони на открити разпределителни уредби високо напрежение</i>	
3.	Валентин Тотев, Дженгиз Ибрам, Вълчан Георгиев, Пламен Ризов	31
	<i>Електрически автомобили - текущо състояние и тенденции</i>	
4.	Николай Василев, Марин Вълчев, Борис Тошев.	41
	<i>Адаптивно управление на уличното осветление в зависимост от обема на транспортния трафик и скоростта на движение на МПС</i>	
5.	Петър Стоев.	49
	<i>Оценка на остатъчния ресурс на димируеми класически осветители</i>	
6.	Божидар Гълъбов.	59
	<i>Нормиране на биодинамично осветление. актуални работни групи, норми и препоръки за проектиране на биодинамични осветителни уредби във Федерална Република Германия</i>	
7.	Божидар Гълъбов.	69
	<i>Влияние на възрастта и пола върху зрителните характеристики на човека при Human Centric Lighting</i>	
8.	Владислав Петров.	79
	<i>Имплементиране на симулационен модел на безсензорно векторно управление към цифров сигнален процесор</i>	
9.	Емил Рачев, Владислав Петров	87
	<i>Влияние на параметрите на двигателя и наблюдателя при безсензорно управление на синхронен двигател с постоянни магнити</i>	
10.	Калинка Тодорова.	93
	<i>Управлението на отпадъци от електрическо и електронно оборудване като част от прехода към кръгова икономика</i>	
11.	Захари Иванов, Ива Драганова-Златева, Владимир Шаламанов	101
	<i>Ограничаване на вредното влияние на електромагнитното поле</i>	
12.	Анна Георгиева, Светлана Цветкова.	111
	<i>Качество на електрическата енергия в електроснабдителна система, захранваща обособени консуматори</i>	
13.	Красимир Иванов, Николай Михайлов, Цветан Наумов	121
	<i>Влияние на зарядните станции за автомобили върху някои параметри на електрическата енергия</i>	
14.	Михо Михов, Ганчо Божилов.	129
	<i>FEEM анализ на каналното разсейване при променливотокови машини с наситени зъбни зони - I част</i>	

15.	Михо Михов, Ганчо Божилов.....	139
	<i>FEEM анализ на каналното разсейване при променливотокови машини с наситени зъбни зони - II част</i>	
16.	Ангел Петлешков.....	145
	<i>Методи за намагнитване на магнитно-технологични приспособления</i>	
17.	Иван Ангелов, Ангел Петлешков.....	153
	<i>Цифрова система за управление на магнитно-технологични приспособления</i>	
18.	Снежана Димитрова.....	159
	<i>Определяне капиталовите разходи за изграждане на кондензаторни уредби</i>	
19.	Бончо Димитров, Христо Попов, Рад Станев, Никола Николов, Димо Стоилов.....	167
	<i>Загуби в електроразпределителните мрежи с присъединени възобновяеми производители</i>	

CONTENTS volume 69, Issue 1 (2019)

1.	Kaloyan Burvanov	11
	<i>Limiting of the Short Circuit Current Levels in High Voltage Electrical Network Through the Use of High Temperature Conductors</i>	
2.	Kaloyan Burvanov	21
	<i>Comparative Analysis of Mathematical Models for Determination of Lightning Protection Areas for High Voltage Outdoor Switchyards</i>	
3.	Valentin Totev, Dzhengiz Ibram, Valchan Georgiev, Plamen Rizov	31
	<i>Electric Vehicles - Current State and Tendencies</i>	
4.	Nikolay Vassilev, Marin Valchev, Boris Toshev	41
	<i>Adaptive Street Lighting Control Depending on the Volume of Traffic and the Speed of the Vehicle</i>	
5.	Peter Stoev	49
	<i>Evaluation of the Remain Life of Discharge Lamps Dimmed by Autotransformer</i>	
6.	Bozhidar Galabov	59
	<i>Standardization of Biologically Effective Lighting. Research Groups, Standards and Recommendation for Designing of Biologically Effective Lighting Systems in Germany</i>	
7.	Bozhidar Galabov	69
	<i>Aging and Gender Effects on Visual Functions for Human Centric Lighting</i>	
8.	Vladislav Petrov	79
	<i>Microcontroller Implementation Based on a Simulation Model of Field Oriented Control</i>	
9.	Emil Rachev, Vladislav Petrov	87
	<i>Influence of Motor and Observer Parameters in a Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor</i>	
10.	Kalinka Todorova	93
	<i>Waste Management of Electrical and Electronic Equipment as Part of Transition to Circular Economy</i>	
11.	Zahari Ivanov, Iva Draganova -Zlateva, Vladimir Shalamanov	101
	<i>Defense from Detrimental Influence of Electromagnetic Field in Electric Equipment</i>	
12.	Anna Georgieva, Svetlana Tzvetkova	111
	<i>Quality of Electrical Energy in an Electrical Supply System, Supplying Separate Consumers</i>	
13.	Krasimir Ivanov, Nikolay Mihaylov, Tzvetan Naumov	121
	<i>About the Influence of Car-Charging Stations to Some Electrical Energy Parameters</i>	
14.	Miho Mihov, Gantcho Bojilov	129
	<i>FEMM analysis of the Slot Leakage on AC Electric Machines whit Saturated Teeth Zones - part one</i>	

15.	Miho Mihov, Gantcho Bojilov	139
	<i>FEMM Analysis of the Slot Leakage on AC Electric Machines whit Saturated Teeth Zones - part two</i>	
16.	Angel Petleshkov.....	145
	<i>Methods for Impulse Magnetization of Magnetic Technological Devices</i>	
17.	Ivan Angelov, Angel Petleshkov	153
	<i>Digital Control System of Magnetic Technological Devices</i>	
18.	Snezhana Dimitrova.....	159
	<i>Determination of Capital Expenses for Construction of Capacitor Banks</i>	
19.	Boncho Dimitrov, Hristo Popov, Rad Stanev, Nikola Nikolov, Dimo Stoilov.....	167
	<i>Losses in Electricity Distribution Networks with Renewable Producers</i>	

Author's Index - Volume 69, Issue 1

№	<i>author</i>	<i>article page</i>
1.	Angel Petleshkov	145, 153
2.	Anna Georgieva	111
3.	Boncho Dimitrov	167
4.	Boris Toshev	41
5.	Bozhidar Galabov	59, 69
6.	Dimo Stoilov	167
7.	Dzhengiz Ibram	31
8.	Emil Rachev	87
9.	Gantcho Bojilov	129, 139
10.	Hristo Popov	167
11.	Iva Draganova -Zlateva	101
12.	Ivan Angelov	153
13.	Kalinka Todorova	93
14.	Kaloyan Burvanov	11, 21
15.	Krasimir Ivanov	121
16.	Marin Valchev	41
17.	Miho Mihov	129, 139
18.	Nikola Nikolov	167
19.	Nikolay Mihaylov	121
20.	Nikolay Vassilev	41
21.	Peter Stoev	49
22.	Plamen Rizov	31
23.	Rad Stanev	167
24.	Snezhana Dimitrova	159
25.	Svetlana Tzvetkova	111
26.	Tzvetan Naumov	121
27.	Valchan Georgiev	31
28.	Valentin Totev	31
29.	Vladimir Shalamanov	101
30.	Vladislav Petrov	79, 87
31.	Zahari Ivanov	101

**PROCEEDINGS OF TECHNICAL
UNIVERSITY OF SOFIA
Volume 69 Issue 1 (2019)**

pages

174

articles

19

authors

31

ОГРАНИЧАВАНЕ НИВАТА НА ТОКОВЕТЕ НА КЪСО СЪЕДИНЕНИЕ В ЕЛЕКТРИЧЕСКА МРЕЖА ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ ПРОВОДНИЦИ

Калоян Бурванов

Резюме: В последните години в електрическите мрежи намират приложение високотемпературни проводници. В същото време нивата на токовете на късо съединение в мрежите високо напрежение постоянно нарастват. Това налага да се разгледа влиянието на високотемпературните проводници върху нивата на тока на късо съединение.

Ключови думи: високотемпературен проводник, ток на късо съединение.

LIMITING OF THE SHORT CIRCUIT CURRENT LEVELS IN HIGH VOLTAGE ELECTRICAL NETWORK THROUGH THE USE OF HIGH TEMPERATURE CONDUCTORS

Kaloyan Burvanov

Abstract: In recent years, high-temperature conductors have been used in electrical networks. At the same time, the levels of short-circuit currents in high voltage electrical networks are steadily increasing. This requires consideration of the influence of high-temperature conductors on the short-circuit current levels.

Keywords: high temperature conductor, short circuit current.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Високотемпературните проводници (ВТП) намират приложение както по света [9, 11-13, 15], така и у нас [5].

В същото време нивата на токовете на късо съединение (т.к.с.) в електрическите мрежи за високо напрежение (ВН) постоянно нарастват [3].

Наличието на тези два фактора и свързаните с това особености при планирането и експлоатацията на електрическите мрежи за ВН налага те да бъдат разгледани съвместно.

Нормативните изисквания за термичното влияние на т.к.с. върху фазните проводници на въздушни линии (ВЛ) над 1kV са дадени в чл.63 (3) на Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии (НУЕУЕЛ) [7]. Липсва изчислителен модел и метод, по които да бъдат проведени съответните изчисления. Това затруднява практическа приложимост на изискванията.

За целта, в разглежданията по-долу е възприето в изчисленията за термичната устойчивост на ВТП да се ползва изчислителния модел залегнал в БДС EN 60865-1 (IEC 60865) [2], с параметри на алуминиевата сплав съгласно IEC 62004 [17]. За сравнителен анализ със съществуващи комбинирани алуминиево-стоманени проводници се ползват междинните и крайни резултати от проучванията по темата, изложени в [4].

За изследване влиянието на ВТП върху нивата на т.к.с. в електрическата мрежа за ВН са ползвани каталожни данни на проводник тип ZTACIR- Ø19,04 [6, 16], използван у нас [5] и данни за алуминиево-стоманени голи проводници тип AC-185 и ACO-400 [1], използвани в мрежата 110kV на Р. България [4].

Импедансите с права, обратна и нулева последователност на ВЛ са определени за унифицираните корони на стоманорешетъчни стълбове болтова конструкция [6].

2. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ ПРОВОДНИЦИ В АДИАБАТЕН РЕЖИМ

В изследването е прието да се работи с високо температурни сплави на алуминия по стандарт IEC 62004 [17].

За термично устойчиви алуминиево-циркониеви сплави съгласно IEC 62004 [17] се препоръчват изчислителните стойности, дадени в табл.2.1, (колони 4÷7). За сравнение в колона 8 са дадени данните, съгласно БДС EN 60865-1 (IEC 60865) [2], при изчислителните предпоставки от [4].

Таблица 2.1

Описание	Означ.	Мярка	IEC 62004 [17]				IEC / EN [2]
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-
тип на материала	-	-	AT1	AT2	AT3	AT4	алуминий
плътност при 20 ⁰ C	<i>d</i>	$\frac{kg}{m^3}$	2703	2703	2703	2703	2700
допустима работна температура гарантираща 90%ITS*							
- 40 год.	θ_{b1}	°C	150	150	210	230	40 [4]
- 400 часа	θ_{b2}	°C	180	180	240	310	-
- 1 час	θ_e	°C	230	230	280	400	200
максимална стойност на спец. ел. съпротивление при 20 ⁰ C	ρ_{20}	<i>nΩ.m</i>	28,735	31,347	28,735	29,726	28,735
тем. коеф. на електрическо съпротивление	α_{20}	$\frac{1}{^0C}$	0,0040	0,0036	0,0040	0,0038	0,0040

*Съгласно IEC 62004 [17] всяка жичка от алуминиева сплав трябва да издържа 90% от първоначалното напрежение (ITS), след като е била нагрята при температура и с продължителност (1 час, 400 часа, 350400 часа) съгласно таблица 2.1.

Съгласно IEC 62004 [17] всички типове алуминиево-циркониеви сплави се използват при работни температури по-високи от тези на конвенционалните такива.

Термично устойчивите жички от алуминиево-циркониевите сплави имат означения, както следва:

- AT1 - термично-устойчива алуминиева сплав с максимална допустима работна температура от 150 °C;

- АТ2 - високоякостна, термично-устойчива алуминиева сплав с максимална допустима работна температура от 150 °С;
- АТ3 - супер термично-устойчива алуминиева сплав с максимална допустима работна температура от 210 °С;
- АТ4 - екстра термично-устойчива алуминиева сплав с максимална допустима работна температура от 230 °С;

За изследването на термичната устойчивост на ВТП се изхожда от опростяващите допускания в *т. 7.1* и *т. 7.2* на БДС EN 60865-1 (IEC 60865) [2] и материалните константи от таблица 2.1.

При изчисленията е прието да се работи само със сечението на алуминия/алуминиевата сплав, каквато е и препоръката на БДС EN 60865-1 (IEC 60865) [2].

Описание на използваните символни означения и тяхното значение са според БДС EN 60865-1 (IEC 60865) [2] и са валидни за настоящите разглеждания.

Допустимият ток на термична устойчивост се определя съгласно (2.1) [2, 4], както следва:

$$I_{th} = S \cdot K_{th} = S \cdot \frac{1}{\sqrt{T_{kr}}} \cdot \sqrt{\frac{k_{20} \cdot c \cdot d}{\alpha_{20}}} \cdot \ln \frac{1 + \alpha_{20} \cdot (\Theta_e - 20^0 C)}{1 + \alpha_{20} \cdot (\Theta_b - 20^0 C)} \quad (2.1)$$

$$K_{th} = \frac{I_{th}}{S_{Al}} \quad (2.2)$$

За така дефинираните параметри, при начална температура Θ_{bi} , крайна допустима температура Θ_e и при разчетно време $T_{kr} = 1,0s$ получената токова плътност K_{th} в режим на к.с. за отделните видове сплави е, както следва в табл.2.2:

Таблица 2.2

Описание	Означ.	Мярка	IEC 62004 [17]				IEC / EN [2]
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-
тип на материала	-	-	АТ1	АТ2	АТ3	АТ4	алуминий
допустимо термично прегряване при късо съединение $\Delta\Theta_f = \Theta_e - \Theta_{bi}$	$\Delta\Theta_1$ $\Delta\Theta_2$	°C °C	80 50	80 50	70 40	170 90	130
специфичен топлинен капацитет*	c	$\frac{J}{kg \cdot ^0C}$	909	909	909	909	910
минимална стойност на спец. ел. проводимост при 20°C	k_{20}	$\frac{1}{\Omega \cdot m}$	$34,8 \cdot 10^6$	$31,9 \cdot 10^6$	$34,8 \cdot 10^6$	$33,6 \cdot 10^6$	$34,8 \cdot 10^6$
изчислена токова плътност [2, 4]	$K_{th}(\Delta\Theta_1)$ $K_{th}(\Delta\Theta_2)$	A/mm ²	63,907 49,596	62,452 48,525	56,178 41,785	81,712 57,262	99,737

* Данните за специфичен топлинен капацитет на алуминиевата сплав са съгласно [10, 14].

Получената токова плътност K_{th} в режим на к.с. се характеризира с две стойности в зависимост от термичния режим на ВТП в предаварийния режим.

Още тук прави впечатление, че токовата плътност K_{th} в режим на к.с. за алуминиевите сплави значително се отличава от тази на чистия алуминий, което е предпоставка за понижена термична устойчивост на фазните проводници при еднакво сечение на тоководящата част.

За числена съпоставка, в табл.2.3, по-долу, са изложени данните за термична устойчивост на ВТП тип ZTACIR-Ø19,04 [6, 16] – изпълнен с алуминиева сплав АТ3 [17] и АТ4 [17], примерен ВТП-Ø27 изпълнен с алуминиева сплав АТ3 [17] и комбинирани алуминиево-стоменени проводници тип АС-185 и АСО-400 [1], при минимални времена за изключване на т.к.с. определени съгласно [4] ($T_{kr} = 1,0s$).

Таблица 2.3

Изчислителен . модел	IEC / EN [2]	IEC / EN [2]
тип на проводника	I_{th} , kA ($T_{kr}=1,00s$)	I_{th} , kA ($T_{kr}=0,36s$)
- 1 -	- 2 -	- 3 -
АС-185 ($C_S=5,26$)	18,052	30,087
ZTACIR-Ø19,04 ($AT3$, $S_{Al}=174,3mm^2$, $CS=4,28$)		
- $\Delta\theta_1=70^\circ C$	9,792	16,320
- $\Delta\theta_2=40^\circ C$	7,283	12,139
ВТП-Ø19,04 ($AT4$, $S_{Al}=174,3mm^2$, $CS=4,28$)		
- $\Delta\theta_1=170^\circ C$	14,242	23,737
- $\Delta\theta_2=90^\circ C$	9,981	16,635
АСО-400 ($CS=7,91$)	39,097	65,162
ВТП-Ø27 ($AT3$, $S_{Al}=360,0mm^2$)		
- $\Delta\theta_1=70^\circ C$	20,224	33,707
- $\Delta\theta_2=40^\circ C$	15,043	25,071

* Данните за ВТП са приети при хипотеза за работа при 100% товар в предаварийния режим

При анализа на получените в табл.2.3 резултати, съобразно приетите изчислителни предпоставки се оказва, че не е осигурена нужната термична устойчивост на фазните проводници на ВЛ 110kV в следните случаи:

- за електропроводи, изпълнени с ВТП тип ZTACIR-Ø19,04 (АТ3) [6, 16], работещи в предаварийния режим със 100% товар, присъединени във възли на електрическата мрежа 110kV с перспективни нива на т.к.с. над 16,32kA;
- за електропроводи, изпълнени с ВТП-Ø19,04 (АТ4, $S_{Al}=174,3mm^2$, $CS=4,28$), работещи в предаварийния режим със 100% товар, присъединени във възли на електрическата мрежа 110kV с перспективни нива на т.к.с. над 23,74kA;
- за електропроводи, изпълнени с ВТП-Ø27 (АТ3, $S_{Al}=360mm^2$), работещи в предаварийния режим със 100% товар, присъединени във възли на електрическата мрежа 110kV с перспективни нива на т.к.с. над 33,71kA.

Изложеното по-горе доказва възможността за понижаване на термичната устойчивост на фазните проводници на ВЛ за ВН при подмяната им с ВТП със сходно сечение. Факт, който следва да се отчита при планирането, проектирането и експлоатацията на електрическите мрежи за ВН.

Оценката за термичното натоварване на ВТП от протичащите т.к.с. следва да се изпълнява за всяко конкретно присъединение, съобразно изчислената перспективна стойност на тока на к.с. на шини в дадения възел и действителното време

за неговото изключване. При защита на електропровода със защиты със зоново действие, проверките следва да се изпълняват за всяка от зоните на действие на релейната защита.

Например, ако при така направените изчислителни предпоставки и $T_{kr}=0,36s$ за цялата дължина на ВЛ ВН по направлението п/ст Варна Запад – п/ст Балчик [5] сравним разчетните нива на т.к.с. [8] с допустимите от таблица 2.3 за два от разгледаните типове ВТП - ZTACIR-Ø19,04 (AT3, $S_{Al}=174,3mm^2$, $CS=4,28$) / ВТП-Ø19,04 (AT4, $S_{Al}=174,3mm^2$, $CS=4,28$), се получава следния резултат-табл.2.4:

Таблица 2.4

Възел	п/ст Варна Запад	п/ст Варна Изток	п/ст Златни Пясъци	п/ст Албена	п/ст Балчик
ток на еднофазно к.с., kA	16,002	12,103	6,727	6,817	8,283
ток на трифазно к.с., kA	26,255	20,924	10,241	8,943	10,457
ZTACIR-Ø19,04 (AT3)	не издържа	не издържа	издържа	издържа	издържа
ВТП-Ø19,04 (AT4)	не издържа	издържа	издържа	издържа	издържа

3. ИЗЧИСЛЯВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА ЗАМЕСТВАЩИТЕ СХЕМИ ЗА ВЛ 110KV

Изчисленията на параметрите на заместващите електрически схеми за ВЛ 110kV са проведени с наложилите се в практиката от последните години унифицирани корони на стоманорешетъчни стълбове болтова конструкция [6].

За една тройка проводници е прието стълбове 110kV с триъгълно разположение, с вертикално разстояние 3,5m и активна височина на базовия стълб $h_a=16,0m$. Височината до точката на окачване на м.з.в. е $h_{MЗВ}=23,5m$.

За две тройки проводници е прието стълбове 110kV с „бъчвообразно“ разположение, с вертикално разстояние 3,5m и активна височина на базовия стълб $h_a=16,0m$. Височината до точката на окачване на м.з.в. е $h_{MЗВ}=27,3m$.

При изчисленията е прието наличието на едно мълниезащитно въже (м.з.в.) с вградени оптични влакна (OPGW) тип ACS 66-5.6 [6], наложило се като едно от най-често употребяваните у нас, заземено на всеки стълб.

Изчислените импеданси с права, обратна и нулева последователност за ВЛ 110kV са дадени в табл.3.1, както следва:

Таблица 3.1

Тип на проводника	$z_1=z_2, \Omega/km$	$z_0, \Omega/km$
1x AC-185 ($C_S=5,26$)	0.160 + j 0.398	0.435 + j 1.254
2x AC-185 ($C_S=5,26$)	0.160 + j 0.396	0.422 + j 1.269
1x ZTACIR-Ø19,04 (AT3, $CS=4,28$)*	$\frac{0.158 + j 0.398}{0.202 + j 0.398}$	$\frac{0.433 + j 1.254}{0.478 + j 1.254}$
1x ACO-400 ($CS=7,91$)	0.074 + j 0.376	0.349 + j 1.231

* Данните за резистанса са приети при хипотеза за работа при 0% товар (20°C, в числител) и при 60% товар (90°C, в знаменател) на проводника.

4. ИЗСЛЕДВАНЕ РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА Т.К.С. В ЕЛЕКТРИЧЕСКА МРЕЖА 110kV С ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ ПРОВОДНИЦИ

Изчисленията са проведени за електрическа мрежа 110kV, избрана като такава с потенциално най-голяма необходимост и възможности за приложение на ВТП. Допустимите токови натоварвания в установен (предавариен) режим са показани в сравнителна табл.4.1, както следва:

Таблица 4.1

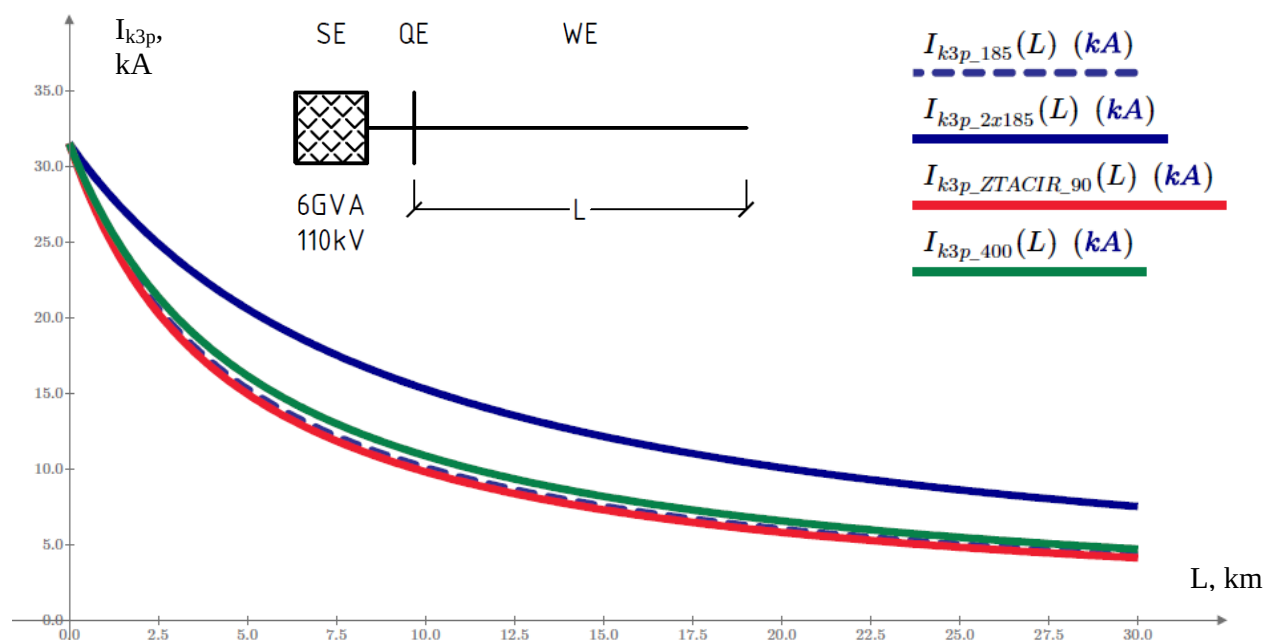
Тип на проводника	1x AC-185	2x AC-185	1x ZTACIR-Ø19,04	1x ACO-400
номинален ток, А	510	1020	906($\Delta\Theta_1=70^\circ\text{C}$)	825

За провеждане на изчисленията са разгледани два основни изчислителни модела.

Първият изчислителен модел (ИМ-1) разглежда големината на т.к.с. в края на ВЛ 110kV с едностранно (радиално) захранване от електрическа мрежа 110kV в зависимост от дължината на ВЛ.

Изследват се ВЛ 110kV, изпълнени с една (преди реконструкцията) и две (след реконструкция) тройки проводници тип AC-185, една (след реконструкция) тройка проводници тип ZTACIR-Ø19,04 и една (след реконструкция) тройка проводници тип ACO-400, обуславящи съизмерими преносни способности на ВЛ 110kV.

Резултатите от изследването са дадени в графичен вид на фиг.4.1.



Фиг.4.1. Зависимост на големината на тока на трифазно късо съединение в края на електропровода във функция от неговата дължина

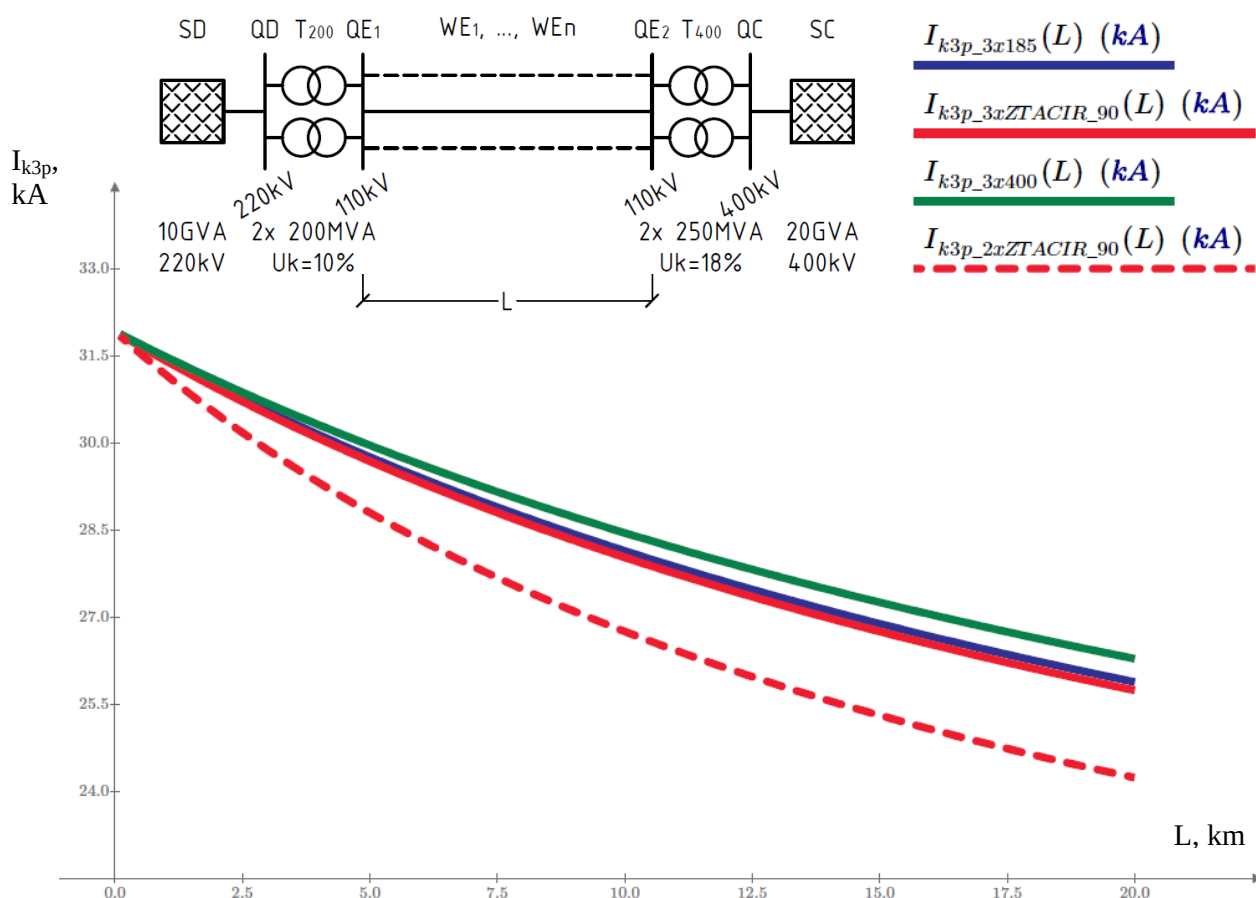
Както се вижда от графиката, т.к.с. в края на радиално захранен консуматор се определят от броя на паралелно присъединените към него електропроводни линии. Промяната на сечението и типа на проводника на дадена линия променя преносната й способност, но оказва слабо влияние на тока на к.с. в края на елек-

тропровода. От тук и основният извод, че при необходимост от увеличаване на преносната способност на ВЛ към радиално захранен консуматор следва да се пристъпва чрез подмяна на фазовите проводници на захранващата линия (посредством частична реконструкция с ВТП, без подмяна на стълбове или пълна реконструкция с подмяна на стълбове и фазни проводници), а не чрез изграждане на допълнителна връзка (сдвояване на ВЛ), освен ако същата не е необходима за удовлетворяване на други технически изисквания.

Вторият изчислителен модел (ИМ-2) разглежда изменението на т.к.с. в опорен възел 110kV с директна трансформация 400/110kV и връзката му с опорен възел 110kV с трансформация 220/110kV в зависимост от дължината и броя на свързващите ги електропроводни линии.

Изследването е проведено за енергиен коридор с три паралелни електропроводни линии изпълнени с по една тройка проводници тип АС-185, АСО-400 (преди преустройството на електрическа мрежа) и за две и три паралелни линии изпълнени с по една тройка проводници тип ZTACIR-Ø19,04 (след преустройството на електрическа мрежа), обуславящи съизмерими и по-големи преносни способности на енергийния коридор 110kV.

Резултатите от изследването са дадени в графичен вид на фиг.4.2.



Фиг.4.2. Зависимост на големината на тока на трифазно късо съединение в точка QE_2 във функция от неговата дължина и броя на паралелните електропроводи

Както се вижда от графиката, т.к.с. в опорните възли на електрическа мрежа зависят пряко от броя на паралелно присъединените към тях електропроводни линии. Промяната на сечението и типа на проводника на дадена линия променя преносната ѝ способност, но оказва слабо влияние на т.к.с. в края на електропровода. От тук и основният извод, че за случаите с налични три и повече паралелни връзки между опорни подстанции с висока стойност на т.к.с. трябва да се търси възможност за намаляване на техния брой посредством разкъсването на някои от тях в междинни възли от електрическата мрежа (секционирание, чрез надлъжно делене на мрежата [3]). При недостатъчна преносна способност на оставащите паралелни електропроводи е целесъобразно повишаване на преносната им способност посредством подмяна на фазни проводници за по-голям номинален ток (посредством частична реконструкция с ВТП, без подмяна на стълбове или пълна реконструкция с подмяна на стълбове и фазни проводници), а не чрез изграждане на паралелни линии, освен ако същите не са необходими за удовлетворяване на други технически изисквания.

Тук е мястото да се отбележат и основните недостатъците в случай на секционирание на електрическата мрежа, чрез надлъжно делене на мрежата, а именно: намаляването на сигурността на работа на ЕЕС поради отслабване на връзките между нейните отделни части; принудително разпределение на мощностите, което не винаги съответства на желаното икономично разпределение; промяна на местата на товарите в електрическата мрежа, което води до промяна на местата на разделните точки; липса на резерв на реактивна мощност.

5. АНАЛИЗИ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Извършеното проучване показва, че производителите на ВТП не посочват термична им устойчивост в случай на протичане т.к.с. При избора на конкретен ВТП следва да се изисква от конкретния производител посочване на издържания от предлагания проводник т.к.с. за единица време.

Термичната устойчивост, обусловена от протичането на т.к.с. за ВТП зависи от параметрите на използваната алуминиева сплав и най-вече от нейните допустими работни температури в отделните нормални и аварийни режими.

За случаите с намалена стойност на допустимото термично прегряване при к.с. за сметка на обуславяне повишена преносна способност на линията се понижава нейната термична устойчивост.

При прилагане на решения с ВТП задължително следва да се изпълнява проверка за термичното влияние на т.к.с. върху фазните проводници на въздушни линии (ВЛ) над 1kV, съгласно чл.63 (3) от НУЕУЕЛ [7], както по време на проектирането, така и в процеса на планиране развитието на електрическите мрежи ВН и периодично по време на тяхната експлоатация.

Оценката за термичното натоварване на ВТП от протичащите т.к.с. следва да се изпълнява за всяко конкретно присъединение, съобразно изчислената перспек-

тивна стойност на тока на к.с. на шини в дадения възел и действителното време за неговото изключване. При защита на електропровода със защита със зонаво действие, проверки следва да се изпълняват за всяка от зоните на действие на релейната защита.

При недостатъчна преносна способност на дадена ВЛ за ВН и висока стойност на т.к.с. в началния възел следва да се търси възможност за повишаване на преносната ѝ способност посредством подмяна на фазните проводници с такива за по-голям номинален ток (посредством частична реконструкция с ВТП, без подмяна на стълбове или пълна реконструкция с подмяна на стълбове и фазни проводници), а не чрез изграждане на втора тройка или нова паралелна линия, освен ако същата не е необходима за удовлетворяване на други технически изисквания.

За случаите с налични три и повече паралелни връзки между опорни подстанции с висока стойност на т.к.с. трябва да се търси възможност за намаляване на техния брой посредством разкъсването на някои от тях в междинни възли от електрическа мрежа (секционирание, чрез надлъжно делене на мрежата [3]). При недостатъчна преносна способност на оставащите паралелни електропроводи е целесъобразно повишаване на преносната им способност посредством подмяна на фазни проводници за по-голям номинален ток (посредством частична реконструкция с ВТП, без подмяна на стълбове или пълна реконструкция с подмяна на стълбове и фазни проводници), а не чрез изграждане на паралелни линии, освен ако същите не са необходими за удовлетворяване на други технически изисквания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС 1133:1989 Проводници неизолирани алуминиеви и алуминиевостоманени.
- [2] БДС EN 60865-1:2012 (IEC 60865-1:2011) Токове на късо съединение. Изчисляване на въздействията. Част 1: Определения и методи за изчисляване (Short-circuit currents Calculation of effects Part 1: Definitions and calculation methods).
- [3] Бурванов К. И., Върху координацията на токовете на късо съединение с параметрите на електроенергийните обекти и съоръжения, ЕНЕРГЕТИКА, 2017,5: р. 41-51.
- [4] Бурванов К. И., Изследване термичната устойчивост на алуминиевостоманени проводници при къси съединения в електрически мрежи за високо напрежение, Годишник на Технически Университет - София, 2018,Том 68, книга 1: р. 39-48.
- [5] Влахов М., Повишаване на преносната способност на пръстен 110kV (Варна-Каварна-Добруджа), след подмяната на съществуващите проводници АС-185 на част от електропроводите с високотемпературни, с малък провес, ЕНЕРГЕТИКА, 2012,5: р. 16-23.

- [6] Захариев В. Т., Проектиране на механична част на въздушни електропроводни линии за напрежение 110 kV, издателска къща Св.Иван Рилски, 2017.
- [7] НАРЕДБА №3/2004г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.
- [8] Проектна документация.
- [9] Bodner J.,M. Höfer,M. Laußegger,G. Stampfer,H. Strobl, H. Wörle, Use of high thermal limit conductors in the replacement of 220 kV overhead lines in the Tirolean Alps, CIGRÉ 2012 : B2-103: p. 1-8.
- [10] CIGRE WG 22.12 Brochure 207: Thermal behaviour of overhead conductors. 2002. p. 1-40.
- [11] CIGRE WG B2.12 Brochure 244: Conductors for the uprating of overhead lines. 2004. p. 1-47.
- [12] CIGRE WG B2 Brochure 331: Considerations relating to the use of high temperature conductors. 2007. p. 1-22.
- [13] CIGRE WG B2.26 Brochure 426: Guide for Qualifying High Temperature Conductors for Use on Overhead Transmission Lines. 2010. p. 1-44.
- [14] CIGRE WG B2.42 Brochure 601: Guide for thermal rating calculations of overhead lines. 2014. p. 1-93.
- [15] CIGRE WG B2.48 Brochure 695: Experience with the mechanical performance of non-conventional conductors. 2017. p. 1-81.
- [16] Deangeli prodotti, ZTACIR-Φ19,04 technical data.
- [17] IEC 62004:2007 Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor.

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

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: гл. ас. д-р Никола Николов

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ МЪЛНИЕЗАЩИТНИТЕ ЗОНИ НА ОТКРИТИ РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ УРЕДБИ ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ

Калоян Бурванов

Резюме: В статията са изследвани различни изчислителни модели за определяне мълниезащитните зони на открити разпределителни уредби високо напрежение с единичен прътов мълниеприемник с височина до 30m. Въз основа на изчисления е извършен анализ и са сравнени изчислителните резултати на отделните модели в диапазона на стандартни за нашата страна височини на защитаващия и защитаваания обекти.

Ключови думи: мълниезащита на открити разпределителни уредби;

COMPARATIVE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINATION OF LIGHTNING PROTECTION AREAS FOR HIGH VOLTAGE OUTDOOR SWITCHYARDS

Kaloyan Burvanov

Abstract: In current publication various mathematical models for determination of lightning protection areas for high voltage outdoor switchyards using a single lightning rod with high up to 30m has been explored. Based on calculations, an analysis was carried out, comparing the calculation results of the individual models in the range of standard for our country heights of the defensive and protected objects.

Keywords: lightning protection for high voltage outdoor switchyards;

1. ВЪВЕДЕНИЕ

За защита на открити разпределителни уредби (ОРУ) високо напрежение (ВН) от преки попадения на мълнии в Наредба №3 за устройство на електрическите уредби и електропроводните линии (НУЕУЕЛ) [7] и разясненията към нея [6] се изисква монтиране на прътови мълниеприемници от конвенционален тип. В тях липсва точна дефиниция за нормираното минимално нивото на защита P , което трябва да бъде постигнато, както и математическия модел или указания за неговото постигане.

Това поставя под въпрос техническите способности за удовлетворяване на нормативните изисквания, както и критериите за оценка и приемане на подобен тип инсталации в редовна експлоатация.

Единственият, действащ нормативен документ у нас [8] и предшестващите го [9-11] за определяне минимално нивото на защита **Р** и математически модели за неговото постигане с **чл.2 ал.1** изключва приложението му върху ОРУ за ВН.

В световната практика съществуват редица модели за мълниезащита на ОРУ за ВН. Най-широко разпространение в Европа са намерили изчислителните модели, дадени в [1, 2, 5, 12].

Това налага необходимостта от анализ на наличните модели с оглед намиране на най-подходящ и технико-икономически обоснован такъв за удовлетворяване на действащите нормативни изисквания в [6, 7].

2. ИЗБОР НА МОДЕЛИ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА СРАВНИТЕЛНИЯ АНАЛИЗ

В исторически план, за защита от преки попадения на мълнии на ОРУ за ВН, у нас първоначално е възприет моделът разработен от А. А. Акопян. Той е получен на база обширни лабораторни изследвания в периода 1936÷1940г. и внедрен в нормативната база на руско говорещите страни. Същият се налага като основен у нас и е залегнал във ведомствените документи за проектиране защитата от преки попадения на мълнии на ОРУ за ВН [5] до 1999г., за което говорят и учебните пособия и материали до този момент. С разпада на ведомствените организации, промяната на нормативната база от началото на 90^{те} години на миналия век и възстановяването на частната инициатива, отпадна и задължителния характер на възприетите ведомствените документи. С въвеждането в действие на хармонизирания документ БДС HD 637:S1 [3] и последвалата го замяна с БДС EN 61936-1:2010/A1:2014 [1] в нормативната база бе допуснато прилагането на нов за нашата страна изчислителен модел основан на германски изследвания и норми [6].

По отношение на гражданското строителство първите норми за защита от преки попадения на мълнии у нас са въведени като отделен документ през 1972г. [11], в последствие неколkokратно са заменени с нови [9, 10], а към момента - с действащата НАРЕДБА № 4 / 2010 г. [8].

Следва да се отбележи, че въведеният през 1972 г. с нормативен документ изчислителен модел [11] съвпада с ведомствените документи за проектиране защитата от преки попадения на мълнии на ОРУ за ВН [5] и [12]. В последствие, с оглед валидирането му за по голяма височина (до 150m), дефиниране на различни нива на защита **Р** в зависимост от вида на защитавания обект и подобряване на електромагнитната съвместимост моделът е модифициран в две разновидности (А и Б), залегнали в действащата към момента НАРЕДБА № 4 / 2010 г. [8] - при проектиране по критерии за категория на мълниезащита. В същата наредба са имплементирани и моделите на БДС EN 62305:2011 [2] – при проектиране по критерия ниво на мълниезащита.

В световната практика съществуват и други, по-прецизни методи за оразмеряване, основани на данни за мълниеносната дейност в района на проектирания обект и големината на тока на мълнията [13]. Предвид липсата на актуални дан-

ни за тези показатели и усложнената изчислителна процедура по оразмеряване, същите не са намерили приложение у нас.

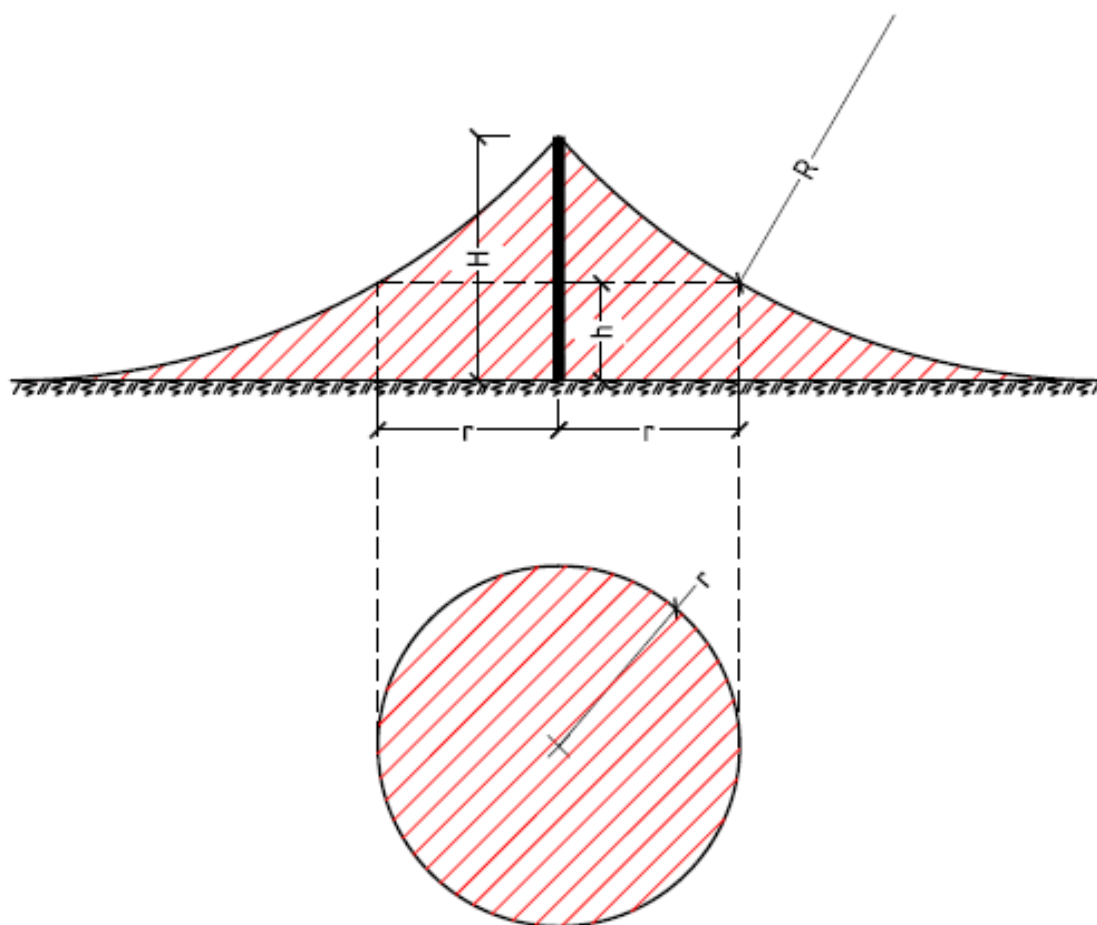
Въз основа на описаните по-горе нормативни документи и наложили се в нашата страна практики за защита от преки попадения на мълнии са избрани моделите за провеждането на сравнителния анализ, дадени в табл.2.1.

При определянето на подходящите изчислителни модели е търсена сходимост между техните минимални нива на защита **P** с цел максимално приравняване на изчислителните условия за надеждност на използваните модели.

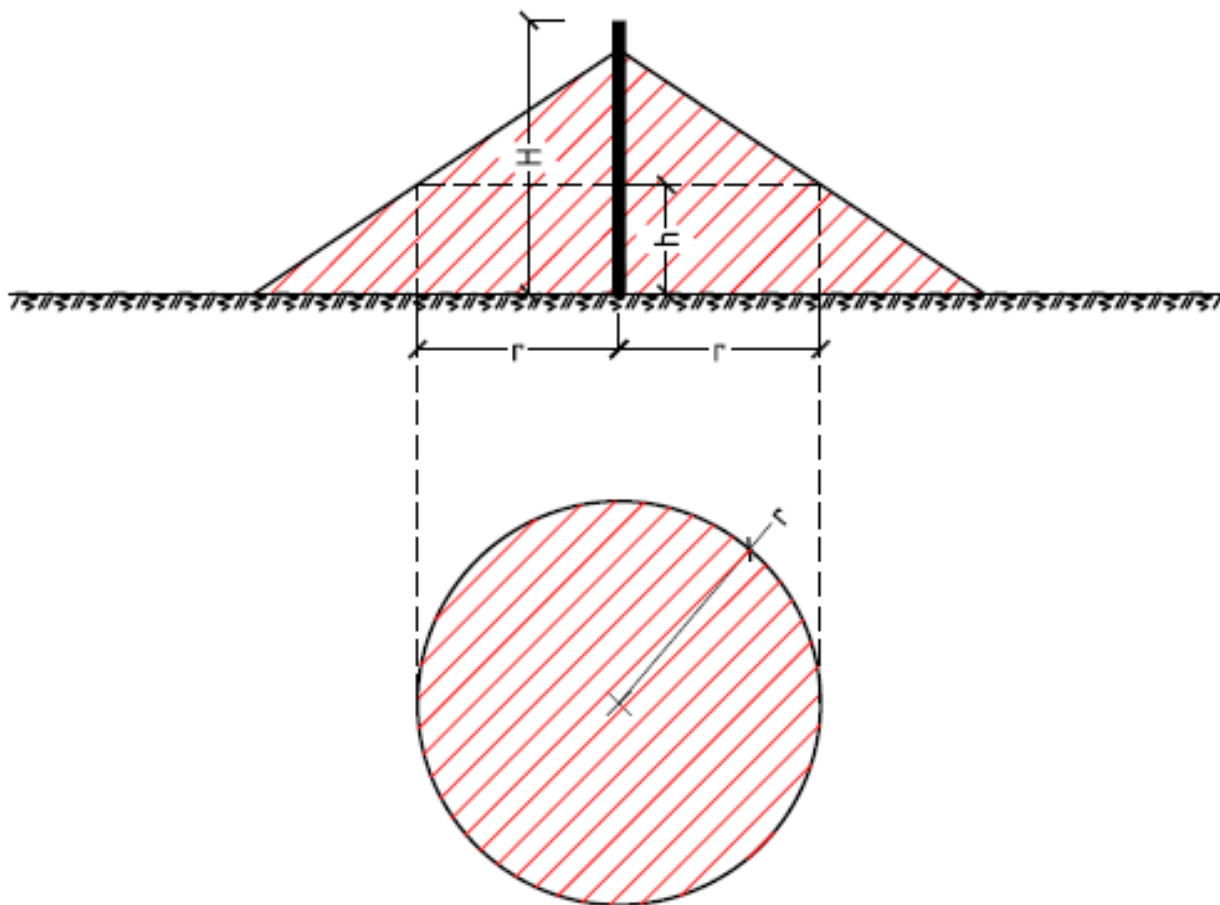
Таблица 2.1

Изчислителен модел	Референтен документ	Ниво на защитата, P
ИМ-1	[1] БДС EN 61936-1:2010/A1:2014	$\geq 0,90$ [4]
ИМ-2	[12] РД 34.21.121-74	$\geq 0,99 \div 0,999$
ИМ-3А	[8] НАРЕДБА № 4 / 2010 г.	$\geq 0,995$
ИМ-3Б		$\geq 0,95$
ИМ-4 (R=45m)	[2] БДС EN 62305:2011 метод на въртящата се сфера	$> 0,80 \div 0,95$ [8]
ИМ-4 (R=60m)		$\leq 0,80$ [8]

3. ГРАФИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ ИЗЧИСЛИТЕЛНИ МОДЕЛИ



Фиг.3.1. Защищавана зона от единичен прътов мълниеприемник за изчислителни модели ИМ-1, ИМ-2, ИМ-4(45m) и ИМ-4(60m)



Фиг.3.2. *Защитавана зона от единичен прътов мълниеприемник за изчислителни модели ИМ-3А и ИМ-3Б*

където:

- H, m – височина на мълниеприемника;
- R, m – радиус на фиктивната търкаляща се сфера;
- h, m – височина на защитавания обект;
- r, m – радиус на мълниезащита на височина h ;

4. МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ ИЗЧИСЛИТЕЛНИ МОДЕЛИ

За изчислителните модели ИМ-1, ИМ-4($R=45m$) и ИМ-4($R=60m$), съобразно показания на фиг.3.1 геометричен модел, след тригонометрични преобразувания може да бъде изведена следната зависимост:

$$r_i = \sqrt{2.R_i.H - H^2} - \sqrt{2.R_i.h - h^2}, \quad \text{при } H \leq R. \quad (4.1)$$

където с i е означен индексът на съответния изчислителен модел.

Ако приемем $R_1=3.H$ [1], то след заместване в (4.1) за изчислителен модел ИМ-1 се получава:

$$r_1 = \sqrt{5.H} - \sqrt{6.H.h - h^2}, \quad \text{при } H \leq 25\text{m}. \quad (4.2)$$

За изчислителен модел ИМ-2 съгласно специализираната литература [5, 12] се ползва зависимостта:

$$r_2 = \frac{(H-h).1,6}{1 + \frac{h}{H}} \cdot p, \quad (4.3)$$

където:

$$p = 1,0 \quad \text{при } H \leq 30\text{m};$$

$$p = \sqrt{\frac{30}{H}} = \frac{5,5}{\sqrt{H}} \quad \text{при } 30\text{m} < H \leq 60\text{m}.$$

За изчислителен модел ИМ-3А, показан на фиг.3.2, съгласно [8] се ползва зависимостта:

$$r_{3A} = (1,1 - 0,002.H) \cdot \left(H - \frac{h}{0,85} \right), \quad \text{при } H \leq 150\text{m}. \quad (4.4)$$

За изчислителен модел ИМ-3Б, показан на фиг.3.2, съгласно [8] се ползва зависимостта:

$$r_{3B} = 1,5 \cdot \left(H - \frac{h}{0,92} \right), \quad \text{при } H \leq 150\text{m}. \quad (4.5)$$

За изчислителни модели ИМ-4($R=45\text{m}$) и ИМ-4($R=60\text{m}$) зависимостта (4.1) приема вида:

$$r_4(R_i) = \sqrt{2.R_i.H - H^2} - \sqrt{2.R_i.h - h^2}, \quad \text{при } H \leq R. \quad (4.6)$$

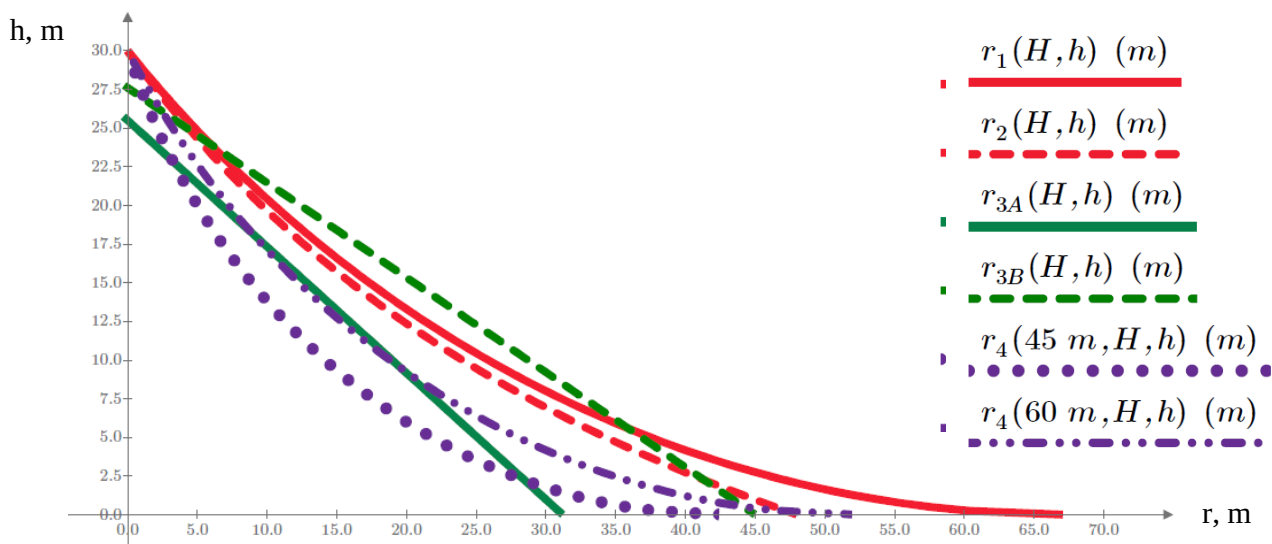
5. ГРАФИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

За графично представяне на резултатите в единна координатна система са построени графиките за $r_i = f(H, h)$ по уравнения (4.2)÷(4.5) и $r_i = f(R_i, H, h)$ за $R=45\text{m}$ и $R=60\text{m}$ по уравнение (4.6).

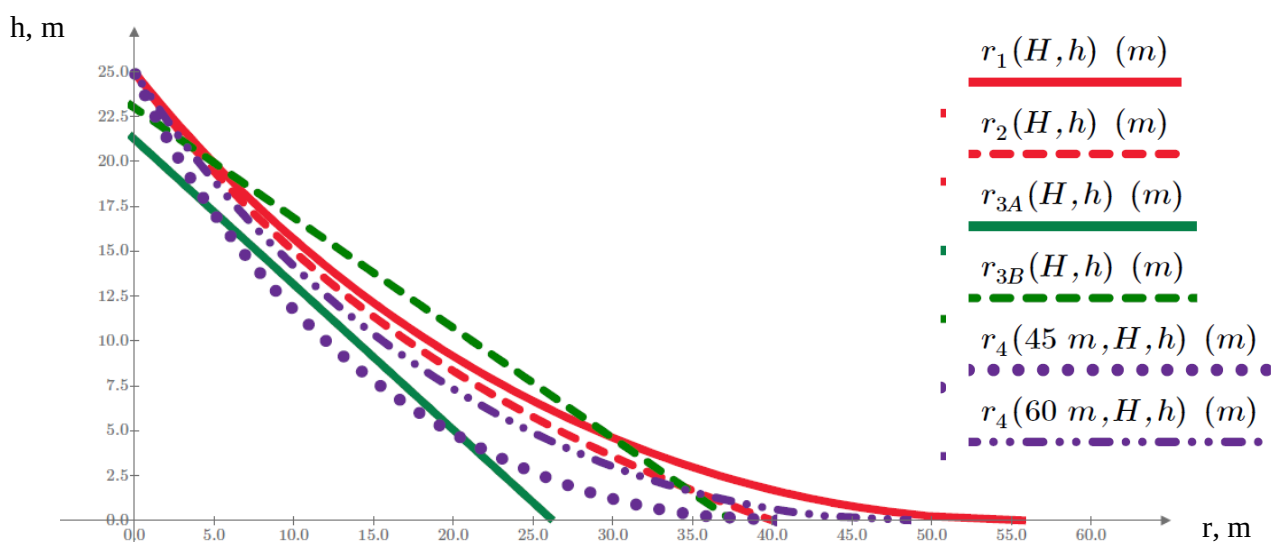
За височина на единичния прътов мълниеприемник при изследването са приети височини $H=30, 25$ и 20m .

Височината на защитаваия обект е приета в интервала $h=0 \div H$ със стъпка $0,25\text{m}$.

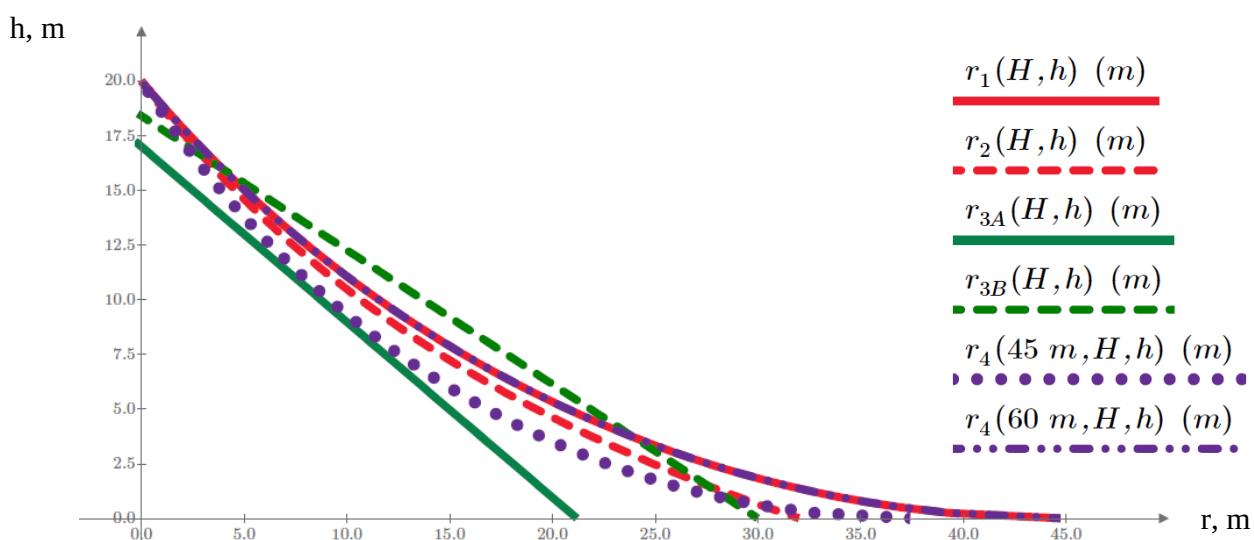
Зависимостите са показани на фиг.5.1÷фиг.5.3, като по абсцисата е изобразен радиусът на мълниезащита на защитаваия обект r_i , а по ординатата височина на защитаваия обект h .



Фиг.5.1. Зависимост $r_i=f(h)$ на единичен прътов мълниеприемник с $H=30\text{m}$



Фиг.5.2. Зависимост $r_i=f(h)$ на единичен прътов мълниеприемник с $H=25\text{m}$



Фиг.5.3. Зависимост $r_i=f(h)$ на единичен прътов мълниеприемник с $H=20\text{m}$

6. ТАБЛИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

За целите на анализа, в табличен вид, са представени резултатите от изчислените стойности за $r_i = f(H, h)$ по уравнения (4.2)÷(4.5) и $r_i = f(R_i, H, h)$ за $R=45\text{m}$ и $R=60\text{m}$ по уравнение (4.6).

За височина на единичния прътов мълниеприемник при изследването са приети височини $H=30, 25$ и 20m .

Височината на защитаваия обект е приета $h= 0,25.H; 0,50.H$ и $0,75.H$.

С помощта на (6.1) е изчислено процентното отклонение в размера на радиуса на мълниезащита на защитаваия обект r_i , като за база за сравнение е приет изчислителен модел ИМ-2 с $P \geq 0,99$ (r_2).

$$\%_i = \frac{r_i - r_2}{r_2} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Таблица 6.1

H=30m						
h	r₁	r₂	r_{3A}	r_{3B}	r₄ (45m)	r₄ (60m)
7.50m	-	28.80m	22.02m	32.77m	17.55m	22.91m
	-	0.0%	-23.5%	13.8%	-39.1%	-20.4%
15.00m	-	16.00m	12.85m	20.54m	8.89m	12.28m
	-	0.0%	-19.7%	28.4%	-44.5%	-23.3%
22.50m	-	6.86m	3.67m	8.32m	3.46m	5.12m
	-	0.0%	-46.5%	21.3%	-49.6%	-25.3%

Таблица 6.2

H=25m						
h	r₁	r₂	r_{3A}	r_{3B}	r₄ (45m)	r₄ (60m)
6.25m	25.93m	24.00m	18.53m	27.31m	17.43m	22.07m
	8.0%	0.0%	-22.8%	13.8%	-27.4%	-8.0%
12.50m	14.44m	13.33m	10.81m	17.12m	9.19m	12.08m
	8.3%	0.0%	-18.9%	28.4%	-31.1%	-9.4%
18.75m	6.29m	5.71m	3.09m	6.93m	3.76m	5.16m
	10.1%	0.0%	-46.0%	21.3%	-34.2%	-9.6%

Таблица 6.3

H=20m						
h	r₁	r₂	r_{3A}	r_{3B}	r₄ (45m)	r₄ (60m)
5.00m	20.74m	19.20m	14.96m	21.85m	16.80m	20.74m
	8.0%	0.0%	-22.1%	13.8%	-12.5%	8.0%
10.00m	11.56m	10.67m	8.73m	13.70m	9.13m	11.56m
	8.3%	0.0%	-18.2%	28.4%	-14.4%	8.3%
15.00m	5.04m	4.57m	2.49m	5.54m	3.88m	5.04m
	10.1%	0.0%	-45.4%	21.3%	-15.2%	10.1%

7. АНАЛИЗИ НА РЕЗУЛТАТИТЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В действителност, обезпечаването на 100%^{на} мълниезащита на наземните обекти в повечето случаи е принципно невъзможно. За това следва да се търси оптималното решение за свеждане на вероятността за аварии, повреди или срыв в защитащите обекти до приемлив минимум. При това разходите за осигуряване на нужната мълниезащита следва да са обвързани с възможните рискове. Заедно с това следва да се има предвид, че себестойността на системите за мълниезащита с $P \geq 0,99$ може да бъде с порядък по-висока от тази с $P \geq 0,90$ (случаи, в които се налага разполагането на отделно стоящи мачти поради липсата или твърде голямото разстояние между наличните в ОРУ портални конструкции).

Коректността на използваните методи за определяне на защитата от преки попадения на мълнии на ОРУ за ВН не може да бъде доказана, за това получените в лабораторни условия зависимости имат до някаква степен условен характер. Надеждността на разработените в лабораторни условия зависимости, изложени основно в изчислителни модели ИМ-1 и ИМ-2 са потвърдени с дългогодишния експлоатационен опит при използването им за защитата на ОРУ за ВН и това позволява с увереност да бъдат прилагани.

В действащите нормативни документи на Р. България за защита от преки попадения на мълнии на ОРУ за ВН посредством прътови мълниеприемници от конвенционален тип липсва, както ясна дефиниция за нормираното минимално ниво на защита P , което трябва да бъде постигнато, така и математически модел или ръководящи указания за неговото постигане. Това дава възможност за прилагането на неадекватни решения в тази област, като лишава възлагащите и контролни органи от възможност за качествена оценка при приемане на подобен тип инсталации в редовна експлоатация.

Последното лесно може да бъде доказано като се сравнят приложимите модели (фиг.5.1÷фиг.5.3). Очевидно, че резултатите от изчисляването на r_i на единичен прътов мълниеотвод по два различни изчислителни модела може да се отличава с повече от 10m и то при еднакво ниво на защита P .

На база разгледаните в настоящия анализ изчислителни модели може да се заключи следното:

- Методите с въртящата се фиктивна сфера (ИМ-1, ИМ-4) дават най-широки възможности за изследване защитата от преки попадения на мълнии. В стандартите [1, 2] не са указани числени методи за аналитично определяне на защитащата зона, което затруднява тяхното приложение, особено при отчитане на комбинирано въздействие на повече от два прътови мълниеприемника. Ограниченият набор от специализирани за целта компютърни програми допълнително затруднява тяхното прилагане;
- Методът ИМ-2 е изведен въз основа на обширни лабораторни изследвания през 40^{те} години на миналия век и е с доказана практическа приложимост и дългогодишния експлоатационен опит, включително и на територията на нашата страна;

- При сравнение между ИМ-1 и ИМ-2, се оказва, че и двата метода дават много близки резултати по отношение на защитаваната зона при еднакви изчислителни условия – **под 10% разлика** при височина на защитавания обект в диапазона **$h=0,25.H \div H$** . В случаите на **$h \leq 0,25.H$** методът ИМ-1 дава разлика спрямо ИМ-2 **по-голяма от 10%**. С нарастване на височината на защитавания обект разликата постепенно намалява до **0% (при $H=h$)**. Методът ИМ-2 дава по-консервативни резултати (в полза на сигурност);
- Съществен недостатък на метод ИМ-1 е неговата приложимост за височини на мълниеотвода до **25m**. За по-големи височини в приложимият стандарт [1] е предписано да се изпълни корекция в модела, без да е указано как практически се изпълнява това условие. В същия е разгледан случай на комбинирано въздействие на до два прътови мълниеприемника с еднаква височина. При комбинирано въздействие на повече мълниеприемници, както и между такива с различни височини липсват нужните указания за оразмеряване;
- При метода ИМ-3А, поради линейния характер на зависимостта за $r_i = f(H, h)$ в сравнение ИМ-2, за височини на защитавания обект **$h=0,25.H \div 0,75.H$** прилагането му води до намаляване на защитаваната зона с **18÷46%**. Това налага допълнителен монтаж на прътови мълниеприемници и мълниеприемни мачти;
- При метода ИМ-3Б, поради линейния характер на зависимостта за $r_i = f(H, h)$ в сравнение ИМ-2, за височини на защитавания обект **$h=0,25.H \div 0,75.H$** прилагането му води до увеличаване на защитаваната зона с **14÷28%**. В този случай намалената икономическа тежест за обекта вследствие приложението на метода трудно би обосновавала повишаването на риска от попадения на мълнии в обхвата на ОРУ за ВН и свързаните с това последствия;
- За разлика от методи ИМ-1 и ИМ-2, методът ИМ-4 се основава на фиксирана големина на радиуса на фиктивна сфера **R**, независеща от височината на мълниеприемника **H**. По тази причина изчислителните резултати се доближават до тези на ИМ-1 и ИМ-2 за случаите, в които **R** заема стойности близки до **3.H**. При **R=3.H** моделът напълно съвпада с ИМ-1;
- Следва да се отбележи, че моделите от групата ИМ-4 (основани на БДС EN 62305:2011 [2]) налагат значително по строги изисквания от останалите модели, особено за случаите на **$H \geq 25m$** . С увеличаване на височината на мълниеприемника **H** защитаваната зона намалява чувствително, въпреки по-ниските нива на защита **P**, декларирани в [8];
- При височина на мълниеприемника **$15m \leq H < 20m$** ИМ-4(R=60m) дава резултати с по-ниска осигуреност спрямо ИМ-1 и 2, поради което е препоръчително защитата от преки попадения на мълнии да се реализира чрез прилагането на ИМ-4(R=45m).

- В допълнение на настоящия анализ е необходимо да се синтезират съответните числени изчислителни модели и да се извърши сравнителен анализ на отделните методи при комбинирано въздействие на два и повече прътови мълниеприемника, на база, на които да се оцени най-подходящия метод за прилагане при защита от преки попадения на мълнии на ОРУ ВН посредством прътови мълниеприемници.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 61936-1:2010/A1:2014 (IEC 61936-1:2010/A1:2014) Електрически инсталации за променливо напрежение над 1 kV. Част 1: Общи правила (Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules).
- [2] БДС EN 62305:2011 (IEC 62305:2010, с промени) Мълниезащита (Protection against lightning).
- [3] БДС HD 637 S1:2004 (HD 637 S1:1999) Силови уредби превишаващи 1 kV променливо напрежение (Power installations exceeding 1 kV a.c.).
- [4] Зубов К. Н., Математическая модель и программа для расчета зон защиты от прямых ударов молнии, NovaInfoRu - Технические науки, 2010,2: р. 5-15.
- [5] Материали, записки и публикации от работата на НИППИЕС "Енергопроект".
- [6] Министерство на Енергетиката, становище с изх. № Е-26-Е-308/03.08.2016г.
- [7] НАРЕДБА №3/2004г. за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии.
- [8] НАРЕДБА №4/2010 г. за мълниезащитата на сгради, външни съоръжения и открити пространства.
- [9] НАРЕДБА №8/2004г. за мълниезащитата на сгради, външни съоръжения и открити пространства.
- [10] Норми за проектиране на мълниезащитата на сгради и външни съоръжения, 1987г.
- [11] Норми и правила за проектиране, изпълнение и приемане в експлоатация на гръмоотводни инсталации за сгради и съоръжения, 1972г.
- [12] РД 34.21.121-74 Руководящие указания по расчету зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов.
- [13] IEEE Std 998-2012 (Revision of IEEE Std 998-1996) IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations.

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

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: гл. ас. д-р Никола Николов

ЕЛЕКТРИЧЕСКИ АВТОМОБИЛИ - ТЕКУЩО СЪСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ

Валентин Тотев, Дженгиз Ибрам, Вълчан Георгиев, Пламен Ризов

Резюме: Разгледано е текущото състояние на техническите решения в електромобилите. Вниманието е съсредоточено върху серийно произвежданите модели и техните възможности. Специално са търсени и представени реалните технически решения, които често са погрешни, поне що се отнася до масовото съзнание. Специално внимание е обърнато на електрическото задвижване, батерията и нейното зареждане – включително от гледна точка на това – какъв товар се явява тя за енергийната система.

Ключови думи: електромобили

ELECTRIC VEHICLES - CURRENT STATE AND TENDENCIES

Valentin Totev, Dzhengiz Ibram, Valchan Georgiev, Plamen Rizov

Abstract: The current state and the technical decisions in electric vehicles are discussed in the paper. The paper is concentrated on the models that are currently presented on the market decision and real performance of the vehicles are presented. The attention is payed to electric drive and battery of the vehicle including the energy balance.

Keywords: electric vehicles

1. INTRODUCTION

Electric vehicles are undeniably a part of our daily life. Their history can be traced back to 19th century, when first electric locomotives and more interesting first electric cars were brought to light. Specifically electric cars were somewhat forgotten until recent decades. One of the major reasons they resurfaced is present need of conserving the environment. Currently electric cars are still somewhat a luxury, but surely in near future they will be available for the masses.

While we say electric cars, it is necessary to differentiate that there are three types of electric cars, which are hybrid electric car, plug-in electric and all-electric car [34].

Many manufacturers are currently producing and developing electric vehicles. Below are shown figures, which respectively present annual sales of electric vehicles and expected tendency for near future [29, 30].

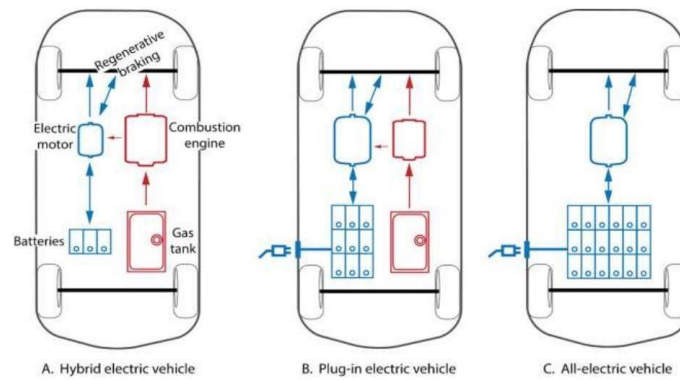


Figure 1. Types of electric cars [34]

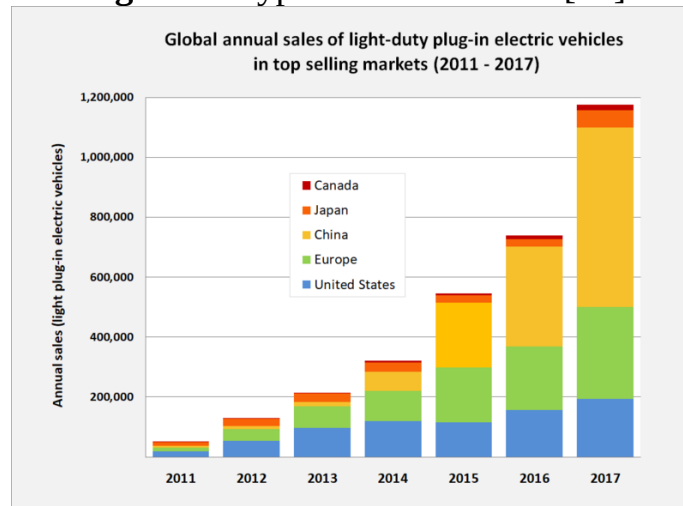


Figure 2. Annual sales (2011 - 2017)

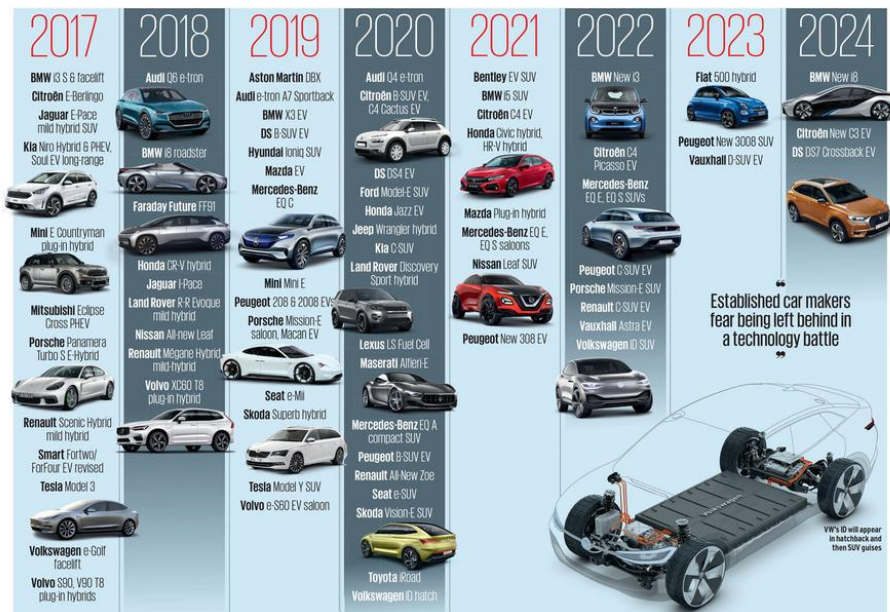


Figure 3. Expected future models

2. DRIVETRAIN

Powertrain is what enables the motor to transfer torque to the wheels. A classification can be made regarding drive wheels: rear wheel drive (RWD), front wheel drive (FWD) and all wheel drive (AWD) - this means that there are 2 motors on each axis, which are not mechanically connected, but controlled by electronics.

Tesla incorporates RWD and AWD. It is necessary to mention that in 2017 Tesla announced that they will discontinue Model S 75 RWD, leaving Model 3 as the only RWD option.[1] For the AWD models they use open differentials to enable the car to take a turn. AWD models or dual motors models have differentials on both front and rear axles. The axes have no mechanical linkage between them. Power distribution among them is controlled electronically[2].

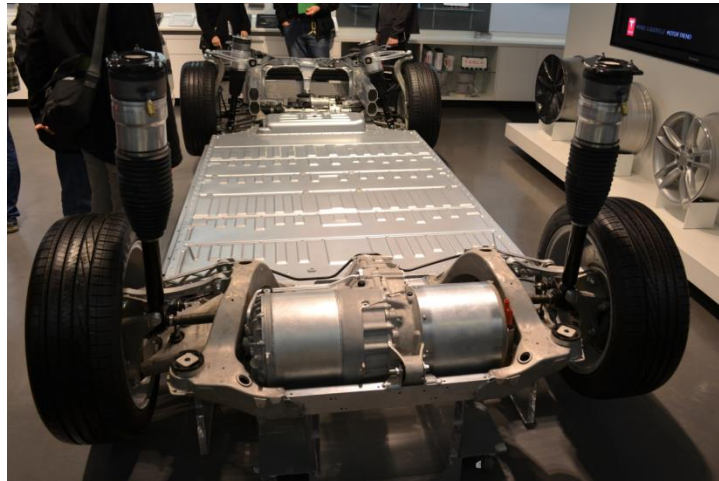


Figure 4. Tesla Model S (2013)with its RWD single motor and battery pack across the chassis [39]

Nissan Leaf on the other hand utilizes front- mounted motor and FWD.[4]
Chevy Bolt also uses FWD, as well as *Hyundai Ioniq Electric*.[5, 6].

3. TRANSMISSION

Transmission is what transfers the torque from the motor to the wheels and changes the value of revolutions per minute (RPM) when need. Usually a single speed fixed gear is most utilized. As mentioned before some models use open differentials. On the following picture is shown how an open differential looks [48]:



Figure 5. Open differential [48]

4. MOTORS

Electric cars are driven by electric motors. They are responsible to convert electric energy into mechanical and transfer the torque to the transmission. There are different types of motors used to drive electric vehicles today. Most of them utilize rare earth permanent magnets synchronous motors(PMSM) or brushless DC motor (BLDC)like Tesla, BMW i3, VW E- Golf, Chevrolet Bolt, while Nissan Leaf utilizes an AC syn-

chronous motor [24]. Tesla also incorporates models with dual motors, being with rear BLDC and front induction motors.[3].

An exemplary comparison between utilized motors is shown below [2, 3, 4, 5, 6]:

EV	P, kW	P, hp	M, Nm
Hyundai Ioniq Electric	88	118	295
Nissan Leaf	110	147	320
Chevrolet Bolt	150	200	360
Tesla Model 3 dual motor	340	455	640
Tesla Model S dual motor	581	779	1250

Figure 6. Comparison of parameters of EV's motors

There are some in- wheel motors, currently in development by Protean Electric. They are not yet mass produced, but as of now they are only encountered in China [27]. According to Protean's official website the Pd18 model has 1250 Nm torque, 80 kW max power, 60 kW continuous power, weighs 36 kg and a max speed of 225 km/ h. The Pd16 model on the other hand has 800 Nm torque, 40 kW max power, 26 kW continuous power, 28 kg weight and 150 km/ h max speed. [28]. The biggest problem of in-wheel motors is the unsprung mass, which normally lowers driver's handling whenever a tire hits a bump or a pot hole. It is said that it's overcome by modern technology and electronics as well as computer controlled wheel suspension. [27, 28].

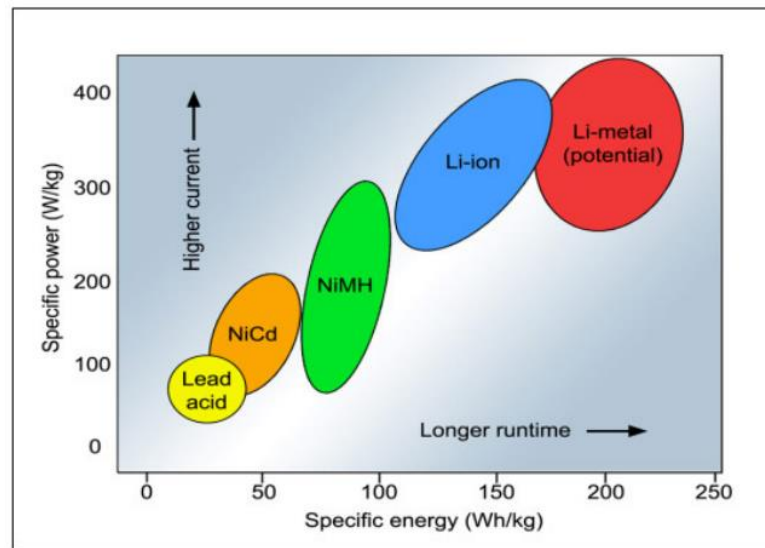


Figure 7. Characteristic of different types batteries [35]

5. BATTERIES

Batteries are a vital part of an electric vehicle. They allow EV's to travel a given range without need of recharge. Most of currently manufactured EV's offer a range of 100 - 150 miles (160 - 240 km) with a single charge of the battery. As of 2017 only Tesla Model S and Chevrolet Bolt present a range of over 200 miles (320 km).

Every electric vehicle has two types of batteries based on their application. One is called starting, lighting and ignition battery, which provides power supply to different accessories on a low voltage level (usually 12 V). The other is called traction battery, which provides supply to motors. They operate at a higher voltage- over 300 V [38]. This requirement is usually fulfilled by using battery cells in modules, connected to

each other in series and in parallel, forming a battery pack. Most commonly used type of battery is Lithium (Li) which can be seen below. Many manufacturers utilize different metals in combination to Li such as cobalt, manganese, nickel and others. [15].



Figure 8. Chevrolet Bolt's battery pack [33]

Batteries are evaluated by the following characteristics and parameters:

- Storage capacity - usually given in kWh;
- Energy density - amount of energy, stored in a given mass, Wh/ kg;

As of this moment a battery pack has about 50 to 60% of the theoretical energy density of the cells, forming the pack.[12]

Here is a brief comparison between energy densities of EV's:

- ✓ Nissan Leaf with 24 kWh battery which weighs 218 kg [4]. By directly dividing both numbers this would mean a density of about 110 Wh/ kg, while given information states 140 Wh/ kg [4];
- ✓ Chevrolet Bolt's 60 kWh battery (composed of flat format cells as seen in the picture above) weighs 440 kg [5]. Calculating this would mean roughly 136 Wh/ kg;
- ✓ Tesla's Model S has a variety of available batteries- 75 kWh or 100 kWh (previously 60 and 80). Since Tesla uses batteries from Panasonic [2, 39] which are cylinder cells, it is stated they have density of 265 Wh/ kg [2].

Overall it is safe to say that the energy density of EV's traction batteries is between 100- 300 Wh/ kg with a trend of raising. Some manufacturers may have to lower battery power and energy density with some variations of Li-ion due to needs to increase safety levels [40].

- Battery "Life" - number of charge/ discharge cycles that a battery can present until it becomes unuseful. It is necessary for traction batteries to be capable of deep discharge cycles.;

It is necessary to mention, that it is hard to determine state of health (SoH) of an EV battery due to a variety of factors (climate factors, way of driving, etc) and due to operation of battery management system (BMS). It can be estimated by measuring impedance or conductance [51].

Nissan actually represents battery's SoH as 'bars' on its dashboard, which are 12, while there is no information that other manufacturers show this to their customers in such a manner. According to [49] the top bar (twelfth) is more important, i.e. when

this bar drops off it means that the SoH has dropped to 85%. This is also confirmed by [50] and the graphs shown there.

Most popular EV's (Nissan Leaf, Chevrolet Bolt and Tesla) have the following battery life warranties [52]:

Electric car model	Warranty period	Percentage guarantee
Nissan Leaf	8 years/100,000 miles	~75%
Chevrolet Bolt	8 years/100,000 miles	60%
Tesla Model S	8 years/unlimited miles	None
Tesla Model X	8 years/unlimited miles	None

Figure 9. Warranties given by manufacturers [52]

- Price - still holds a big part of today's customer mindset about EV's. Currently batteries cost about a quarter to a third of EV's whole price.

The following figure shows a classification by Environmental Protection Agency (EPA) rated range per full charge [31]:

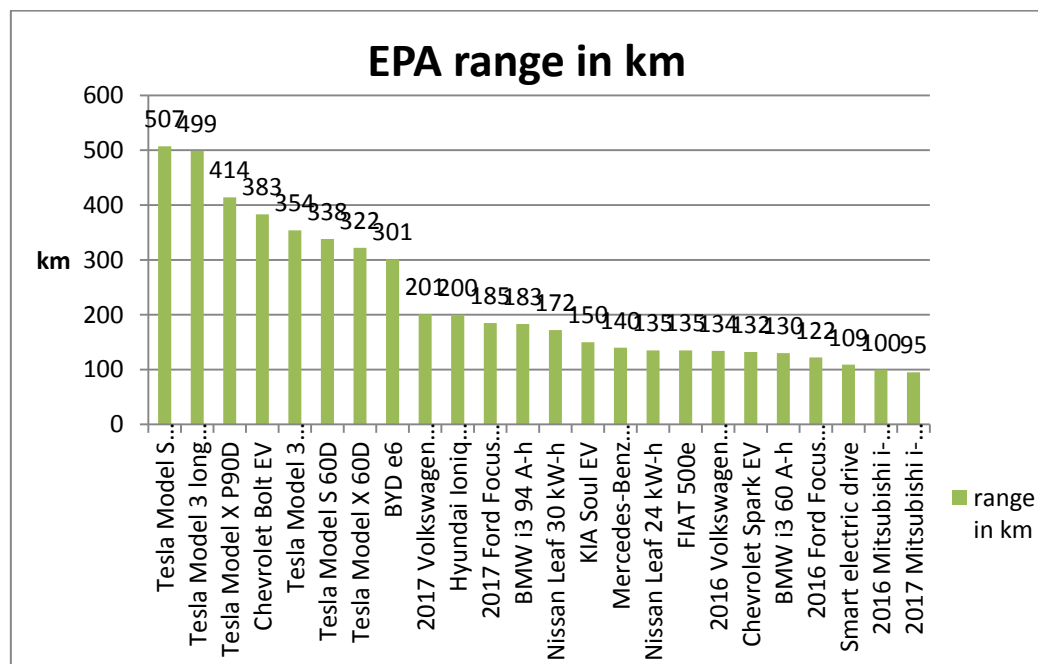


Figure 10. EPA ranges in km

To make an additional comparison between EV's and their batteries, we will take a look at how much energy is required to travel a single kilometer.

- ✓ Nissan Leaf with 24 kWh battery is said that travels 135 km per charge. This would mean a $177.77, \approx 178 \text{ Wh/km}$;
- ✓ Tesla's 100 kWh battery, said to travel over 500 km would have over 200 Wh/km ;
- ✓ Chevy Bolt's 60 kWh battery travels 383 km, which gives roughly 157 Wh/km

With those results in mind it is safe to say that to travel a single kilometer the energy required is around 150 - 200 Wh and steadily increasing.

By having rough results of how much energy is required to travel a single kilometer, we can also roughly calculate how much money will that cost us and then compare it

to the cost of traveling single kilometer by a car with internal combustion engine, with which we are already accustomed to. Let's assume a round up price of 0.2BGNfor a kWh energy. This would give us about $(0.15 \text{ to } 0.2) \cdot 0.2 = 0.03 \text{ to } 0.04\text{BGN/ km}$ needed for our rough results from above.

Now to briefly calculate about the car with internal combustion. Let's assume that this car consumes 5 l/ 100 km on non- urban roads and 10 l/ 100 km on urban roads. Currently a single litre of gasoline costs between 2.2 and 2.3BGN. Calculating with the higher price this would mean that this car would consume 11.5 BGN/ 100 km on non-urban roads and 23 лв. /100 km on urban roads or 0.115 BGN/ km and 0.23 BGN/ km. It is necessary to say that we need to lower the last value of our prices, since we calculated with excise. Without taxes the gasoline's price is about 2.4 times lower (counting excise as half the price and additional 20% for value added tax (VAT)), so we would have $0.115 / 2.4 = 0.0479\text{BGN/ km}$ and $0.23 / 2.4 = 0.0958\text{BGN/ km}$. respectively.

Comparing those last results we can conclude that as of now an electric vehicle is roughly equally competitive with an internal combustion one in urbanized environments and around half as efficient on non-urban and interurban roads.

6. CHARGING

Electric vehicles have a need to be charged. According to Society of Automotive Engineers (SAE), which is based in the US, there are 3 levels of charging [7]:

- 1) level 1- 120 V AC charging (usually from house outlets)- takes about 20 to 24 hours to fully charge;
- 2) level 2- 240 V AC charging and 40 A current- full charge takes about 4 to 6 hours;
- 3) level 3- DC fast charge using 480 V- provides 80% charge in 30 minutes to an hour.

Those levels are primarily individualized by restrictions of their power system's lines, e.g. level 1 as stated is standard outlet, level 2 is taken by their lines which phases are 180° from one another.

There are also other standards. The International Electrotechnical Commission (IEC) defines charging in modes [7]:

- Mode 1 – slow charging from a regular electrical socket (single- or three-phase);
- Mode 2 – slow charging from a regular socket but with some EV specific protection arrangement (e.g., the Park & Charge or the PARVE systems);
- Mode 3 – slow or fast charging using a specific EV multi-pin socket with control and protection functions (e.g., SAE J1772 and IEC 62196) (CCS);
- Mode 4 – fast charging using some special charger technology such as CHAdeMO

Overall a problem is surfacing. This is a lot of MW's power to be consumed daily at different points of time and different magnitudes to hit the system. Charging stations have limited power up to 120 kW [7]. According to [7] for normal charging (up to 7.4 kW), car manufacturers have built a battery charger into the car. A charging cable is

used to connect it to the electrical network to supply 230 volt AC current. For quicker charging (22 kW, even 43 kW and more), manufacturers have chosen two solutions:

- Use the vehicle's built-in charger, designed to charge from 3 to 43 kW at 230 V single-phase or 400 V three-phase;
- Use an external charger, which converts AC current into DC current and charges the vehicle at 50 kW (e.g. Nissan Leaf) or more (e.g. 120-135 kW Tesla Model S).

Charging as a process is enabled by use of one of these charging methods and systems. One of them is Combined Charging System (CCS) for AC and DC charging [42] and the other is CHAdeMO for DC fast charging [41]. According to [43] as of now most EV's equipped with CHAdeMO are capable of 50 kW charging, but steadily stations with power of 100 kW and 200 kW are coming in numbers and as of this year they have announced CHAdeMO 2.0 which will allow stations with power up to 400 kW and will compete with CCS "ultra-fast" stations.

Those "ultra-fast" stations on the other hand [44] are mainly based in the states and have power of 150 kW and 350 kW.

There are some expectations for batteries to utilize graphene to have higher performance levels. Graphene batteries can offer improved performance over traditional batteries thanks to the structure of graphene. Graphene is composed of multiple thin layers of carbon atoms, tightly bound together in a hexagonal (honeycomb) structure. Graphene is an excellent conductor of both thermal and electrical energy. Graphene is also chemically inert, has a large surface area yet remains flexible, and is very lightweight. Graphene is typically considered sustainable and environmentally friendly, with many different possible applications. [17, 18]

New advances in graphene batteries have lead to the creation of a battery that surpasses the performance of any lithium-ion battery currently in use. Graphenano, a Spanish battery company, unveiled last year a graphene-polymer battery which could let electric vehicles drive up to 800 km, or 497 miles, on a single charge. The battery could also theoretically be charged in only a few minutes. Thanks to its graphene construction the battery is capable of charging and discharging approximately 33 times faster than a regular lithium-ion battery. [18]

7. EFFICIENCY

Efficiency of an EV battery can be defined by a variety of ways. If we look at energy efficiency, defined as the ratio between discharging and charging energies, as stated in [53], it is mainly influenced by Joule losses. They also show results that quick charging with high current produces only 5 % reduction in battery life, while most of decrease in capacity was due to mileage [53]. They also mention that Li- ion batteries have a Coulombic efficiency close to 1. Overall at the end of their results we can see that efficiency varies between 80 to 85 % and it's highly influenced by the state of charge (SOC) of the battery.

8. CONTROLLER

In simplest terms, the controller is the connection between the battery's power and the motor which drives the wheel(s).

Actually, to control the controller, you have an accelerator pedal which does the same job as a gas pedal in an internal combustion engine car. The pedal is attached to a type of resistor called a potentiometer and the net result is it sends a small amount of electric current variably and progressively to the controller. The controller is thus instructed how much current in turn to provide from the batteries to the motor. It actually sends pulses of power from transistors, and not one steady flow, somewhat as pulse - width modulation (PWM). These pulses are in the realm of 15,000 per second or more or less. In the case of most modern EVs which use efficient and powerful AC motors, the controller also in the process reverses the polarity of the DC power from the battery to AC. The net result is the controller's frequency of energy drawn from the battery determines the rpm of the motor(s). [23]

9. CONCLUSION

After everything we considered in this paper, it is somewhat safe to say that electric vehicles and specifically electric cars will continue their development and will be one of the main means of transport in near future. They will compete equally with other types of land transport with their growing characteristics and features.

REFERENCES

- [1] <https://www.teslarati.com/tesla-discontinue-model-s-75-rwd/>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_3
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_Leaf
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet_Bolt
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Hyundai_Ioniq#Ioniq_Electric
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Charging_station
- [8] <http://www.evtown.org/about-ev-town/ev-charging/charging-levels.html>
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Supercharger
- [10] <https://insideevs.com/>
- [11] <https://www.chevrolet.com/>
- [12] <http://www.influitenergy.com/comparing-electric-cars-and-their-batteries/>
- [13] <http://www.plugin cars.com/>
- [14] <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/252/1/012058/pdf>
- [15] http://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev
- [16] <https://www.teslarati.com/tesla-model-3-battery-range-220mi-310-mi-premium>
- [17] <https://www.graphene-info.com/graphene-batteries>
- [18] <https://sciencetrends.com/will-graphene-battery-power-tomorrows-tesla-car/>
- [19] <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2014-01-1879/>

- [20] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993715000032>
- [21] <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2016-01-1228/>
- [22] <https://www.hybridcars.com/how-an-electric-car-works/>
- [23] <https://evobsession.com/2018-nissan-leaf-specs/>
- [24] <http://www.carbuyer.co.uk/reviews/recommended/best-electric-cars>
- [25] <https://pushevs.com/electric-car-range-efficiency-epa/>
- [26] <https://gas2.org/2017/04/18/in-wheel-motors-protean-partnership-vie/>
- [27] <https://www.proteanelectric.com/protean-drive/#overview>
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/File:Global_plug-in_car_sales_since_2011.png
- [29] <https://www.autocar.co.uk/>
- [30] <https://en.wikipedia.org/>
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_X
- [32] <https://www.boronextrication.com/2016/04/03/2017-chevrolet-bolt-ev/>
- [33] <https://www.slideshare.net/AyaMohamed60/electric-car-presentation-2017>
- [34] <https://www.oregon.gov/>
- [35] <http://www.electric-vehiclenews.com/>
- [36] <https://www.renesas.com/>
- [37] <https://www.mpoweruk.com/traction.htm>
- [38] <http://www.siliconbeat.com>
- [39] https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery
- [40] <https://en.wikipedia.org/wiki/CHAdemo>
- [41] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_Charging_System
- [42] <https://electrek.co>
- [43] <https://insideevs.com/insideevs-visits-first-ultra-fast-ccs-station-in-u-s/>
- [44] <https://www.cars.com/>
- [45] <https://media.chevrolet.com/>
- [46] <https://ev-database.uk/car/1106/Nissan-Leaf>
- [47] <http://eastcoastoverlandadventures.blogspot.com/>
- [48] <https://flipthefleet.org/2017/nissan-leaf-check-your-battery-before-buying/>
- [49] <https://insideevs.com/>
- [50] <https://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=6006&context=etd>
- [51] <https://www.energysage.com/>

Authors: **Valentin Totev**, engineer, Dep. Electrical Power Supply, Electrical Equipment and Electric Transport, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia; E-mail address: valentintotev@abv.bg; **Dzhengiz Ibram**, engineer, Dep. Electrical Power Supply, Electrical Equipment and Electric Transport, Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Sofia; E-mail address: dzhengiz.ibram@tu-sofia.bg

Received 15.12.2018

Reviewer: Assist. Prof., PhD Todor Ionov

АДАПТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА УЛИЧНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ В ЗАВИСИМОСТ ОТ ОБЕМА НА ТРАНСПОРТНИЯ ТРАФИК И СКОРОСТТА НА ДВИЖЕНИЕ НА МПС

Николай Василев, Марин Вълчев, Борис Тошев

Резюме: Съгласно новите норми за улично осветление БДСЕУ13201 следва да се използва адаптивно управление на осветлението. В работата е описано изпълнението на системата, принципа на функционирането и установеното значително намаляване консумацията на енергия за конкретни реализации в (24%, 30%, 35%, 40%, 56%). Тази модерна технология понастоящем успешно и бързо се популяризира в Европа. Дигитализацията на уличното осветление в България изостава много. У нас досега са монтирани около 9-10 такива системи, но не е известно колко от тях реално функционират и няма данни за евентуално реализирана икономия на енергия? Необяснимо защо градските общини не стимулират този начин за повишаване на енергийната ефективност! За повишаване на професионалната квалификация у нас на територията на ТУ-София се изгражда „Учебно демонстрационна уредба за улично осветление с адаптивно управление“ за обучение на студенти и експлоатационния персонал. Това е нашият опит за частична дигитализация на уличното осветление в България.

Ключови думи: Адаптивното управление на улично осветление; транспортен трафик

ADAPTIVE STREET LIGHTING CONTROL DEPENDING ON THE VOLUME OF TRAFFIC AND THE SPEED OF THE VEHICLE

Nikolay Vassilev, Marin Valchev, Boris Toshev

Abstract: According to the new standards for street lighting BDSU13201, adaptive lighting management should be used. The report describes the performance of the system, the functioning principle and the significant reduction in energy consumption for specific conversions in (24%, 30%, 35%, 40%, 56%). This modern technology is currently being successfully and rapidly promoted in Europe. Digitization of street lighting in Bulgaria is lagging behind. There are so far around 9-10 such systems installed, but it is not known how many of them actually function and there is no data on potential energy savings? Unexplained why city municipalities do not stimulate this way to increase energy efficiency! In order to increase the professional qualification in Bulgaria in the territory of TU-Sofia, a "School lighting demonstration system for adaptive street lighting" is being developed for the training of students and operating staff. This is our attempt to partially digitize street lighting in Bulgaria.

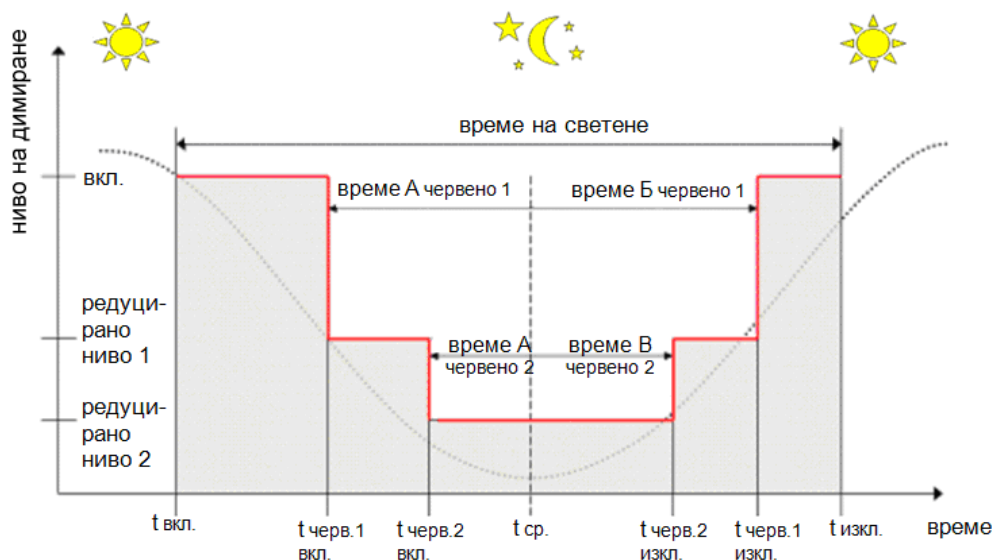
Keywords: Adaptive street lighting control; transport traffic

ВЪВЕДЕНИЕ

Въвеждането на новия стандарт за улично осветление БДСЕН 13201-1 едновременно сериозно усложни и подобри качеството на проектирането на уличните осветителни уредби. Съгласно препоръките на СІЕ управлението на осветлението може да се осъществи по следните начини:

- по зададен статистически определен времеви график;
- от локален сензор;
- с отчитане на интензивността на транспортния трафик;
- от локален сензори и с отчитане обема на транспортния трафик.

В България досега уличното осветление се управлява по втория и „частично” по първия начин. Статистически са определени само времената на включване и изключване на осветителната уредба. Продължителността и димирането на междинните времеви зони се приема ориентировъчно „експертно”, понеже досега у нас не са провеждани статистически изследвания необходими за обосноваване на тяхната продължителност и дълбочина на димиране.



Фиг.1. Статистически определени времена на включване и изключване на 5 междинни експертно предложени времена и степени на димиране

Разпространено е също статичното 50% полунощно превключване на уличното осветление. Според стандартната таблица БДСЕН 13201-1 осем параметри определят светлинния клас М на осветителната уредба.

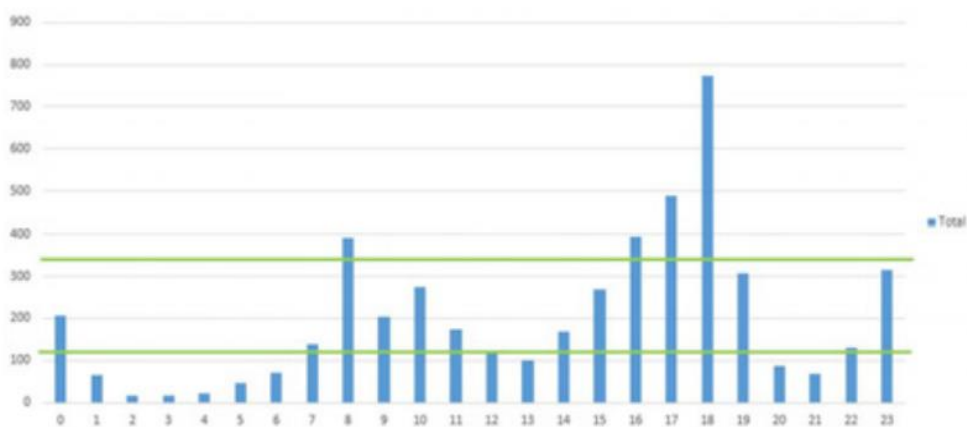
Светлотехническият клас М се определя с формулата $M = 6 - \sum m_k$

От сравнителен преглед на 8-те параметри в таблицата може да се приеме, че параметри 3,4,5,6,7,8 са постоянни в продължителен период от време, като само първите два, скорост и интензивност на трафика, се променят динамично във времето. Известни промени са възможни в състава на трафика (параметър 3), но се приемат за несъществени и освен това не могат количествено да се измерят.

Интензивността на транспортния трафик и скоростта на движение на МПС обаче времево се променят през денонощието.

Параметри	Опция	Описание		Теглови коефициент <i>mk</i>
Скорост	Много голяма	$v \geq 100 \text{ km/h}$		2
	Голяма	$70 < v < 100 \text{ km/h}$		1
	Средна	$40 < v \leq 70 \text{ km/h}$		-1
	Малка	$v \leq 40 \text{ km/h}$		-2
Интензивност на трафика		многолентов за МПС	двулентов	
	Голяма	> 65% от макс. капацитет	> 65% от макс. капацитет	1
	Средна	35% - 65% от макс. капацитет	15% - 45% от макс. капацитет	0
	Малка	< 35% от макс. капацитет	< 15% от макс. капацитет	-1
Състав на трафика	Смесен с голям процент немоторизирани	2	2	2
	Смесен	1		1
	Само моторизиран	0		0
Разделени ленти за движение	Не	1		1
	Да	0	0	
Честота на пресичане на пътя		вътрешна секция/км	вътр. промени, разстояние м/у мостовете, km	
	Голяма	> 3	< 3	1
	Средна	≤ 3	≥ 3	0
Паркирали МПС	Да			1
	Не			0
Осветеност на околното пространство	Силно	витрини, светлинни реклами, спортни обекти, складове		1
	Средно	нормална ситуация		0
	Слабо	0		-1
Визуално водене/ контрол на трафика	Много трудно			2
	Трудно			1
	Лесно	0		0

Новите технически достижения дават възможности за количествено контролиране на обема на трафика и скоростта на МПС. С подходящи сензори и камери визуално се броят преминаващите МПС и се измерва тяхната скорост. Това означава, че чрез адаптивното управление могат да се съобразяват промените на транспортния обем и на скоростта на МПС през тъмните часове след залез и преди изгрев слънце [1]. На фиг.2 това е илюстрирано с резултатите от конкретно изследване в Швейцария на промените на интензивността на транспортния трафик през трите нормени зони на димиране [2].



Фиг.2. Измерени часови стойности на броя на преминаващите МПС през избран ден и нормени зони на димиране според БДСЕН 13201-1 (зелено)

Измерванията са направени с транспортен сензор на фиксирано улично поле (фиг.3).



Фиг.3. Транспортен сензор и контролно измервано поле

У нас няма проект с адаптивно управление на улично осветление отчитащо динамиката на транспортния трафик. Утвърдено е мнението между нашите специалисти, че такова управление засега е технически трудно изпълнимо и икономически и енергийно не е ефективно.

Какъв е международният опит в тази насока ?

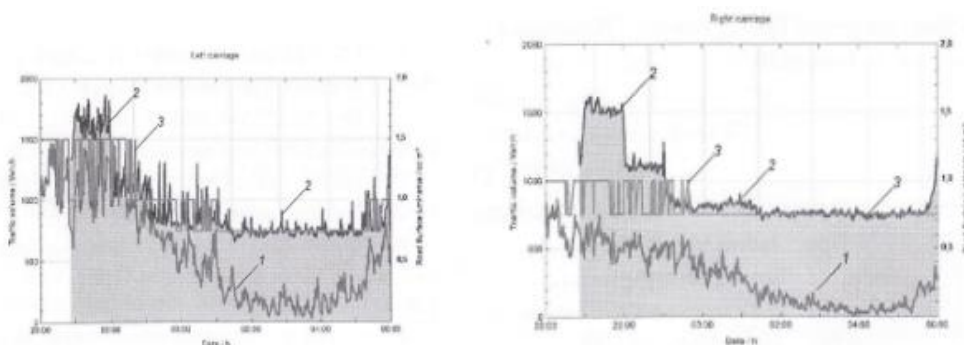
Първият реализиран такъв проект в Англия е на автотранспортна магистрала М65. Когато преминават 3000 МПС светлинният поток не се димира. Ако броят на МПС е между 3000 и 1500, светилният поток се редуцира до 70%. При следващо намаляване на броя на МПС под 1500, светлинният поток се димира до 50 %. По този начин годишната консумация на електроенергия е намалена с 24 % енергия [3].

Във Финландия на автотраспортна магистрала VT7 в Хелзинки през 2007 г. е изпълнено адаптивно управление на осветлението в зависимост от обема на транспортния трафик на четири нива на светлинния поток: 40%, 60%,80% и 100%. Годишната консумация на електроенергия е намалена с 45% [4].

В Италия, след въвеждане на този начин на адаптивно управление на автотраспортна магистрала Tirivolio с интензивно движение на МПС, годишната консумация на електроенергия е намалена с 35 % [5].

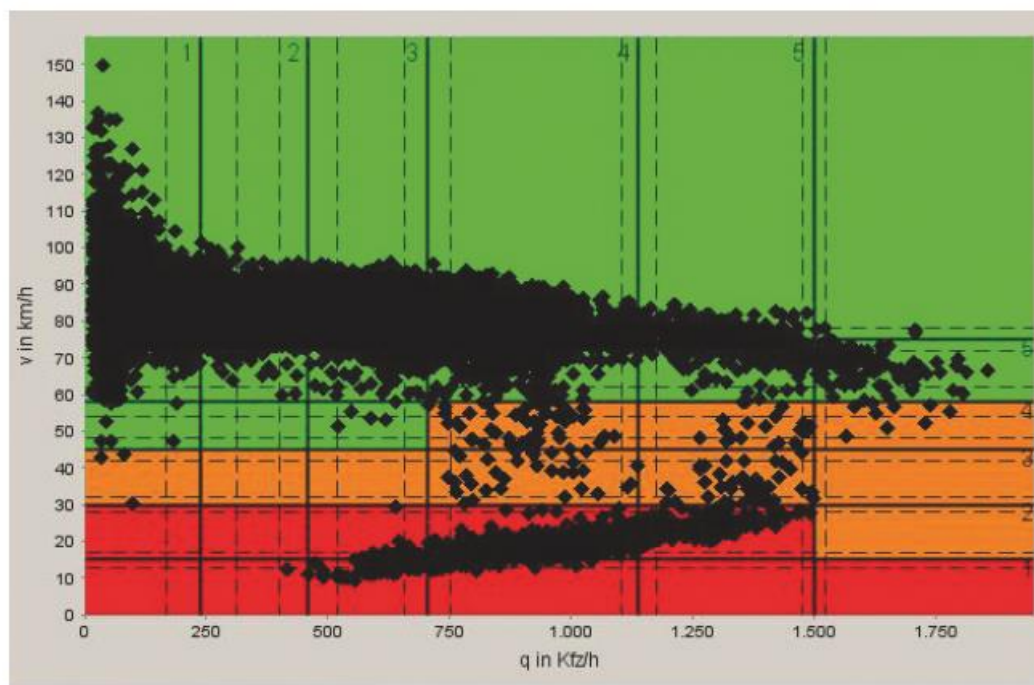
На фиг.4 са показани резултатите от измерванията на уличното платно през деня в посока към града, а вечер - в обратна посока. Разликата в обема на транспортните потоци е значителен и ще бъде погрешно да се уеднаквяват. Енергийните разходи са с 25% по-големи, ако се приеме еднакъв обем на трафика в двете посоки.

Такава ситуация се наблюдава на бул. Цариградско шосе в София – сутрин е по-голям потокът от коли навън от града, а привечер - обратно към града.



Фиг.4 - с крива 1 са представени графично измерения транспортен поток на МПС, скрива 2 - измерената яркост на пътната настилка, с крива 3 - стандартната яркост изисквана съобразно обема на трафика.[5].

Адаптивно управление на осветлението на улица Данцигер в Германия е съобразено с обема на транспортния поток, който се измерва със съществуващите детектори. Транспортният поток се контролира непрекъснато и резултатите от преброяването се изпращат в изчислителния център. По този начин се определят нормените степени на осветление и се предават на управляващата осветителна система. От там автоматично се включват сегментните контролери в уличните касети, които изпращат заповеди по PowerlineTechnology на осветителните контролери за димиране на осветлението на 6 степени: 100%, 92%, 84%, 76%, 92%, 100%. Консумираната енергия е намалена с 34% [6].



Fundamentaldiagramm für die Danziger Straße

скорост км/час – по ординатата

брой на мпс / час – по абцисата

Фиг.5. Фундаментална диаграма за скорости и брой на МПС за Danziger Strasse, Frankfurt, Германия

Ежедневно в продължение на година на ул. Cendere в Истанбул, Турция са измервани максималния и минималния брой на преминалите МПС и тяхната максимална и минимална скорост. С измерените данни са определени светлинните класове М на осветителната уредба конкретно за 3 часа на 4 юли: М2, 21:00 – М5, 23:00 – М4 и 02:00 – М3, като за тези часове са адаптивно димирани светлинния поток на уредбата в зависимост от стойностите на транспортния поток и на скоростта на МПС [7]. Ако осветителната уредба постоянно работи с клас М2, консумацията на енергия ще се превиши с 56% !

Какви констатации следват от този преглед на реализираните в други страни системи с адаптивно управление на уличното осветление в зависимост от обема на транспортния трафик и скоростта на движение на МПС ?

1. Значително намаляване на консумацията на електроенергия на осветителната уредба с 24%, 45%, 35%, 34% при димиране само според обема на трафика и с 56% при димиране според обема на трафика и едновременно според скоростта на МПС.
2. Предпоставка за подобно съвременно адаптивно управление е използване на специални системи за адаптивно управление с подходящи драйвери, лампови и сегментни контролери, специални сензори, детектори, яркомери и естествено квалифициран експлоатационен персонал.
3. Предварително статистическо обследване на вида транспортния трафик в условията на нашите градове.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо е подходяща финансовата политика на нашите общини да стимулира фирмите експлоатиращи уличното осветление да повишават неговата енергийна ефективност.

Предвид на недостатъчна професионална квалификация на експлоатационния персонал, в тази насока, на територията на ТУ-София бе изградена „Учебно демонстрационна уредба за улично осветление с адаптивно управление” за обучение на студенти и експлоатационния персонал [8]. Това е наш опит за частична дигитализация на уличното осветление в България.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н. И. Василев, К. М. Късев, Интелигентно външно осветление с адаптивно управление, изд. Авангард Прима, София 2015
- [2] J. Haller, Eine Zukunftsloesung fuer fuer die Beduerfnisgerechte Beleuchtung der oefentliche Raumes, Lichttagung, 2016, Karlsruhe
- [3] A. Collins, T. Thurreli, R. Pink, J. Feather, Dinamic Dimming: The Future of Motor Way Lighting, The Lighting Jurnal, 2002

- [4] L.Guo, M. Eloholma, L. Halonen, Lighting Control Strategies for Telemangement Road Lighting Control Systems, The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America , 4, 2007
- [5] G. Rossi, P. Iacomussi, A. Mancinelli, P. Di Lecce, Adaptive System in Road Lighting Installations, Light Engineering, 4, 2015
- [6] P. Stieler, S. Lorenc, Erfahrung zur dynamischen Beleuchtungssteuerung aus dem Realbetrieb, 11 Tagung, Stadt – und Aussen , Lichttagung Dresden 2017
- [7] B. Buyukkinaci, S. Onaygil, O. Guler, M. Berker Yurtseven, Y. Dursun, Road Lighting Control According to EN 13201 -1.
- [8] Н. Василев, О. Кишкилов, М. Вълчев, Б. Тошев, „Учебно демонстрационна уредба за улично осветление с адаптивно управление”, VII Балканска конференция по осветление, 2018 г.

Автори: **Н. И. Василев**, проф. д-р инж., катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: nvassilev@tu-sofia.bg ; **М. Вълчев**, инж. докторант, катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; **Б. Г. Тошев**, инж., катедра "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: проф. д-р Захари Иванов

ОЦЕНКА НА ОСТАТЪЧНИЯ РЕСУРС НА ДИМИРУЕМИ КЛАСИЧЕСКИ ОСВЕТИТЕЛИ

Петър Стоев

Резюме: В статията е изготвена оценка на ресурса на светлинен източник разрядна лампа с конвенционален баласт при отчитане изменението на захранващото напрежение като управляващ фактор. Разгледана е работата на осветителна уредба с централно димиращо устройство - автотрансформатор. Въз основа на зададен график на димиране, за всяка степен се записва отработеното време и останалия ресурс до подмяна на светлинните източници в линията, като се отчита промяната на захранващото напрежение от димиращото устройство.

Ключови думи: разрядни светлинни източници, димиране, трайност

EVALUATION OF THE REMAIN LIFE OF DISCHARGE LAMPS DIMMED BY AUTOTRANSFORMER

Peter Stoev

Abstract: In the paper, a resource assessment of light source discharge lamp with conventional ballast was made, taking into account the change of the supply voltage as a control factor. The operation of a lighting system with a central dimming device - an autotransformer is considered. Based on a specified dimming schedule, the work time and remaining lamp life are recorded for each stage until the light sources in the line are replaced. Lamp life is revised, taking into account the change in the supply voltage from the dimmer.

Keywords: discharge lamps, dimming, lamp life

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Различната степен на износване на светлинните източници (СИ) в една осветителна уредба не е нов проблем. В зависимост от режима, при който работят и експлоатират, се прилага различен подход за поддържане на нивото на яркост на пътното платно. При прилагане на съвременната организация за групова подмяна, ресурса на групата СИ се определя от тези източници, които работят в най-неблагоприятен режим. При класическите осветители с източник разрядна лампа и електромагнитна пусково-регулираща апаратура определящи са осветителите, подложени на най-високо напрежение – тези в началото на линията. От друга страна стремежът за енергийно и икономически ефективно използване на енергията и компонентите на уличните осветителни уредби е наложил като

ефективно техническо решение регулирането на излъчения поток на светлинният източник. Целта е да осигурят необходимите нива на яркост на платното, без излишно „преосветяване“ и да се постигне икономия на енергия. Следвайки съвременните тенденции за изграждане на адаптивно и ефективно външно осветление, се използват различни по тип и характеристики димиращи устройства. Те са част от съвременните системи за адаптивно управление на уредбите за външно осветление[1],[2]. В общият случай се използват два основни типа устройства групови и индивидуални. При използване на индивидуални електронни баласта, захранващото напрежение на всеки светлинен източник е стабилизирано, разликата спрямо номиналното напрежение е в границите $\pm 1\%$ от U_H . Не се наблюдава влошаване на реализираните количествени и качествени показатели вследствие загуба на напрежение. При електромагнитен тип баласта и при груповите димиращи устройства загубата на напрежение зависи от потока на мощност, схемата на захранване, сечение и дължина на линията захранваща уредбата. Основните характеристики на някои от най-често използваните СИ са дадени в табл. 1. За оценка на работата на източника трябва да се базираме на тези параметри и начина на поддръжка почистване и подмяна на дефектирали източници на светлина и други компоненти на осветителната уредба.

Табл.1

Характеристики на различни типове и мощности
СИ Подобрени натриеви лампи с високо налягане (Philips, GE)

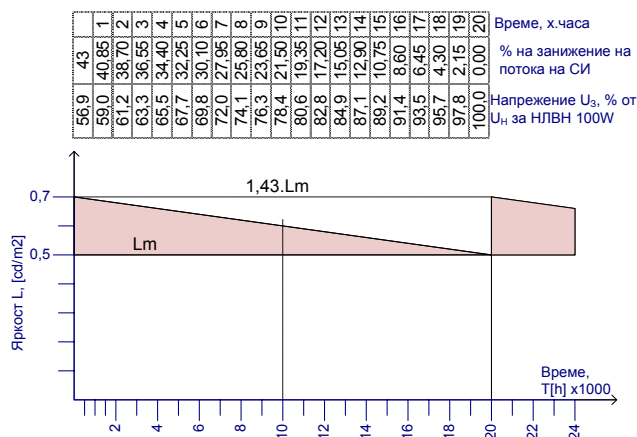
	P, W	Φ , lm	η , lm/W	t, h (за 10% изгорели лампи)	t, h (за 50% изгорели лампи)	LLMF след 16000 h
НЛВН	50	4200-4400	84-88	18000-22000	40000-70000	0,83-0,86
	70	6400-6600	91-94	20000-28000	40000-70000	0,86-0,91
	100	10000-10700	100-107	22500-30000	40000-70000	0,87-0,901
	150	16500-17500	110-117	24000-30000	40000-70000	0,91-0,94
МХЛ	50	5250-5500	93-104	12000-16000	20000-24000	0,80-0,85
	70	7200-7500	97-103	12000-16000	24000-27000	0,80-0,85
	100	10250-10500	101-108	16000-20000	24000-27000	0,80-0,85
	150	16500	102-110	20000	24000-27000	0,80-0,85

За определяне на броя на нивата и степента на редуциране на потока на лампата от димиращото устройство се взимат под внимание и два основни фактора:

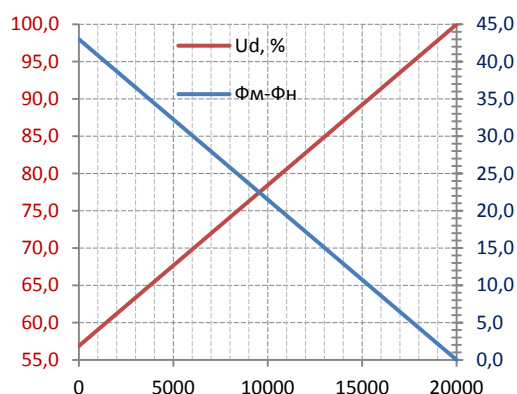
ДИМИРАНЕ ЗА КОМПЕНСИРАНЕ НА ПРИЕТИЯ ЕКСПЛОАТАЦИОНЕН ФАКТОР

В началният период на експлоатация заради приетия експлоатационен фактор (ЕФ) уредбата е преоразмерена (фиг.1). Яркостта която се поддържа е - $L_m=0.5\text{cd/m}^2$ за уредба клас ME5. Светлинният източник е натриева лампа високо налягане (НЛВН) с мощност 150W. Ако в средно замърсен район използваният осветител е със степен на защита IP65, груповата смяна на НЛВН се извършва при поток 82% от номиналния (след около 20000 часа светене LLMF е 0,82 – табл.1) и намаляването на ефективността на осветителя за същото време е с 15% (LMF=0,85),

то $MF = LLMF \cdot LSF \cdot LMF = 0,82 \cdot 1,0 \cdot 0,85 = 0,70$. Приема се $LSF = 1$, тъй като обикновено се извършва индивидуална смяна на лампи, при групово подмяна при 10% неработещи източници $LSF = 0.9$.



Фиг.1. Изменение на светлинният поток и съответно реализираната яркост на платното



Фиг.2. Изменение на потока и напрежението на НЛВН в о.е. за компенсиране на ЕФ при средна трайност 20000 часа

При така определения експлоатационен фактор създаваната яркост/осветеност върху платното при пускането на уредбата ще бъде $1/MF = 1,43$ пъти по-голяма от стойността, която се нормира. Ако не се приложи димиране на осветлението разходите за електроенергия ще бъдат също 1,54 пъти по-големи [3]. От експлоатационният фактор на тялото и кривата на изменение на светлинният поток на източника може да се прогнозира нивата на димиране във времето (фиг.2), така че да се поддържа потока постоянен за целия период на експлоатация на тялото ($LLMF = 1$). Това ни позволява работа при захранващо напрежение от около 78%. U_n . Така ще се съхрани ресурса на светлинният източник и ще се реализира икономия на електроенергия и средства за поддръжка.

ДИМИРАНЕ ПОРАДИ НАМАЛЕНИЯ ТРАФИК

С настъпване на късните часове на денонощието трафикът през улицата намалява, и това ни позволява да преминем към нормени нива на осветеност или яркост характерни за улици с по-нисък светлотехнически клас (БДС EN 13201 – част втора [4]). Направено е измерване на трафика през ул. „Андрей Сахаров“, гр. София, на завоя над метростанция „Младост 3“. Анализирайки показанията на фиг.3 трафик са определени моментите и степените за регулиране на потока, отчитайки изчисления ЕФ. Сутрин между 7 и 9 часа пътният участък е силно натоварен. Това се дължи на обстоятелството, че жителите отиват на работа, също така голяма част автомобилите превозват ученици към близкото училище. Прави впечатление, че след 22 часа потока превозни средства е намалял почти наполовина в сравнение с този по времето на включване на уредбата (интервал със слаб трафик) а след 24 часа трафика е минимален.



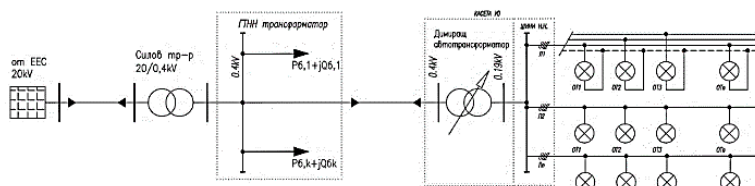
Фиг.3. Изменение на трафика през делничен ден

За момента икономически е най-изгодно използването на групово димиращо устройство променящо захранващото напрежение в линията [5]. Така се реализира икономия на електроенергия, запазва се ресурса на светлинният източник в началния период на експлоатация, когато уредбата е нова.

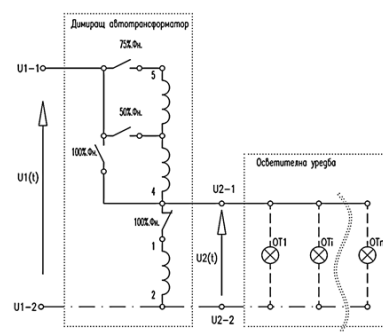
Едно от бюджетните решения е използването на понижаващ автотрансформатор. На фиг.4 е показана електрическата схема на осветителна уредба. Като димиращо устройство е използван автотрансформатор.

Предвидени са три степени на работа 100%, когато АТ е изключен за разгаряне на лампите, 75% при слаб трафик между 22 и 00 часа и 50% при много слаб трафик след полунощ.

На фиг.5 е показана еднолинейната схема на димиращото устройство и реализирането на отделните степени на димиране.



Фиг.4. Примерна схема на захранване на УОУ



Фиг.5. Еднофазна схема на свързване на АТ

За разглежданата уредба са използвани 3 бр. еднофазни ГДУ свързани в звезда. За уличната уредба от фиг.4 е изготвен симулационен модел [6], който дава възможност за отчитане на реалните икономии на електрическа енергия при работата на осветителните тела с понижено захранващо напрежение. Могат да варира интервалите на димиране две, три или повече степени. Моделират се и параметрите на настройка на астрономическия календар по който се определя времето за работа на всяка от степените при димиране.

2. ОЦЕНКА НА УДЪЛЖАВАНЕТО НА РЕСУРСА НА СВЕТЛИННИТЕ ИЗТОЧНИЦИ ПРИ ДИМИРАНЕ

Независимо от бързото навлизане на светодиодните осветители във външното осветление все още най-разпространени са разрядните светлинни източници, като натриеви лампи високо налягане и метал-халогенни лампи. Новото поколение СИ имат подобрени експлоатационни характеристики и подмяната им се извършва през по-дълъг период от време (табл.1). Номиналната трайност на източника дадена в каталозите е получена при 12 часов работен цикъл (11 часа работа и 1 час пауза), като процента неработещи лампи е 10% (IESNA LM-47-01. 2001. IESNA approved method for life testing of high intensity discharge (HID) lamps. New York: Illuminating Engineering).

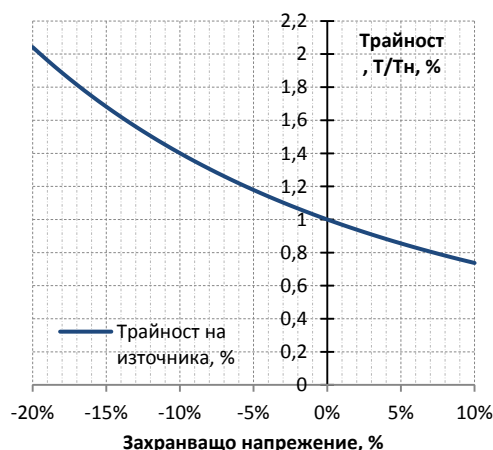
Установено е че при промяна на захранващото напрежение се променят енергетичните показатели и ресурса на лампата. В осветителна уредба с тела комплектовани с конвенционални електромагнитни баласта влиянието на отклонението на напрежението е особено силно. При използване на групово димиращо устройство различните падове на напрежение до всеки осветител и при различните нива на димиране са причина за нееднакво износване на лампите. Това е предпоставка за намаляване срока на груповата им подмяна. При необходимост от спазване на допустим процент неработещи лампи на километър линия, подмяната се прави по лампите, работещи в най-неблагоприятен режим по отношение на захранващо напрежение – това са първите осветители в линията. Оценката на остатъчният ресурс на светлинният източник при отчитане на захранващото напрежение като въздействащ фактор е при работа на системата при два варианта с димиране на потока и при система без регулиране. За да се изготви оценката се отчита времето на работа на уредбата на съответната степен на захранващото напрежение. Останалия ресурс $T_{ост.}$ на лампата се изчислява по:

$$T_{ост.} = T_H - T_{год,i}, h \quad (1)$$

където T_H е трайността на лампата по данни на производителя, $T_{год.}$ е времето на работа на тялото през годината. $T_{год.}$ е определено от астрономическия календар управляващ моментите на включване и изключване и моменти на преминаване към по-нисък светотехнически клас на улицата и редуциране на потока на СИ. При захранване с напрежение различно от номиналното, трайността на светлинният източник може да се оцени със зависимостта [7]:

$$T_L = T_H \cdot \left(\frac{U_H}{U} \right)^{3,2}, h \quad (2)$$

тук T_L е ресурса на СИ преоценен по отношението на действителното (U) към номинално (U_H) захранващо напрежение. На фиг.6 е показана в графичен вид зависимостта (2).

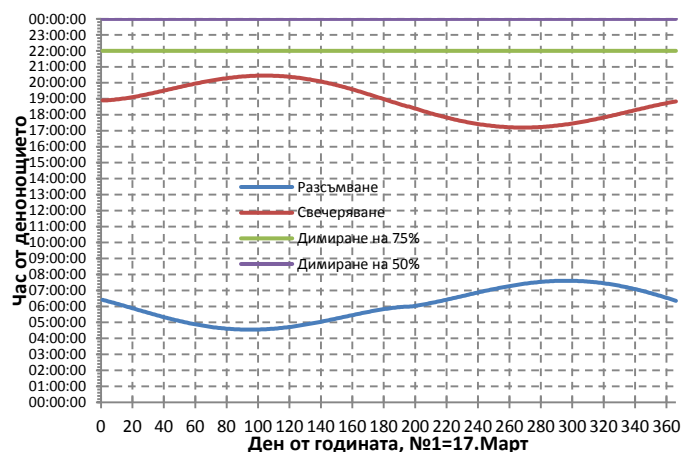


Фиг.6. Изменение на трайността на разрядни източници на светлина при изменение на захранващото напрежение

Тогава отработеният период от време през годината се определя по:

$$T_{\text{Год.}} = T_{\text{Л,100\%}} + T_{\text{Л,75\%}} \cdot \left(\frac{U_{\text{н}}}{U_1} \right)^{3.2} + T_{\text{Л,50\%}} \cdot \left(\frac{U_{\text{н}}}{U_2} \right)^{3.2}, h \quad (3)$$

Във формула (3) са използвани означенията $T_{\text{Л,100\%}}$, $T_{\text{Л,75\%}}$, $T_{\text{Л,50\%}}$, това са времената на работа на уредбата съответно на 100, 75 и 50 процента от потока на СИ. Моментите на включване на съответната степен на димиране се определят от системата за управление, като се използва вграденият в нея астрономически календар (фиг.7).



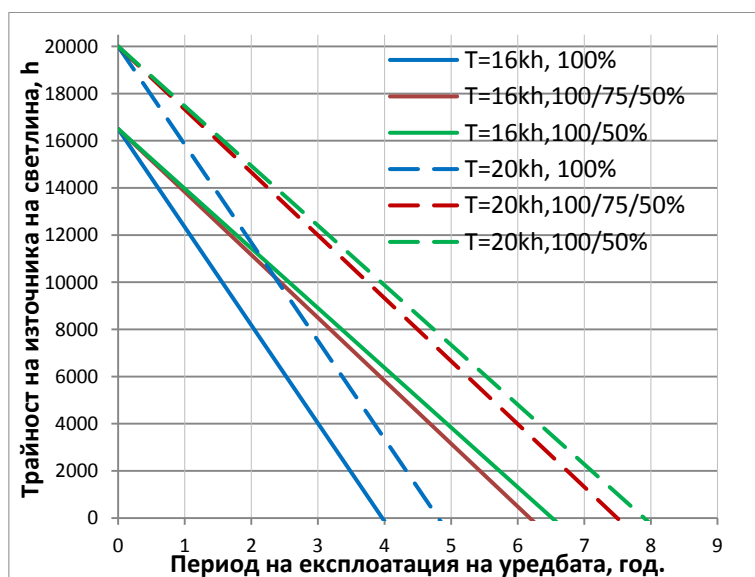
Фиг.7. Астрономически календар със моментите на включване на отделните степени при димиране

Използвайки, че времето за работа на уредбата в годишен план е 4160 часа (гр. София, $E_{\text{ПР.}}=20lx$), може да се определи средногодишната продължителност на времето за работа на всяка от степените на димиране, използвайки изготвения симулационен модел [6]. За разглежданата улична уредба клас ME5 са приети три нива 100/75/50% от $\Phi_{\text{н}}$. Степен 75% се включва в 22:00 часа, а 50% в 00:00 часа. Тези интервали варират в зависимост от трафика през улицата. Отчитайки това се получават средногодишните времена на работа 28,18 и 54% от $T_{\text{Год.}}$ за

съответната степен на димиране 100/75/50% от Φ_H . При управление с две степени на димиране 100% и 50%, средногодишните времена на работа 28 и 72% от Тгод. за съответната степен на димиране 100/50% от Φ_H .

Между първи и последен осветител в линия с дължина 370м ще се наблюдава разлика от 1,5 години в ресурса на СИ оценен по захранващо напрежение при димиране с АТ. При използване на електронен драйвер изменението на ресурса за всички осветители в линията е приблизително еднакво и съответства на първия осветител в уредбата.

На фиг.8 е показано изменението на ресурса на НЛВН 150W, при димиране по изложения по-горе в текста график. Оценката е направена за осветител №1.



Фиг.8. Изменение на ресурса на НЛВН при димиране

Разгледани са три варианта - без димиране $\Phi=100\%.\Phi_H$, тристепенно димиране 100/75 и 50% от Φ_H , двустепенно регулиране на 100 и 50%. Оценката е направена за два източника първия е с трайност 16500 часа, вторият 20000ч. При отчитане на интервалите (100/75/50%), при които осветителните тела работят с понижено напрежение, ресурса им би се увеличил около 1,75 пъти в сравнение с вариант без димиране. При работа на две нива на регулиране (100/50%) и увеличението е около 1,85 пъти.

3. ИКОНОМИЧЕСКИ ЕФЕКТ ОТ РАБОТАТА НА СВЕТЛИННИЯТ ИЗТОЧНИК ПРИ ПОНИЖЕНО НАПРЕЖЕНИЕ

Трайността на светлинният източник е един от основните фактори при изготвяне на икономически оценки в дългосрочен план за уредбата. Прилагат се три метода на подмяна на светлинните източници индивидуална, групова и смесена. При групова подмяна на светлинните източници се пристъпва, когато е изтекъл 70-80 % от техния ресурс [8]. При индивидуална подмяна се подменя в срок всеки източник. При планиране на метода на подмяна се анализира и локацията на уредбата, дали отказа на един СИ няма да доведе до висок риск от път-

ни произшествия. Цената на всеки лумен е общ показател за анализ на разходите за осветление, който отчита направените разходи за периода на експлоатация на дадена лампа във връзка с лумен часовете, които тя ще произведе през целия си живот. Този показател е валиден само при сравняване на източници, които имат подобно разпределение на светлината и са взаимнозаменяеми в осветителните тела и не оказват влияние върху оптичната ефективност на осветителя. Разходите за излъчения светлинен поток в лева за милион лумен часа се определя със следния израз [8]:

$$U_{СИ} = \frac{1000}{\Phi_H} \left[\frac{1000(C_{СИ} + C_{ТР})}{T_{СИ}} + P_{ОТ} \cdot C_{ЕЛ.ЕН} \right] \quad (4)$$

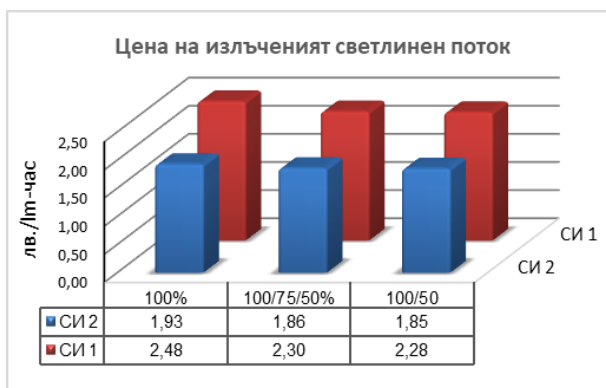
където:

- $U_{СИ}$ = цена на излъченият светлинен поток от лампа лв./lm-час;
- Φ_H = средна стойност на светлинният поток на СИ (lm);
- $C_{СИ}$ = цена на лампата (лв.);
- $C_{ТР}$ = разход за труд за подмяна на една лампа (лв.);
- $T_{СИ}$ = средна трайност на светлинния източник (час);
- $P_{ОТ}$ = активната мощност на осветителното тяло /мощност на лампата и загубите в баласта/, (W);
- $C_{ЕЛ.ЕН}$ = разход за електроенергия (лв./kWh);
- $C_{ЕЛ.ЕН} = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot P_{ОТ} \cdot T_{Pi}$, където n е броят на тарифите на електроенергията, T_{Pi} е продължителността на „i” тия ценови диапазон (час).

В оценката не е включена промяната на парите във времето, като инфлацията, риск, ликвидност и др. подобни. Целта е да се покаже, че трайността на източника има съществен дял в оценките за икономическа ефективност във външните осветителни уредби. В табл.2 са показани в табличен вид разходите за излъчен лумен, като са отчетени работата при понижено напрежение при димиране и разходите за електроенергия през този интервал.

Табл.2. Разходи за излъчен лумен при различни варианти на димиране

	Степени на димиране	U разходи за СИ за милион лумен часа в лв.		Q осреднен светлинен поток	P цена на светлинния източник в стотинки	h цена на труд за подмяна на единична лампа в стотинки	L средна трайност на лампата в хил. часа	W мощност на тялото +баласта(СИ+ПРА)	R цена на електроенергията ст./kWh
		U	Q						
		лв.	lm		ст.	ст.	х.часа	W	ст./kWh
СИ 1	100%	2.48	15000	1980	8500	16,5	169	18,24	
	100/75/50	2.30	15000	1980	8500	28,79	169	18,24	
	100/50	2.28	15000	1980	8500	30,65	169	18,24	
СИ 2	100%	1.93	17500	2170	8500	36	169	18,24	
	100/75/50	1.86	17500	2170	8500	62,64	169	18,24	
	100/50	1.85	17500	2170	8500	66,96	169	18,24	



Фиг.9. Графично представяне на разходите за излъчен лумен

От направените изчисления може да се направи извода, че макар и с по-висока цена, по-изгоден е светлинен източник СИ 2, като се димира. Това се дължи на по-големия ресурс на лампата и приемливата и себестойност.

4. ИЗВОДИ

При отчитане на икономии на електроенергия вследствие на работата на осветителните тела с понижено захранващо напрежение е разумно да се отчита и увеличаването на ресурса на светлинния източник, тъй като се увеличава интервала на подмяна на лампите. Чрез допълнително прилагане на димиране след полунощ, освен че се намаляват разходите за електроенергия, значително се намаляват разходите за труд и механизация. В началният период на експлоатация заради MF уредбата е преоразмерена и това ни позволява работа при захранващо напрежение от около 75%. U_H . Така ще се съхрани ресурса на светлинния източник и ще се реализират икономии на електроенергия и средства за поддръжка.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н. Василев, Б. Тошев, and Н. Янева, "Интелигентно пътно и улично осветление в Европа E-Street," 2007.
- [2] Н. Василев, "Повишване на енергийната ефективност на външното осветление чрез димиране на светлинния поток," 2014.
- [3] А. Пачаманов, П. Стоев, К. Христов, Д. Кайцанов, "Управление на улично осветление при съвместна работа на конвенционални и LED-осветители," *Годишник на Технически Университет - София*, vol. кн . 3, no. т. 64, pp. 297–306, 2014.
- [4] E. Standard, *BDS EN 13201-2*. 2013.
- [5] Н. Рац and А. Пачаманов, "Изследване на възможностите за димиране на натриеви лампи с високо налягане," *XII Национална конференция по осветление с международно участие Осветление'2004 15-17 Юни 2004, Варна, България*, pp. 179–184, 2004.
- [6] Н. Матанов, П. Стоев, and А. Пачаманов, "Моделиране работата на газоразрядни лампи с високо налягане при димиране с автотрансформатор," *Годишник на Технически Университет - София*, vol. кн . 4, no. т. 64, pp. 295–304, 2014.
- [7] А. Я. Кунгс, "Автоматизация управления электрическим освещением," *Москва, Энергоатомиздат*, p. 112, 1989.
- [8] IESNA, *IESNA Lightning Handbook*. 2018.

Автор: Петър Стоев, ас инж., катедра "Електроснабдяване, Електрообзавеждане и Електротранспорт", Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: pstoev@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: гл. ас. д-р Камелия Николова

НОРМИРАНЕ НА БИОДИНАМИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ. АКТУАЛНИ РАБОТНИ ГРУПИ, НОРМИ И ПРЕПОРЪКИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА БИОДИНАМИЧНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ ВЪВ ФЕДЕРАЛНА РЕПУБЛИКА ГЕРМАНИЯ

Божидар Гълъбов

Резюме: Прилагането на теоретичните препоръки за Human Centric Lighting в практическото проектиране на осветителни уредби е едно от актуалните предизвикателства както за производителите, така и за комисиите за нормиране на изкуственото осветление. Доказателство за това са разгледаните от автора конкретни норми и препоръки за проектиране на биодинамични осветителни уредби, които представляват първите стъпки за въвеждане на биодинамичното осветление за широко ползване в ежедневието. Разгледаните норми все още имат препоръчителен и незадължителен характер, тъй като засега не са част от закона за строителството в Република Германия. Въпреки това те за първи път обобщават многобройните теоретични изследвания и научни трудове в областта на биодинамичното осветление и за първи път въвеждат конкретни величини, формули и таблици за изчисление и примерни препоръки за проектиране.

Ключови думи: норми, препоръки, проектиране, Human Centric Lighting

STANDARDIZATION OF BIOLOGICALLY EFFECTIVE LIGHTING. RESEARCH GROUPS, STANDARDS AND RECOMMENDATION FOR DESIGNING OF BIOLOGICALLY EFFECTIVE LIGHTING SYSTEMS IN GERMANY

Bozhidar Galabov

Abstract: Applying the theoretical recommendations for Human centric lighting in the practical design of lighting systems is one of the current challenges both for lighting manufacturers and lighting commissions. Proof of this is the specific norms and recommendations for the design of Human centric lighting systems, which are the first steps for the introduction of this kind of lighting systems for a wide use in everyday life. The examined standards are still of a non-binding nature, as they are not yet part of the building construction law in Germany. However, for the first time, they summarize the numerous theoretical research and scientific papers in the field of biodynamic lighting and for the first time introduce specific formulas, calculation tables and sample design recommendations for Human centric lighting.

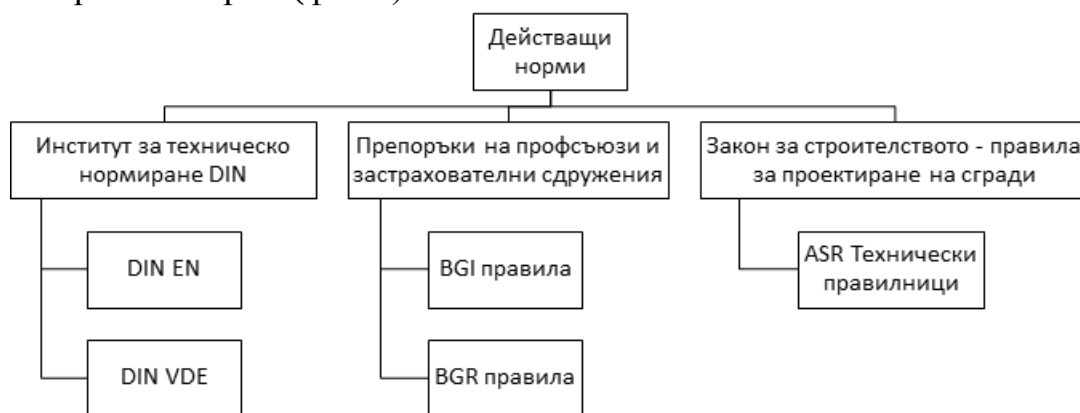
Keywords: standards, recommendations, Human Centric Lighting.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Нормирането на изкуственото осветление е една от преките последици от изследванията на влиянието на осветлението на работните места, които започват още в края на 19-ти век. Както главните цели на изследванията на изкуственото осветление, така и самите норми за осветеност и проектиране на осветителни уредби се променят значително във времето. Докато научните изследвания през първата половина на двадесети век се концентрират върху нормиране на достатъчна осветеност за упражняване на работна дейност с цел безопасност и работоспособност, то по-късните изследвания насочват все повече вниманието си към индивида и ергономичността на осветителните уредби. Целта е постигане на работна среда, която е максимално благоприятна, предразполагаща и адаптирана към личните нужди от светлина на индивида. Затова и нормирането и препоръките за проектиране на осветителни уредби все повече се съобразяват и следват резултатите от изследванията в областта на биодинамичното осветление - Human Centric Lighting. Република Германия е една от водещите държави в нормирането на осветление както при ранните изследвания в началото на двадесети век, така и днес при нормирането на осветителни уредби с „биологично“ действие.

2. ДЕЙСТВАЩИ НОРМИ И ПРЕПОРЪКИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ В РЕПУБЛИКА ГЕРМАНИЯ

Действащите норми за осветлението в Република Германия могат да бъдат разделени в три категории (фиг.1):



Фиг.1. Основни групи норми и препоръки в Република Германия

Основните технически норми на немския институт за нормиране (частично хармонизирани с европейското право), свързани с проектирането на изкуствено осветлението са: DIN EN 12665 - „Светлина и изкуствено осветление. Основни понятия и критерии за поставяне на изисквания към изкуственото осветление; DIN 5034 - „Дневна светлина в работни помещения“; DIN 5035 - „Осветление с изкуствена светлина“; DIN EN 12193 - „Светлина и осветление - осветление на спортни комплекси“; DIN EN 12464 - „Светлина и осветление. Осветление на работни места“; DIN EN 15193 - „Енергийна оценка на сгради - енергийни изисквания за осветление“; DIN 13201 - „Улично осветление“; DIN 67523 - „Осветление на пешеходни пътеки с допълнително осветление“; DIN 67524 - „Осветление на транспортни тунели и подлези“. Тези норми представляват базата за правилно проектиране на осветителни уредби с цел постигане на оптимална осветеност или яркост върху ра-

ботната повърхност или пътната настилка. Освен нивото на осветеност върху работната повърхност DIN EN 12464 нормира и така наречения фактор на психологично заслепяване (UGR - CIE Unified Glare Rating) и дава общи препоръки за проектиране с цел спазване на оптимални нива на важни фактори като разпределение на яркостта в помещенията, пространствена осветеност и позиция на осветителите, разнообразие на цветната температура, цветоподаване, заслепяване, предотвратяване на стробоскопичен ефект и др. Спазването на тези фактори допринася за ергономичността на осветителната уредба, но не се съобразява с така нареченото невизуално въздействие на светлината върху човека и нужния биологичен светлинен оптимум. Тъй като тези фактори стават все по-значими за проектирането на осветителни уредби, особено в дадени типове сгради и учреждения (напр. училища или домове за възрастни хора), то немският институт за нормиране издава през 2009 и 2013 правилници, които са основите за проектиране на осветителни уредби с отчитане на невизуалните ефекти на светлината върху човешкия организъм.

3. CIE 158, DIN SPEC 5031-100 И DIN SPEC 67 700. ИМА ЛИ РАЗЛИКА С ДОСЕГАШНИТЕ НОРМИ?

3.1. CIE 158

Още в края на деветдесетте години, CIE започва критично да се занимава с въпроса какво е качествено осветление и дали нормите трябва да бъдат променени в посока по-висока ергономичност и индивидуалност спрямо наблюдателя (фиг.2)



Фиг.2. Модел на Виетч (Виетч 1998) за качествено осветление, симпозиум на CIE, Канда 1998 [6]

Във връзка с горепосочените изисквания за качество на светлината CIE издава публикацията 158, в която се разглеждат подробно резултатите от научните проучвания, особено в областта на невизуалните светлинни ефекти върху човека. Авторите стигат до заключението, че невизуалните ефекти са неоспорими и трябва за в бъдеще да се имат предвид при проектирането на осветителни уредби [2]. Комисията също разглежда и основните приложения на осветителни уредби с биологично действие като активиране на процесите в организма и засилване на концентрацията, увеличаване на работоспособността, положително

влияние върху настроението, изместване на циркадната система (работа на сменни или така наречения „jet lag“), третиране на сезонни заболявания и депресии със светлина, лекуване на сънни заболявания и дори използването на светлина при терапиите на алцхаймер и деменция.

CIE 158 набляга на факта, че една ефективна биодинамична осветителна уредба трябва задължително да вземе предвид възрастта и зрителната способност на наблюдателя и обстановката, в която той се намира, тъй като тези фактори имат голямо значение за постигането на дадена осветеност на ретината и съответно невизуален светлинен ефект.

3.2. DIN SPEC 5031-100

Нормата DIN SPEC 5031-100 има за цел да определи и въведе методи и подходи за спектралната оценка на оптичното лъчение с невизуален ефект. Тя разглежда видимия диапазон от спектъра като въвежда препрадки и цитати към други основни норми, които отделно разглеждат лъчения в ултравиолетовия и инфрачервения диапазон. Като невизуални ефекти нормата цитира следните въздействия на светлината върху човешкия организъм: потискане отделянето на мелатонин; ефекти върху терморегулацията на организма; ефекти върху бдителността; промяна на фазите на циркадната система; промяна на мозъчната активност.

Тъй като горе посочените ефекти в литературата се описват като „биологично действие“ на светлината, а и самият зрителен процес реално погледнато също е биологичен ефект на светлината, то нормата въвежда нов термин за този тип ефекти – меланопично въздействие на светлината (т.е. реакция на организма предизвикана от сигналите приемани от ганглийните клетки на очната ретина, съдържащи меланопсин открити през 2001 година [1]). Още в увода авторите на нормата разграничават ясно оптичната светлинна спектрална чувствителност $V(\lambda)$ (която в тази норма не се разглежда – за повече информация $V(\lambda)$ виж DIN 5031-3) и меланопичната спектрална чувствителност на окото $X(\lambda)$. Нормата официално въвежда термини и фактори свързани с невизуалните ефекти на светлината. Най-важните от тях са:

Големина на меланопичното лъчение (*melanopic radiant quantity*)

$$X_{mel} = \int_{\lambda_d}^{\lambda_r} X(\lambda) \cdot S_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda,$$

където: X_{mel} – големина на меланопичното лъчение; $X(\lambda)$ – спектралната големина на цялостното лъчение; $S_{mel}(\lambda)$ – спектрална чувствителност с меланопично действие; λ_d, λ_r – долна и горна граница на дължината на вълната с меланопично действие.

Фактор за меланопичен ефект (при лъчение във видимия спектър) (en: *melanopic factor (of luminous radiation)*)

$$a_{mel,v} = \frac{\int_{\lambda_d}^{\lambda_r} X(\lambda) \cdot S_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_d}^{\lambda_r} X(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda},$$

където: a_{mel} – фактор за меланопичен ефект; $V(\lambda)$ – спектрална светлинна чувствителност при дневно зрение;

Меланопичен добив (при лъчение във видимия спектър) (en: *melanopic efficacy (of luminous radiation)*)

$$K_{\text{mel},v} = \frac{\int_{\lambda_d}^{\lambda_r} X\lambda(\lambda) \cdot S_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \cdot \int_{\lambda_d}^{\lambda_r} X\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda},$$

където: $K_m = 683 \text{ lm/W}$ – максимална стойност на фотометричния радиационен еквивалент за дневно зрение

Корекционен коефициент за отчитане намаляване на пропускливостта на зрителния орган спрямо възрастта (тъй като формулите без корекционен коефициент са за наблюдател на възраст 32 години) (en: *correction factor for age-related reduction of the transmission of ocular media*)

$$K_{\text{mel,tran}(A)} = \frac{\int_{\lambda_d}^{\lambda_r} X\lambda(\lambda) \cdot \frac{\tau(\lambda,A)}{\tau(\lambda,A=32)} \cdot S_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_d}^{\lambda_r} X\lambda(\lambda) \cdot S_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda},$$

където: $\tau(\lambda, A)$ - спектрална пропускливост на зрителния орган за възраст A (определена по таблици).

3.3. DIN SPEC 67 700

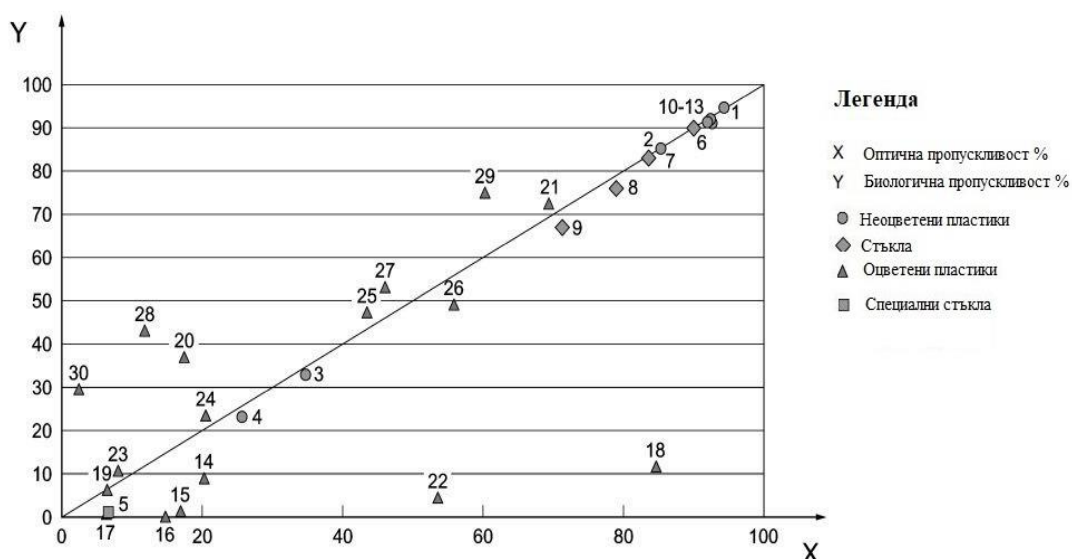
Нормата DIN SPEC 67 700 надгражда върху резултатите и вече разгледаните проблеми в нормата DIN SPEC 5031-100. Нормата е създадена за да бъде запълнена липсата на конкретни препоръки за проектиране на осветителни уредби с отчитане на „биологичното“ въздействие на светлината върху човека. Целта е всяка осветителна уредба да бъде така проектирана, че максимално да подпомага циркадната система и следователно да влияе благоприятно върху производителността и концентрацията на работниците, като същевременно подобрява регенерацията във фазите на почивка.

От перспективата на авторите сегашните норми за проектиране и построените осветителни уредби в офиси и други сгради не могат да задоволят човешкия организъм, негови важни биологични системи и нуждата от естествена светлина (или нейния спектрален състав). Тъй като технологично изкуственото осветление може да бъде до голяма степен напаснато на циклите на естественото осветление, то според авторите невизуалните ефекти на светлината задължително трябва да бъдат вземани предвид при проектирането на осветителни уредби.

Нормата обобщава важните величини за постигане на максимален биологичен ефект. Така например при проектиране трябва да се обърне особено внимание на използваните материали в осветителните тела, например за изработка на рефлектори и разсейватели. Тъй като всеки материал има различна спектрална пропускливост (фиг.3), то е важно да се знае как различните материали влияят на така наречения меланопичен фактор (виж 3.1.). Затова нормата класифицира различните материали и тяхното влияние върху споменатия фактор според формулата:

$$K_{\text{mel,пропуск.}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X\lambda(\lambda) \cdot \tau(\lambda) S_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X\lambda(\lambda) \cdot S_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda},$$

където: $X_\lambda(\lambda)$ – спектралната големина на цялостното лъчение; $S_{\text{mel}}(\lambda)$.- спектрална чувствителност с меланопично действие; λ_1, λ_2 – долна и горна граница на дължината на вълната с меланопично действие според нормата DIN SPEC 5031-100



Фиг.3. Промяна на лъчението спрямо използването на различните материали за разсейвател на осветителното тяло (за стандартен източник F11)

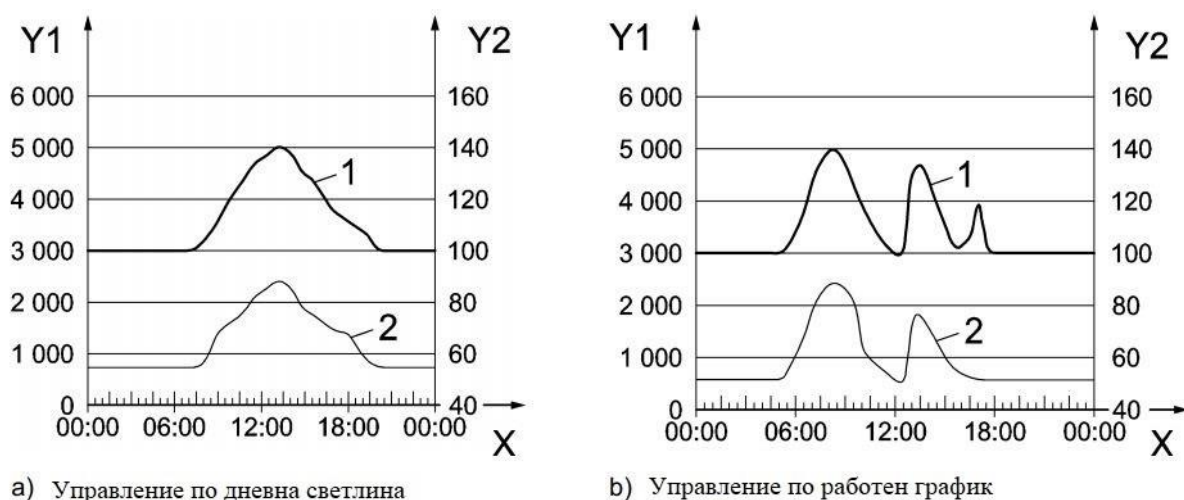
За биологичното въздействие на светлината също така голямо значение има и промяната на лъчението на отражение спрямо използваните материали в помещението:

$$K_{mel,pefl} = \frac{\int_{\lambda_d}^{\lambda_g} X\lambda(\lambda) \cdot \rho(\lambda) S_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_d}^{\lambda_g} X\lambda(\lambda) \cdot S_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda},$$

където: $X_\lambda(\lambda)$ – спектралната големина на цялостното лъчение; $S_{mel}(\lambda)$ – спектрална чувствителност с меланопично действие; λ_d, λ_g – долна и горна граница на дължината на вълната с меланопично действие.

Освен промяната на лъчението при проектиране на осветителни уредби трябва да се има предвид и позицията на източниците и ъглите на попадане на светлината върху ретината, тъй като те имат значително влияние върху биологичната ефективност на осветителната уредба.

Препоръчва се изкуствената светлина да следва или кривата на дневната светлина или тази на дневния работен график и съответното натоварване по часове (фиг.4)



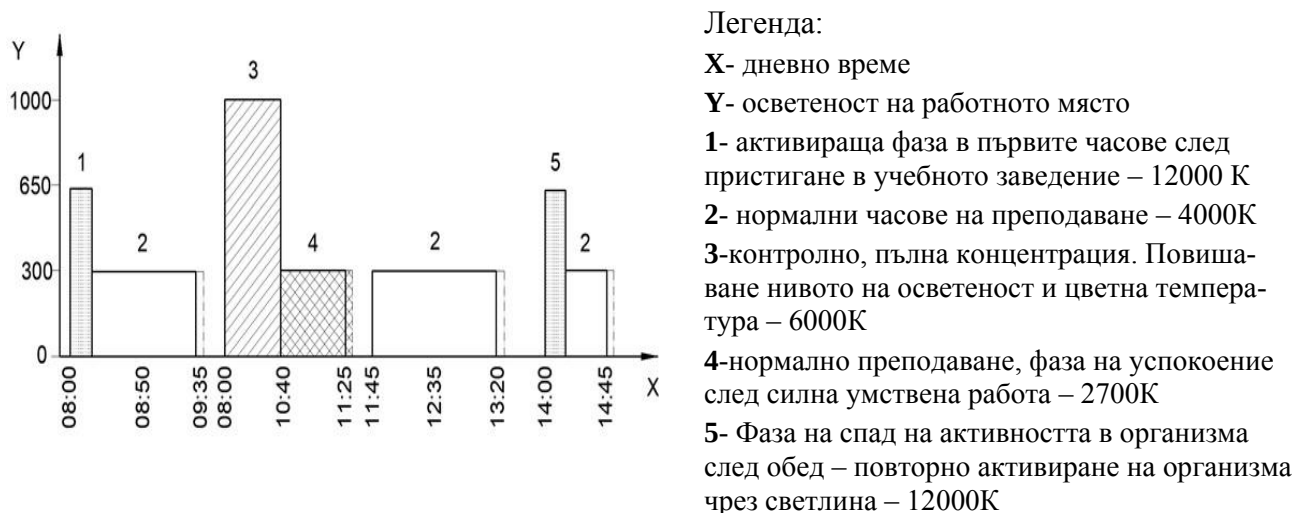
а) Управление по дневна светлина

б) Управление по работен график

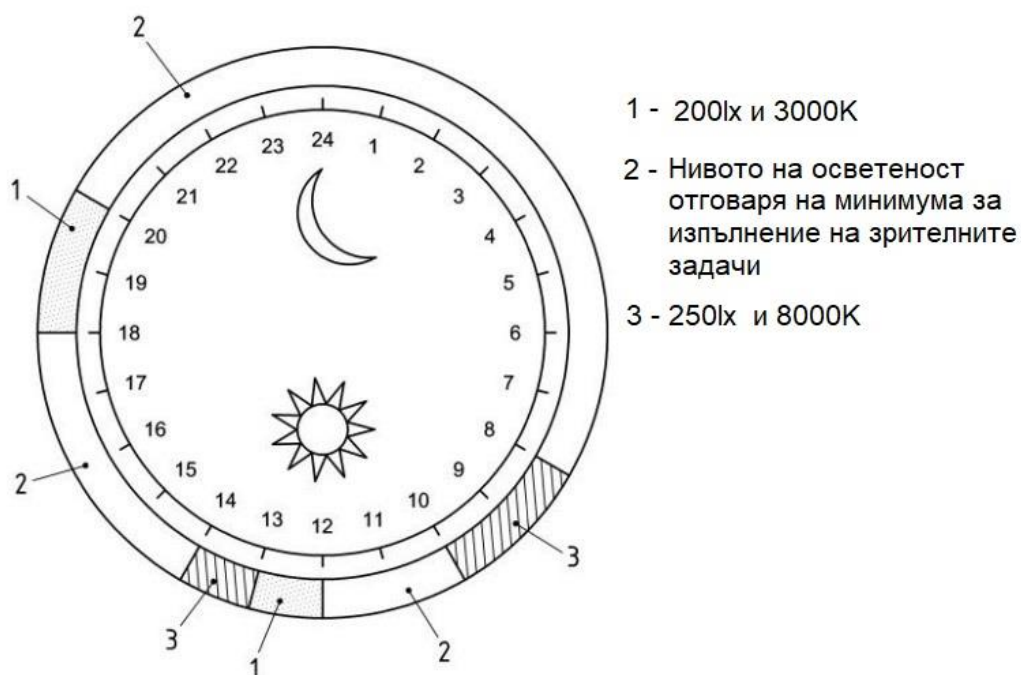
Легенда: X-дневно време; Y1-най-близка цветна температура в К; Y2-осветеност в %; 1-крива на най-близка цветна температура; 2-крива на осветеност в %;

Фиг.4. Пример за биодинамично управление на осветлението в зависимост от дневния часови график

Освен вече посочените фактори нормата набляга и на голямото значение на продължителността на светлинната експозиция. Тоест смислено е нормата да се прилага за уредби, при които проектантът предварително знае, че хората са изложени продължително на желаното лъчение с биологичен ефект. Като такива обекти нормата разглежда примери за учебно заведение, офис сгради и домове за стари хора. Осветителната уредба в учебни заведения трябва да подпомага изпълнението на интензивни умствени процеси, свързани с висока концентрация. Според авторите на нормата това може да бъде постигнато най-добре чрез управлението на осветлението спрямо натоварването и задачите които трябва да бъдат изпълнени (фиг.5)



Фиг.5. Примерни графици на биодинамичното осветление в класните стаи на учебно заведение според DIN SPEC 67 700

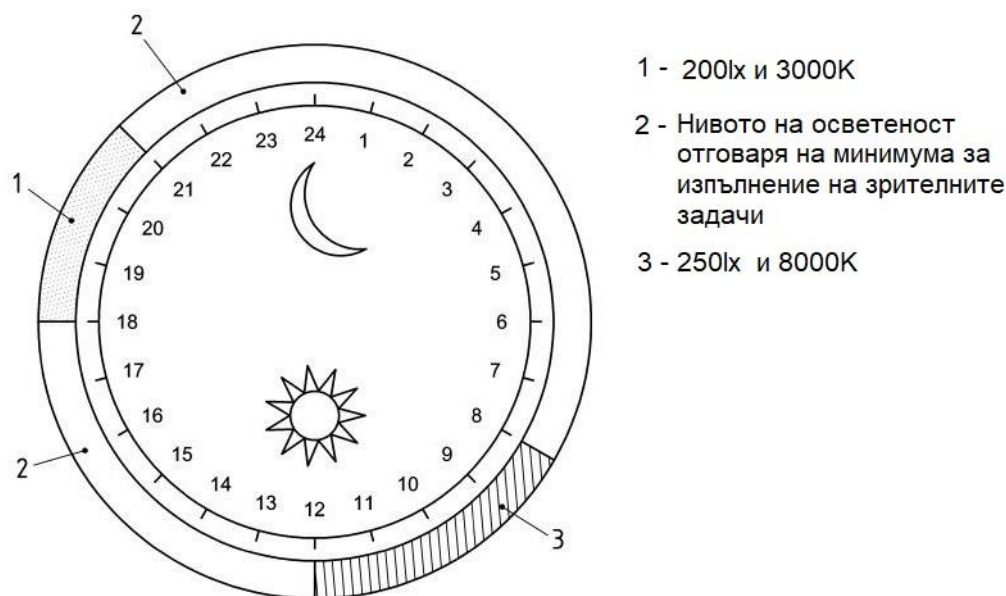


Фиг.6. Примерни графици на биодинамичното осветление в административни сгради (вертикална осветеност на окото в lx)

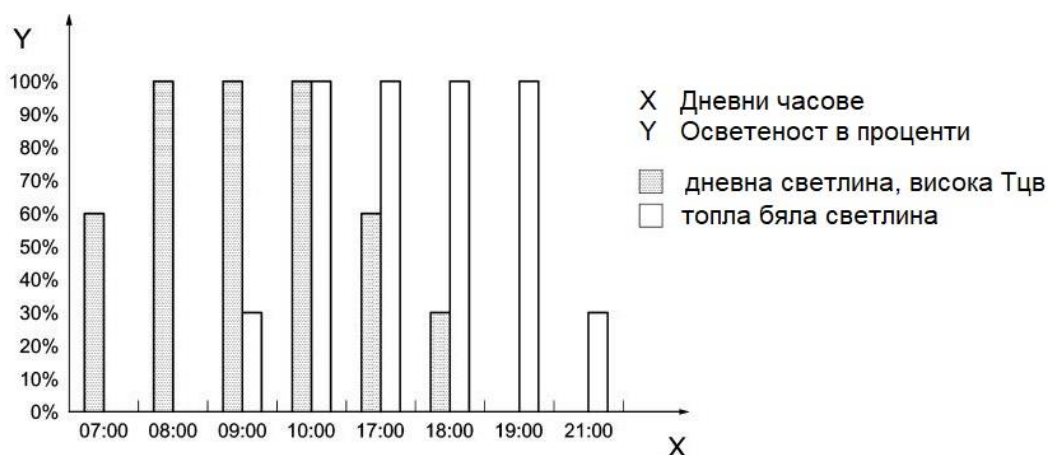
По същия начин могат да бъдат направени и графици за вечерни училища. При тях трябва да се отчете факта, че възрастовата група на наблюдателите е раз-

лична от тази в дневните училища, и че правилно проектираните биодинамични осветителни уредби подпомагат циркадната система, а не да работят напълно срещу нея. Т.е. във вечерните училища не е препоръчително използването на бяла светлина над 4000 K. Примерен график за биодинамично осветление в административни сгради е даден на фиг.6

Освен по часове проектирането на биодинамични осветителни уредби в административни сгради трябва да се извършва и според предназначението на отделните помещения. Задължително трябва да се разграничават офиси, помещения за хранене, помещения за почивка, коридори, чакални и т.н. Същите условия важат и при проектирането на домове за стари хора, като фазите на активиране са значително по дълги (фиг.7 и фиг.8)



Фиг.7. Примерни графици на биодинамичното осветление в дом за стари хора (вертикална осветеност на окото в lx)



Фиг.8. Примерни сцени на биодинамичното осветление в дом за стари хора за цветната температура

Препоръките за осветление в нормата DIN SPEC 67 700 се дават във вертикално осветление на ретината. Тези препоръки са трудно изпълними, защото нивото на вертикална осветеност зависи от най-различни динамични фактори - позицията на наблюдателя и ъгъла на падане на светлината, съставката на падащата

в помещението дневна светлина и др. Ето защо са нужни още изследвания и разработването на метод за извеждане на формула за хоризонтално осветление на работната повърхност с биологично действие.

4. РАБОТНИ ГРУПИ В РЕПУБЛИКА ГЕРМАНИЯ

Откриването на биологичните хормонални ефекти на светлината върху човешкия организъм води до редица научни изследвания и силно присъствие на темата в научните среди в Република Германия. Научните среди и правителството реагират със създаването на работни групи, които изследват проблема отблизо. Първата работна група е така наречената работна група NA 058-00-27 AA „Ефекти на светлината върху човека“. Групата принадлежи към комитата по стандарти „светлинна техника“ към немския институт за стандартизиране DIN. Основната цел на тази група е разработването на норми и препоръки за проектиране на осветителни уредби, които отчитат биологичното въздействие на светлината върху човека.

Паралелно немското правителство създава и собствена държавна работна група към Министерството на труда и социалните въпроси. Тази работна група е известна като „Комисия по защита на труда и стандартизация“ и също така интензивно наблюдава научния и изследователски процес в сферата на светлотехниката, специалните ефекти на светлината в работните среди и работата на института за нормиране DIN. Комисията досега издава няколко труда, които уточняват, критикуват и като цяло представят позицията на правителството по темата, а именно че проблемът за правилното проектиране е актуален и е нужна както интензивна научна работа в областта, така и конкретни норми за проектирането на биодинамични осветителни уредби.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С издаването на DIN SPEC 5031-100 и DIN SPEC 67 700 за първи път немският институт за нормиране се опитва да създаде реална и еднозначна терминология за основните понятия в така наречения Human Centric Lighting. Нормите въвеждат и редица величини и формули за тяхното изчисляване, свързани с невизуалните ефекти на светлината върху човешкия организъм. По този начин се създава платформа, която дава възможност за директно сравнение на научните изследвания, трудове и публикации в областта. Освен въвеждането на нова терминология, авторите на нормите представят таблично стойностите не само на различните величини с меланопичен ефект, но и на всички изчислителни и корекционни фактори. Задаването на готови стойности улеснява пресмятането и бъдещите научни изследвания в тази насока и премахва нуждата от сложни изчисления на интегрални уравнения. В заключение нормите дават информация за възможните области на приложение, но без разглеждане на конкретни примери.

Резултатите и препоръките в нормите DIN SPEC 5031-100 и DIN SPEC 67 700 са важна стъпка към създаването на единни правила за проектиране. Въпреки това те трябва да се разглеждат критично, тъй като изследванията в тази област продължават, поради което нормите все още не са въведени като задължителни от немския строителен закон.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brainard, George C., Hanifin, J.P., Greeson, J.M., et al. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans (2001): Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. The Journal of Neuroscience, 21(16):6405-6412
- [2] CIE 158, Ocular lighting effects on human Physiology and behavior, 2009
- [3] DIN SPEC 5031-100, Optical radiation physics and illuminating engineering- Part 100: Melanopic effects of ocular light on human beings - Quantities, symbols and action spectra, 2009
- [4] DIN SPEC 67 600, Biologically effective illumination -Design guidelines, 2013
- [5] Kavita Thapan, Josephine Arendt and Debra J. Skene: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. Journal of Light and Physiology 535.1, 2001, 261-267
- [6] Vietch, J.A., Julian, W. and Slater, A. I., A framework for understanding and promoting lighting quality. In J.A. Vetich (ed.), Proceedings of the First CIE Symposium on Lighting Quality, CIE 1998, 237-241, 1998

Автор: Божидар Гълъбов, инж. маг. докторант, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: galabov.sng@gmail.com

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: гл. ас. д-р Димитър Павлов

ВЛИЯНИЕ НА ВЪЗРАСТТА И ПОЛА ВЪРХУ ЗРИТЕЛНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЧОВЕКА ПРИ HUMAN CENTRIC LIGHTNING

Божидар Гълъбов

Резюме: Статията разглежда основните връзки между стареенето на зрителния орган и нарушаването на зрителни характеристики и циркадните ритми. Авторът разглежда основните методи за изследване промените в зрителния орган вследствие на неговото стареене, като категоризира същите в две основни групи спрямо постановката на експеримента и неговата научна обективност. Разгледаните изследвания установяват значително влошаване на зрителните характеристики вследствие стареенето на зрителния орган, независимо от използвания тип светлинен източник. Увеличението на осветеността води до частична компенсация на влошените зрителни характеристики. Невизуалните зрителни функции на зрителния орган и мозъка също отслабват значително с напредване на възрастта. Частична компенсация и стимулация на тези функции може да бъде постигната чрез промяна на спектралния състав (увеличаване на синята съставка) на светлинния източник.

Ключови думи: Възраст, пол, светлинно въздействие, работоспособност, настроение, тонус, Human Centric Lighting

AGING AND GENDER EFFECTS ON VISUAL FUNCTIONS FOR HUMAN CENTRIC LIGHTING

Bozhidar Galabov

Abstract: The article discusses the main links between aging of the visual organ and disturbance of visual characteristics and circadian rhythms. The author analyzes the basic methods for examining changes in the visual organ, categorizing those in two main groups with respect to the experimental design and its scientific objectivity. The studies examined revealed a significant deterioration in the visual characteristics due to the aging of the visual organ irrespective of the type of light source used. The increase in illumination leads to partial compensation of the deteriorated visual characteristics. The non-image forming brain functions also diminish significantly with age. Partial compensation and stimulation of these functions can be achieved by changing the spectral composition (blue component gain) of the light source.

Keywords: age, gender, lighting, illuminance, visual performance, work performance, mood, Human Centric Lighting

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Връзката между възрастта на наблюдателя и неговото светлинно възприятие може да бъде описана от две основни групи ефекти и взаимодействия - директно влияние

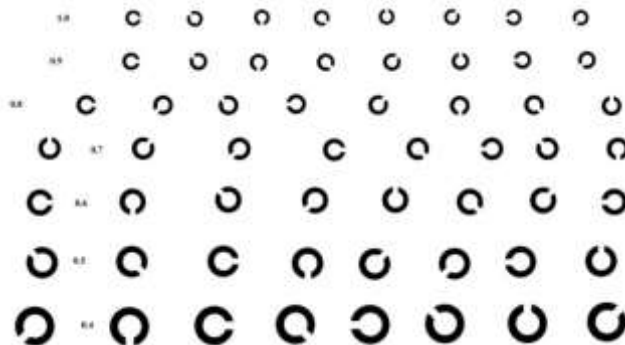
върху основното зрително възприятие, дължащо се на промяната на основните зрителни характеристики (зрително поле, прагова яркостна разлика, вероятност на различаване, прагов контраст, яркостен контраст, разделителна способност и др. [27] и второстепенно (биологично) влияние върху наблюдателя, отразяващо се в промяна на настроението, тонуса и невизуалните функции на зрителния орган и мозък. Първата група зависимости и нейните следствия са обект на дългогодишни научни изследвания, които започват още в началото на втората половина на миналия век и поставят основите на модерното нормиране на нивата на осветеност, спрямо различни дейности (вземайки предвид негативните влияния на стареещия зрителен орган) [20,27,28]. Тъй като до средата на 20 век изследванията, нормирането и препоръките за осветеност на работните места се базират на изследвания предимно с млади, работоспособни хора[3,20], то много от учените започват да се запитват, дали препоръките за проектиране на осветителни уредби отразяват нуждите не само на различните работни дейности, но и на различните възрастови групи. Изследванията с хора в напреднала възраст показват, че възрастта засяга сериозно структурите и биологичните функции на зрителния орган, вследствие на което настъпват такива промени, които влияят негативно на основните зрителни характеристики [8,12,23,27]. Тези промени започват от около 30 годишна възраст и се задълбочават до средата на петдесетте. След тази възраст следва внезапен спад на остротата на всички зрителни характеристики, който най-често се наблюдава около 60 годишна възраст[12]. Научните изследвания на пряката връзка между възраст и зрителни характеристики се задълбочават през 70-те и 80-те години, като учените успяват да докажат, че ефектите на стареенето засягат и други основни функции на зрителния орган като цветното възприятие и способността на различаване на цветове и нюанси [3]. Cooper, Hodge и Verriest задълбочават изследванията на цветното възприятие и потвърждават по-ранните наблюдения от 80-те и 90-те години на миналия век. [7,12,26]. Вследствие на горепосочените дългогодишни опити и експерименти за установяване на ефектите на възрастта върху зрението, нормите за проектиране на изкуственото осветление се променят значително, като се вземат предвид и резултатите и заключенията от тестовете с различни възрастови групи. Втората група следствия от стареенето на зрителния орган – биологични или невизуални (Non-Image-Forming-NIF) започват да бъдат изследвани интензивно началото на 90-те години [9]. Работата в тази насока продължава и до днес, като този аспект получава все по-голямо значение и започва бавно да навлиза в нормирането и препоръките за проектиране на осветителни уредби. Днес при проектиране на осветителни уредби се добавя и допълнително условие за ергономичност на уредбите - така наречената Human Centric Lighting.

2. МЕТОДИ ЗА УСТАНОВЯВАНЕ НА ПРОМЕНЕТЕ НА ЗРИТЕЛНИЯ ПРОЦЕС СПРЯМО ПОЛА И ВЪЗРАСТТА, РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНИЯТА

2.1. МЕТОДИ ЗА УСТАНОВЯВАНЕ НА ПРОМЯНАТА НА ЗРИТЕЛНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

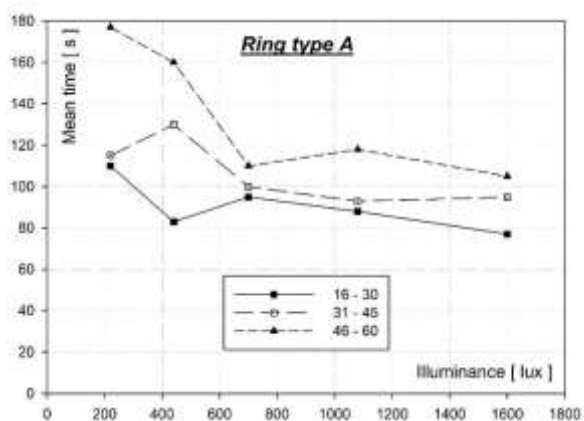
Класическите методи за анализиране на зрителните характеристики могат да бъдат разделени на три основни групи - експериментално-статистически чрез еднотипна

зрителна задача, експериментални с отчитане на полевите работни условия и смесени методи. Резултатите от експерименталните методи с еднотипни задачи се получават от прости постановки, които дават ефективни резултати за зрителните характеристики. Експериментите и анкетите са сравнително лесни за провеждане [20]. Един от основните експерименти с еднотипна задача е този с колелцата на Ландолт [27]

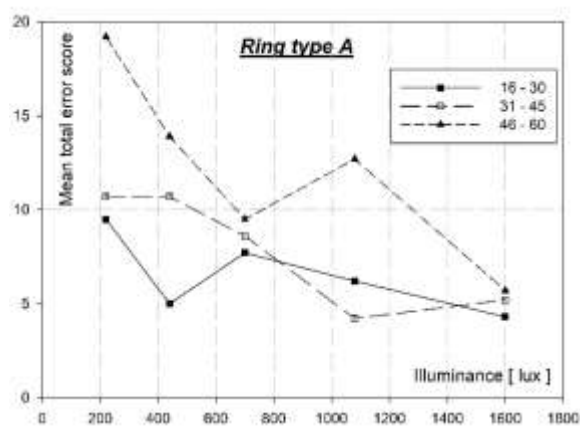


Фиг.1. Колелца на Ландолт

Един от първите изследователи, които използват този метод за установяване на зависимостите между стареенето и зрителните функции е американският учен Уестън [28]. Експериментът протича сравнително просто, като биват отчитани верните попадения на разпознаване на отвора колелцата на Ландолт за различни възрастови групи и при различно ниво на осветеност. Резултатът от експериментите (фиг.2) дава силна зависимост между верни попадения и възрастова група и верни попадения и ниво на осветеност - с напредване на възрастта и намаляване на нивото на осветеност грешките на разпознаване нарастват значително.



Фиг.2. Вярно разпознаване на колелца на Ландолт спрямо възрастта



Фиг.3. Грешки при разпознаване на колелца на Ландолт спрямо възрастта

Уестън установява също, че дори при едно и също ниво на осветеност с увеличаване възрастта на наблюдателя, грешките от наблюденията на участниците се увеличават значително. За Уестън това еднозначно доказва връзката между възраст на зрителния орган и влошаване на неговите зрителни характеристики (фиг.3) [28]. С увеличение на нивото на осветеност, грешките при възрастните участници в експеримента намаляват значително. Въпреки добрите резултати на метода с поставяне на предварително зададена еднотипна зрителна задача, той бива критикуван, тъй като не взема предвид странични ефекти от действителните полски задачи в работни условия. Затова Щенцел и Зомер [24], предлагат друг подход, който

то е тясно ориентиран към практическите дейности в работната среда, чрез предварителен полеви анализ. За анализа те се стремят да пресъздадат с максимална точност процесите и зрителните задачи на определена работна дейност в лабораторни условия с цел да бъдат отчетени и специфичните за дейността странични влияещи фактори. По този начин Щенцел стига до заключението, че не всички области и работни дейности биват така силно засегнати от възрастта, както по-рано установява Уестън, тъй като за някои работи дори влошените зрителни характеристики са напълно достатъчни за упражняване на дейността [24]. Включвайки резултатите от горепосочените изследвания, Бойс [2,3] за първи път прави анализ, който дава директна и критична съпоставка между двата метода. За собствените научни изследвания Бойс се опитва да комбинира двата метода с цел по-точни резултати. Вследствие на това сравнение и комбинацията между методите, той потвърждава значителните различия в резултатите от различните типове експерименти. Например някои полеви задачи (като работа на поточна линия) не показват силна зависимост от възрастта и нивото на осветеност. Бойс развива своята теория във втората половина на 20 век, като взема предвид и влиянията на цветопредаването на светлинните източници (което по това време е изключително важен критерий поради наличието на светлинни източници със много лошо цветопредаване) и цветното възприятие на наблюдателя спрямо неговата възрастовата група [3]. За установяване на зависимостта между възрастта на наблюдателя и цветното възприятие Купър използва така наречения „нов Цветови тест на Лантони“ [7,19], който отчита също и загубата на способността за различаване на цветовете спрямо яркостта. Недостатък на експеримента на Купър е използването само на един тип светлинен източник - стандартно тяло С (близо до познатото днес като D65- 6774 K). За отчитане влиянието и на други светлинни източници Хедж [12] използва широко разпространения метод на Ишихара състоящ се от 24 цветни табла съставени от цветни точки, в които са разположени цифри с друг цвят. Хедж също така разширява обема на експеримента като включва и светлинни източници с различна цветна температура и цветопредаване. Резултатите от научните изследванията на Хедж показват, че възрастта оказва значително по-силно влияние на цветното възприятие отколкото дори различните светлинни източници с различен индекс на цветопредаване (в експеримента се използват източници Warmwhite CRI 52 и SP30 CRI 70) [12].

2.2. МЕТОДИ ЗА УСТАНОВЯВАНЕ ПРОМЯНАТА НА НЕВИЗУАЛНИТЕ ФУНКЦИИ НА ЗРИТЕЛНИЯ ОРГАН И МОЗЪКА СВЪРЗАНИ СЪС СВЕТЛИНАТА

Наред с основните зрителни функции, светлината оказва и значително действие върху невизуални мозъчни функции влияещи на така наречената циркадна система (вътрешна система при човека отговорна за биологичния ритъм на организма) [9]. Ето защо днес учените изследват интензивно евентуалното влияние на възрастта върху тези „второстепенни“ функции на зрителния орган. От особено значение е отслабването на чувствителността на зрителния орган към късовълновия участък на синята светлина (около 470nm) с напредване възрастта на наблюдателя [9,21]. Този участък от спектралния състав на светлината има

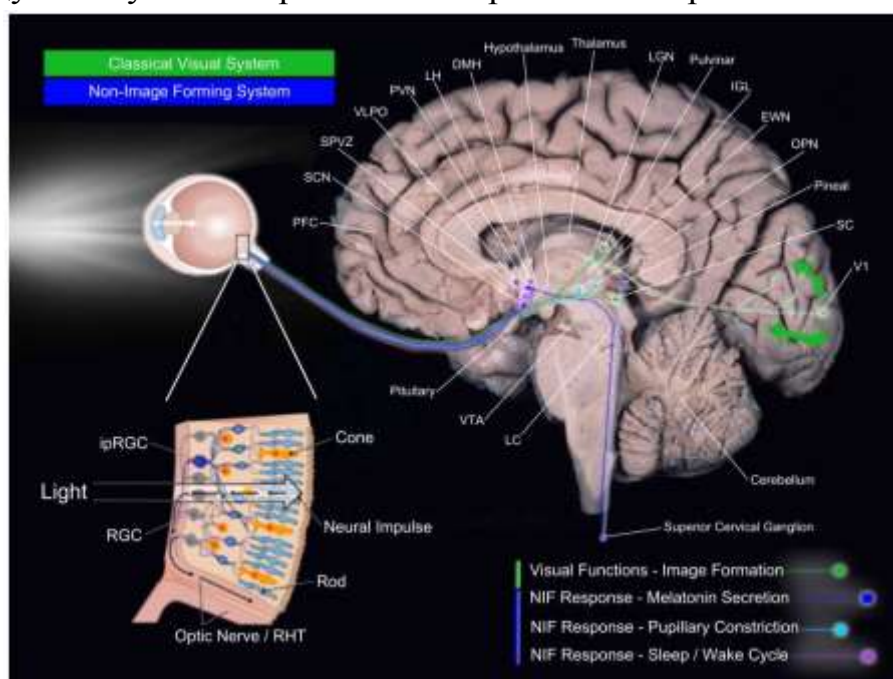
особено голямо значение и влияние върху тези части на мозъка, които са отговорни за отделянето на хормони и за чувството на будност и тонус, но също така и за регулирането на когнитивните мозъчни функции [9]. Тези невизуални ефекти се разглеждат от учените като Non-Image-Forming functions (NIF) и са в основата за проектиране на Human Centric Lighting осветителни уредби. Това са осветителни уредби, които насочено подпомагат естествените биологични процеси в тялото. Отслабването на способността за възприятие на лъчение с дължина на вълната около 470nm се обяснява също така и със стареенето на нервните пътища, водещи към мозъка и предаващи сигналите от зрителния орган към центровете отговорни за отделянето на хормони [9]. Методите за анализиране на промените на незрителното възприятие могат също да бъдат разделени на две групи – аналитично-статистически (изследвания на различни възрастови групи от доброволци и анализиране на попълнени от тях анкети преди и след експеримента) и обективно-експериментални (конкретни наблюдения на телесни и мозъчни показатели по време на експеримента, които биват изследвани обективно по медицински път). Тъй като невизуалните ефекти върху настроение, тонус и др. са субективни критерии, то по-голямата част от научните трудове в тази област се базират на първия метод. Основен недостатък на метода е неговата частична субективност и зависимост на резултатите от конкретните субективни лични критерии на индивидите, участващи в експеримента. Стремежа на учените е статистическото изключване на субективността чрез увеличаване обема на извадката. За изследване на настроения най-често бива използван така наречения PANAS (Positive Affect - Negative Affect Schedule) Модел, разработен в САЩ още през 1988г. Моделът се състои в това, че за двете възможности „добро настроение“ или „лошо настроение“ се задават по десет описателни термина, всеки от които при попадение в анкетата носи различен брой точки.

Median Varimax-Rotated Factor Loadings of the Positive and Negative Affect Schedule (PANAS) Descriptors Across the Six Solutions

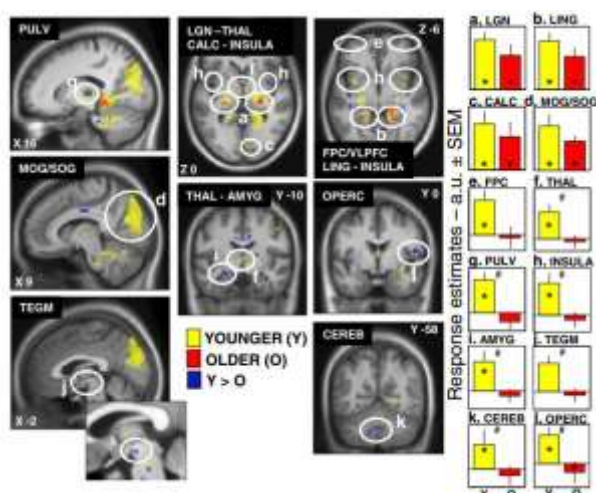
PANAS descriptor	Loading on	
	Positive Affect	Negative Affect
Enthusiastic	.75	-.12
Interested	.73	-.07
Determined	.70	-.01
Excited	.68	.00
Inspired	.67	-.02
Alert	.63	-.10
Active	.61	-.07
Strong	.60	-.15
Proud	.57	-.10
Attentive	.52	-.05
Scared	.01	.74
Afraid	.01	.70
Upset	-.12	.67
Distressed	-.16	.67
Jittery	.00	.60
Nervous	-.04	.60
Ashamed	-.12	.59
Guilty	-.06	.55
Irritable	-.14	.55
Hostile	-.07	.52

Фиг.4. Анкетни термини на PANAS теста [9,16,17,18]

Резултатите от тези методи не винаги могат да се приемат за обективни, защото са силно зависими от субективното възприятие на дадените участници в експеримента. Също така резултатите зависят до голяма степен и от работата на самия изследовател и неговата цялостна експериментална постановка - среда и средства, подбор на участниците (представителност на извадката), формулировка на анкетите, и т.н. Поради тази причина невизуалните ефекти все по-често допълнително се анализират и чрез конкретни и обективни медицински изследвания чрез използване на ядрено магнитни технологии за изследване на мозъчните функции, измерване на хормоналното ниво в кръвта преди и след експеримента и др. Такива изследвания провежда Дано [9] с цел обективно установяване на пряка връзка между невизуалното зрително възприятие и възрастта на наблюдателя.



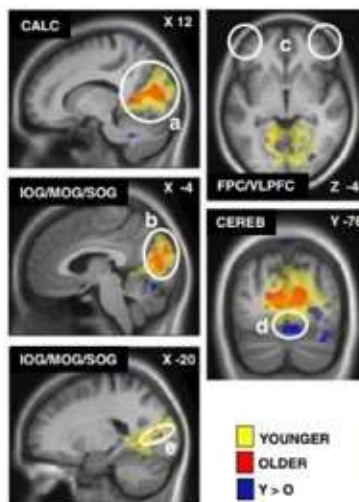
Фиг.5. Зрителна система и мозъчни центрове за визуално и невизуално светлинно възприятие [9]



Фиг.6. Реакция и светлинна възбуда на мозъчните центрове спрямо възрастта [9]

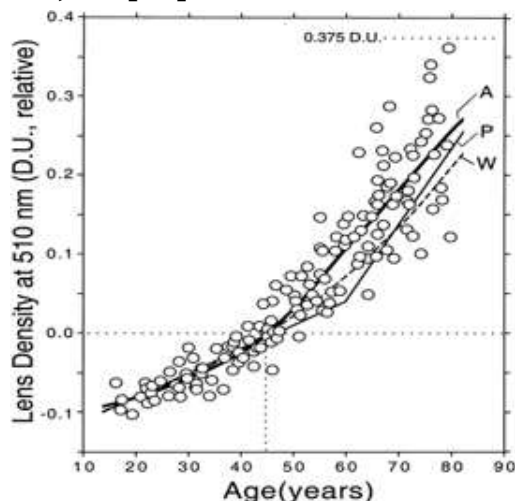
Резултатите от тези изследвания показват еднозначно, че реакциите на мозъка намаляват значително с увеличаване на възрастта на наблюдателя при облъчване с един и същи светлинен източник с еднакъв спектрален състав. Увеличаването на нивото на осветеност, но най-вече увеличаването на късовълновия учас-

тък (синята светлина) в спектралния състав на светлинния източник, дават най-добри резултати и значително повишаване на мозъчните реакции в центровете отговорни за невизуални зрителни ефекти, което води до значително подобрене на когнитивните мозъчни функции и съня. До същите резултати и заключения достигат и Челапа и Кайохен [5].



Фиг.7. Повишаване мозъчната реакция при възрастни вследствие увеличаване на синята спектрална съставка на светлината [9]

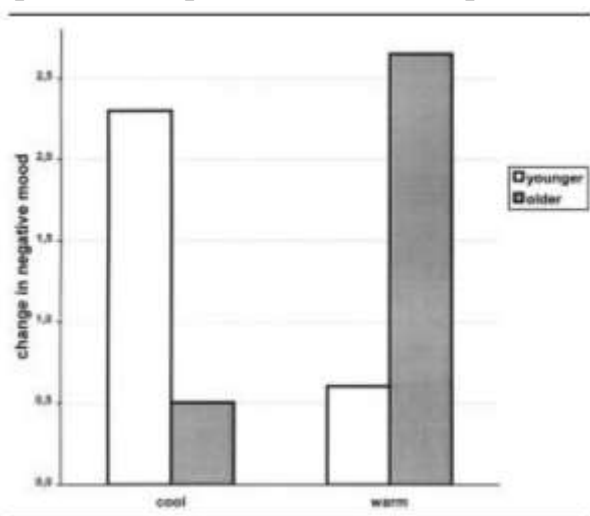
Намаляването чувствителността към синята съставка на светлината се обяснява също и с увеличаването на нивата на липофусцин в зрителния орган вследствие неговото стареене [6,10]. Натрупването на липофусцин води до „пожълтяване“ външните слоеве на ретината и отслабване на приемствеността на лъчение с невизуални ефекти (синя част от спектъра). Тази редукция може да достигне с нарастване на възрастта до 43,5% [21].



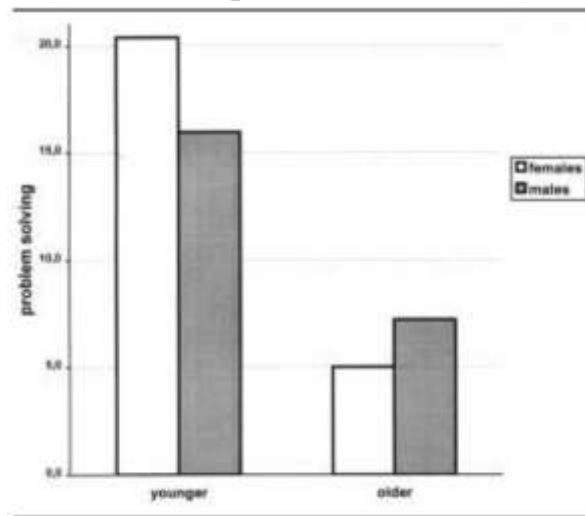
Фиг.8. Повишение концентрацията на липофусцин в зрителния орган с напредване на възрастта [10]

Както аналитично-статистическият, така и обективно-експерименталният метод за изследване на така наречените Non-Image-Forming Functions (NIF) водят до резултати, еднозначно показващи силна зависимост между възрастта на наблюдателя и ефекта на светлината в тази насока. Изследванията в тази област се задълбочават от Кнез чрез разглеждане на още една променлива (освен възрастта) - пола на наблюдателя [15]. Той прави лабораторен експеримент при продължително светлинно облъчване (минимум два часа), в зависимост от следните фак-

тори: пол на наблюдателя, цветна температура, ниво на осветеност и индекс на цветопрераждане. Участниците в експеримента дават сведения за техните настроения чрез анкета преди и след експеримента. Резултатите показват силна зависимост между настроеността след експеримента спрямо пола на наблюдателя и цветната температура на светлинния източник. Промени в работоспособността и когнитивните способности на участниците, отчетени чрез решаване на задачи след експеримента, не показват промени спрямо пола или промяна на светлинните параметри.[18]. Кнез задълбочава своите изследвания като прави второ проучване и експеримент, в който взема предвид и възрастта на участниците [15]. Постановката на експеримента и променливите фактори са същите, с тази разликата че участниците се разделят на две възрастови групи. Техните резултати се сравняват преди и след експеримента и са показани на фиг.9.



Фиг.9. Зависимост на настроението спрямо пол и възрастова група при различни цветни температури[14,15,16]



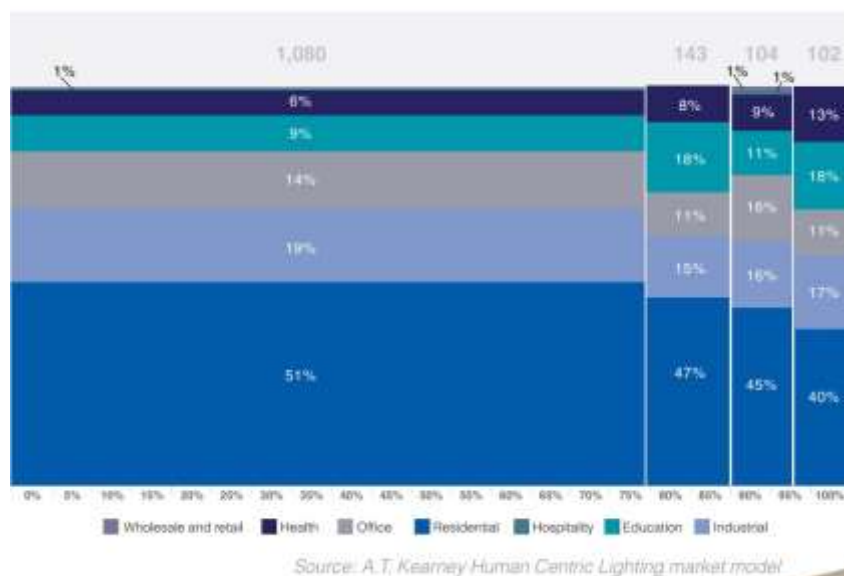
Фиг.10. Средностатистическа скорост на решаване на задача спрямо възрастта и пола на участниците[14,15,16]

Наблюденията предполагат, че цветната температура на светлинните източници и техните различия предизвикват различни емоции и усещане за комфорт в различните възрастови групи и в зависимост от пола на наблюдателя. Млади наблюдатели от женски пол запазват много по-лесно доброто си настроение, сравнени с по-възрастни участници от мъжки пол. Също така се отчитат леки измествания на работоспособността и решаването на когнитивни задачи между възрастови групи и спрямо пола (фиг.10).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представените научни трудове и изследвания еднозначно потвърждават влиянието на възрастта върху първичните (визуалните) функции на зрителния орган и основните зрителни характеристики. Тези влияния са предмет на дългогодишни изследвания и до голяма степен са вече взети предвид в модерното нормиране на проектирането на осветителни уредби (например БДС EN 12464). Докато до средата на 20 век учените опитват да намерят разликите между зрителното възприятие за различните възрастови групи с цел повишаване работоспособността (чисто механичните задачи и минимум за изпълнението им), то изследванията от края на 20 век до днес се съсредоточават все повече върху самия

индивид и биологичното влияние на изкуственото осветление и как то се вписва в цялостния Work-Life-Balance модел на модерния работник. Тези характеристики и стремежи за ергономична осветителна уредба често биват обобщавани под термина Human Centric Lighting.



Фиг.11. Прогноза на европейския пазар за продукти Human Centric Lighting 2020 по региони и в милиони евро (1080 милиона - средна и западна Европа, 143 милиона- северна Европа, 104 милиона - южна Европа, 102 милион - източна Европа. [1]

Отчитането на значителната промяна на възприятието с напредване на възрастта има голямо значение за правилното проектиране на осветителни уредби, тъй като едно от местата на приложение на биодинамичното осветление са домовете и заведението за възрастни хора (фиг.11). Резултатите за връзката между пола на наблюдателя и невизуалните светлинни ефекти трябва да се разглеждат критично, тъй като не са потвърдени от други научни трудове освен тези на Кнез [15,16,17] и се базират на аналитично и от части субективно изследване. Изследванията в тази област трябва да бъдат продължени и конкретизирани, тъй като предполагаемата зависимост на настроението спрямо пола и светлинния източник (както е описано от Кнез) би имала изключително значение за правилното и ергономично проектиране на осветителни уредби, както в частни домове, така и на публични и работни места.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.T. Kearney: "Human Centric Lighting Market Model" 2012
- [2] Boyce, P.R., PhD, Age, Illuminance, visual performance and preference: Lighting Research & Technology, 1973, Vol.5(3), pp. 125-144
- [3] Boyce P.R., Simons R.H., Hue discrimination and light sources: Lighting Research & Technology, 1977, Vol.9(3), pp.125-140
- [4] Cajochen C, Chellappa S, Schmidt C. What keep us awake? The role of clocks and hourglasses, light and melatonin, Int Rev Neurobiol, 2010, 93:57-90
- [5] Chellappa S.L., Gordijn M.C., Cajochen C., Can light make us bright? Effects of light on cognition and sleep: Prog Brain Res. 2011, 190, 119-33
- [6] CIE 203:2012, A Computerized Approach to transmission and absorption characteristics of the human eye

- [7] Cooper B.A., Ward M., Gowland C.A., McIntosh J.M., The use of Lanthony new color test in determining the effects of aging on color vision. *Journal of Gerontology* 1991, 46, 320-324
- [8] Cristarella M., Visual functions of the elderly. *American Journal of Occupational Therapy*, 1977, 31, 432-440
- [9] Daneault V., Dumont M., Masson E., Vandewalle G., Carrier J., Light-sensitive brain pathways and aging in *Journal of Physiological Anthropology*, March 15, 2016, Vol.35(9)
- [10] François C. Delori, Douglas G. Goger, C. Kathleen Dorey, Age-Related Accumulation and spatial Distribution of Lipofuscin in RPE of Normal Subjects: *Investigative ophthalmology & visual science*, July 2001, Vol.42(8), pp.1855-66
- [1] Fritz, M. (2013), Unterstützung durch künstliches Licht in der Begleitung von Menschen mit geistiger Behinderung und Demenz: Untersuchung anhand eines Praxisbeispiels
- [12] Hegde, Asha L., The Effects of Artificial Light Sources on Color Judgment by the Aging Eye: *Family and Consumer Sciences Research Journal*, December 1996, Vol.25(2), pp.184-195, Oxford, UK
- [13] Ishihara S., Tests for Colour Blindness. Handaya Hongo Harukich, Tokyo 1917
- [14] Иванов З., Осветителна и инсталационна техника, Авангард прима, 2010
- [15] Knez I., Kers C., Effects of Indoor Lighting, Gender, and Age on Mood and Cognitive Performance: *Environment and Behavior*, 2000, Vol.32(6), pp.817-831
- [16] Knez I., Effects of indoor lighting on mood and cognition. *Journal of Environmental Psychology*, 1995, 15, 39-51
- [17] Knez I., Non-visual effects of colour temperature and illuminance: some practical implications: *Proceedings of CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) 23rd session*, New Delhi, India, 1995, Vol. 1 (pp.180-183). Vienna: Central Bureau of CIE.
- [18] Knez I., Changes in females' and males' positive and negative moods as a result of variations in CT, CRI and illuminance levels: *Proceeding of Right Light: 4th European Conference of Energy Efficient Lighting*, Copenhagen, Denmark, November, 19-21, 1997, Vol. 1, 149-154
- [19] Lanthony P., The new color test: *Documenta Ophthalmologica*, 1978, Vol.46(1), pp.191-199
- [20] Muck E., Bodmann H.W., Die Bedeutung des Beleuchtungsniveaus bei praktischer Sehtätigkeit, 1961, *Lichttechnik*, 10, 502
- [21] Nikolova K., Petrinska I., Pavlov D., Djanovska P., Aging of the Human's ocular Media and blue light effects from different LED Sources: *Lux Junior* 2017, Sept. 8 bis 10, Dornfeld
- [22] Пачаманов А., Електроснабдяване и Осветителна техника, Основи на Осветителната техника, Част I, ТУ София, 2004
- [23] Pitts D., The effects of aging on selected visual functions: dark adaptation, visual acuity, stereopsis and brightness contrast: *Aging and Human Visual Functions* (Edited by Sekuler R., Kline D.W. and Dismukes K.) 1982, Liss, New York
- [24] Stenzel, A.G. (1962) Experience with 1000 lx in a leather factory, *Lichttechnik*, 14, 16-18
- [25] Stenzel, A.G. and Sommer, J (1969) The effect of illumination on tasks which are largely independent of vision, *Lichttechnik*, 21, 143-146
- [26] Verriest G., Van Laethem J., Uvijls A., A new assessment of the normal ranges of the Farnsworth-Munsell 100 hue test scores: *American Journal of Ophthalmology*, 1982, 393, 635-642.
- [27] Weale, R (1963), *The aging Eye*, New York, Harper
- [28] Weston H. C., On Age and Illumination in Relation to Visual Performance: *Lighting Research & Technology*, 1949, Vol.14, pp.281-297

Автор: Божидар Гълъбов, маг. инж., докторант, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически факултет, Технически Университет-София, E-mail address: galabov.sng@gmail.com

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: гл. ас. д-р Димитър Павлов

ИМПЛЕМЕНТИРАНЕ НА СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА БЕЗСЕНЗОРНО ВЕКТОРНО УПРАВЛЕНИЕ КЪМ ЦИФРОВ СИГНАЛЕН ПРОЦЕСОР

Владислав Петров

Резюме: В работата е представен подход за прилагане на вграден софтуер за управление на синхронен двигател с постоянни магнити, изграден на база на MATLAB/SIMULINK. Изграждането на симулационен модел с цел анализ на преходни и установени режими, и проверка на различни алгоритми за управление се различава от начина на изграждане на софтуер за цифров сигнален процесор. Процеси като генериране на прекъсване, приоритет на събитията, дискретизация съобразена с електрическите и механични преходни процеси, възможности на процесора и други, обикновено се пренебрегват при изграждането на симулационните модели на електромеханичните системи.

Ключови думи: микропроцесорно управление, безсензорно векторно управление, синхронен двигател с постоянни магнити, следящо токово управление

MICROCONTROLLER IMPLEMENTATION BASED ON A SIMULATION MODEL OF FIELD ORIENTED CONTROL

Vladislav Petrov

Abstract: The work presents an approach for firmware and algorithm synthesis based on MATLAB/SIMULINK for permanent magnet synchronous motor control. There are a few key differences in building a model for analysis of transients and steady state conditions and embedding that model as firmware on a microcontroller. Processes such as generating interrupts, execution priority, discretization taking into account mechanical and electrical time constants, peripheral capabilities of the microcontroller are generally not taken into account when building simulation models of electromechanical systems.

Keywords: sensorless vector control, permanent magnet synchronous motor, sliding-mode observer

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Същността на работата е свързана с разработване на работещ алгоритъм за безсензорно векторно управление на синхронни двигатели с постоянни магнити, който е изграден в подходяща среда, даваща възможност за по-широко приложение - симулация и микропроцесорно имплементиране. Разработката бе провокирана от предходна работа по темата [1], [2], свързана с разработването на електрозадвижване за вентилационни и помпени системи с вградена в двигателя електро-

ника. Поради изискване за минимален обем в [1] и [2] е използван специализиран контролер за управление на синхронни двигатели с вграден наблюдател, производство на фирма Fairchild Semiconductor [3]. Използваният контролер обаче бе купен от фирма Spintrol Technology, която на практика спря поддръжката му, а фирма Fairchild Semiconductor бе изкупена от ON Semiconductor. Това наложи въпросът не само за смяна на контролера в управлението, но и създаване на подходящ алгоритъм в отворен код, който може да се приложи на по-голяма гама съществуващи микроконтролери. Към момента на пазара съществува голяма гама от специализирани контролери с вградени наблюдатели, като безспорен лидер са Texas Instruments с новите серии процесори C2000 с интегриран наблюдател за безсензорно управление, наречен InstaSIPN[®]. По-голямата част от контролерите обаче за със „заклучен“ алгоритъм, което създава една зависимост от непрекъснато променящия се пазар.

Така поставеният проблем задава решаването на следните задачи: създаване на управление с наблюдател с отворен код, както и избор на тип наблюдател; избор на програмна среда за генериране на софтуер; избор на сигнален процесор/микроконтролер.

2. СОФТУЕРНА СРЕДА И СИГНАЛЕН ПРОЦЕСОР

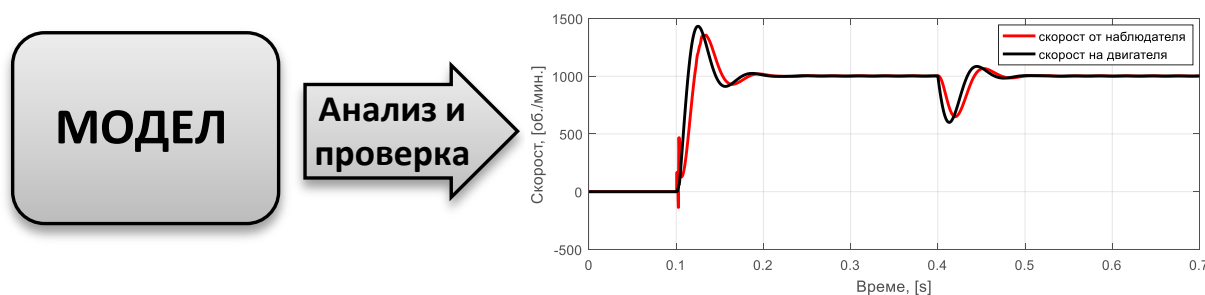
Всяка фирма производител на микроконтролери, ориентирани към управление на двигатели предлага собствена среда за изграждане на софтуера за управление - IDE (Integrated Development Environment - интегрирана среда за програмиране/разработка) [3]. Всяка среда обикновено разполага с вградени инструменти за първоначална диагностика и настройка [4], за следене и запис на параметри в реално време, визуализация на данни, изграждане на потребителски панел за персонален компютър и други. От тази гледна точка се търси среда, която разполага с тези инструменти, но предлага и възможност за лесно адаптиране на програмния алгоритъм не само за един производител на микропроцесори.

Предвид дългото развитие на програмната среда MATLAB/SIMULINK тя се оказва подходяща в случая по няколко причини: наличен е набор от пакети за работа с широка гама от микропроцесори на основните производители на пазара; разполага с големи възможности за предварителни симулации на цялата електромеханична система, в която участва микропроцесора; има всички необходими възможности за комуникация в реално време с микропроцесорната платформа, запис на данни, задаване на параметри и други.

По отношение на избора на микропроцесор има големи възможности, но предвид дългогодишната поддръжка на серията процесори C2000 на Texas Instruments, ориентирани към управление на двигатели, както и предвид заявката която направи фирма Texas Instruments с появата InstaSIPN[®] като водещи в областта, дава основание за избор на микропроцесор от серия C2000. Серия C2000 имат дългогодишна поддръжка в MATLAB/SIMULINK. Фирмата обаче заявява, че няма намерение да дава поддръжка на InstaSIPN[®] в MATLAB/SIMULINK, тъй като не се гарантира скриването на кода на наблюдателя.

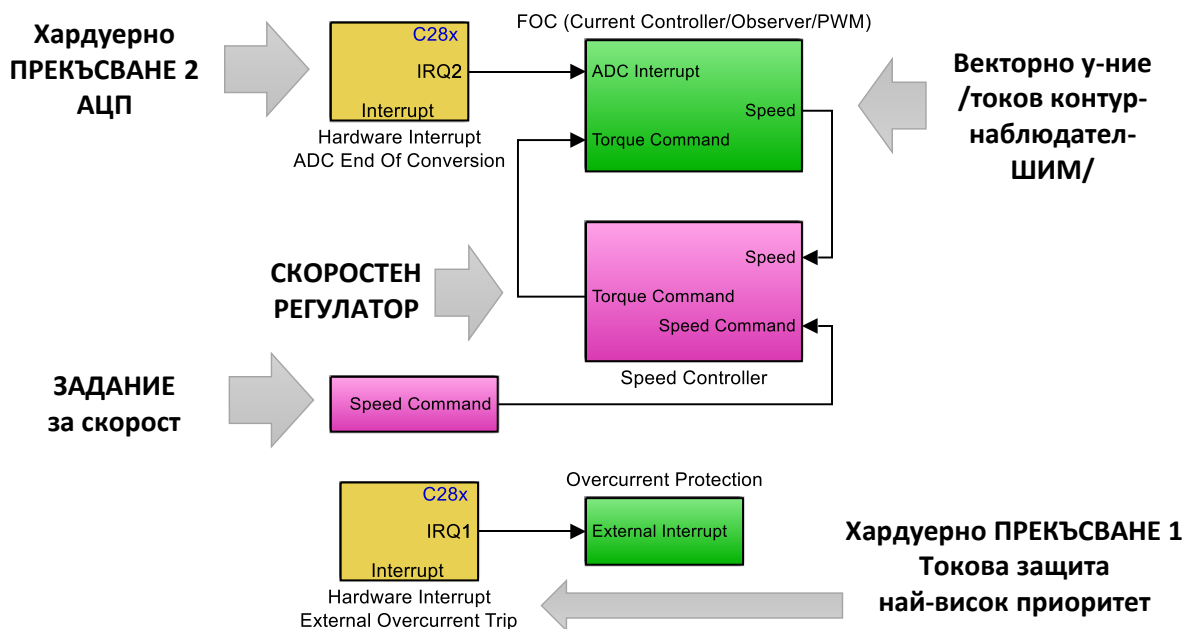
3. СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ - ВГРАДЕН СОФТУЕР

При изграждането на симулационен модел в средата на SIMULINK често не се вземат под внимание особености, които са характерни в микропроцесорните системи. При моделиране в областта на електрозадвижванията акцентът пада върху анализ на процеси и режими на работа, както и проверка на различни концепции на управление - фиг.1.



Фиг.1. MATLAB/SIMULINK като среда за моделиране

Използването и преобразуването на програмен модел към софтуер за вградена система налага определени трансформации в алгоритъма за управление свързани с начина на работа на микропроцесора - обвързване на работата на аналогово-цифровите преобразуватели (АЦП) с честотата на ШИМ (широчинно-импулсна модулация); генериране и приоритет на прекъсванията, разделяне на честотата на работа на процесите свързани с електрическите и механичните преходни процеси и др. - фиг.2.

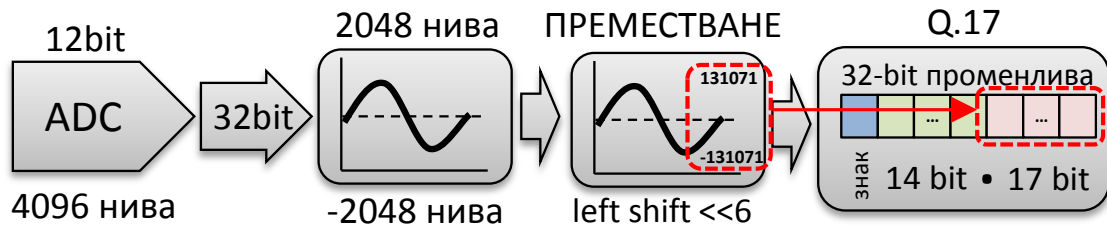


Фиг.2. MATLAB/SIMULINK като среда за генериране на програмен код за вградени системи

4. СПЕЦИФИКИ В ИЗГРАЖДАНЕТО НА СОФТУЕР ЗА МИКРОПРОЦЕСОР

В конкретната работа е използван 32-битов микропроцесор на фирма Texas Instruments от серия C2000 с фиксирана запетая. Една от основните задачи при из-

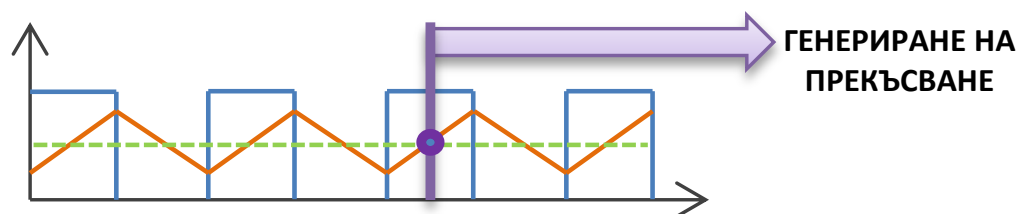
граждането на алгоритъма за управление е изборът на типа да данните, така че да се използва максимално резолюцията на съответния микропроцесор, както и да се избегне насищане на променливите. Основната аналогова информация която постъпва в процесора и е необходима за управление са статорните токове на двигателя. Използваният процесор има 12-битово АЦП (аналогово-цифров преобразувател) - фиг.3.



Фиг.3. Трансформиране на сигнала от АЦП в променлива с фиксирана запетая

След посрещане на сигнала от токовите сензори в програмната среда получавате данни с резолюция 12 бита, отговаряща на 4096 нива. Следва трансформация в 32-битова променлива - един бит за знак и 31 бита за стойността на променливата. Все още информацията за тока е 12 битова, въпреки че се използва 32-битов формат. Следващата трансформация се налага поради факта, че се измерва променлив ток центриран спрямо 2048 нива на АЦП. Преместването наляво осигурява фиктивно увеличаване на резолюцията от 12 бита на 18 бита (един бит за знак и 17 бита за информация). Това осигурява разширяване на изчислителната резолюция. Следва трансформация в така наречения Q формат или знаков формат с фиксирана запетая. След цялото преобразуване, 12 битова информация, трансформирана в обхват +2048/-2048 нива, се преобразува в Q.17 формат с обхват +1/-1. Този формат позволява нормиране на всички сигнали в управлението в обхват +1/-1, което осигурява работа в относителни единици с 14-бита пред десетичната запетая, позволяващи насищане на променливите до 16384 нива. Основната информация се цели да бъде под десетичната точка с резолюция 17 бита или +131072/-131072 нива.

Друг специфичен момент при изграждането на софтуера за микропроцесора е свързан с цифровото измерване на тока и генерирането на прекъсване в токовия контур, където на практика е реализирана по-голямата част от алгоритъма за управление. При един симулационен модел измерването на тока на практика става с честотата на работа на симулационния модел, било то с фиксирана или променлива стъпка на дискретизация. При изграждането на софтуера за микропроцесор измерването на тока става централно ориентирано спрямо ШИМ-а (широчинно-импулсна модулация). Честотата на ШИМ се избира така, че да се гарантира линеаризиране на системата в рамките на един период на ШИМ - фиг.4. Тогава измерването на тока става в активната зона на ШИМ, централно ориентирано, което позволява измерване на тока с честотата на ШИМ, което значително олекотява работата на АЦП и цялостния алгоритъм.

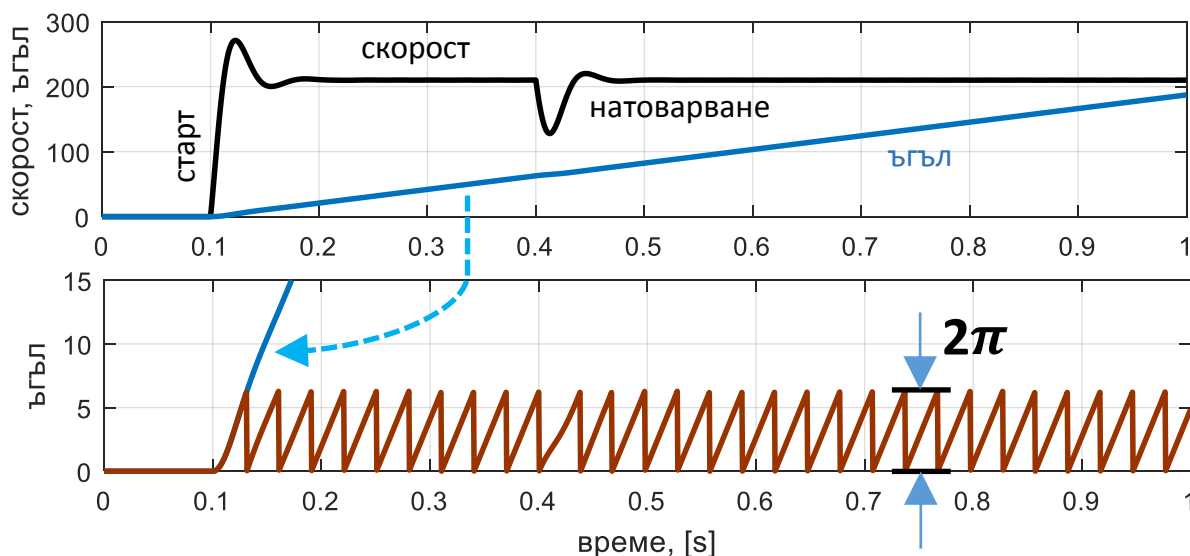


Фиг.4. Централно ориентиран ШИМ и генериране на прекъсване за започване на конверсия от АЦП

Това означава, че методът за управление и токовия контур, заедно с наблюдателя (фиг.2), работят съобразено с честотата на ШИМ.

Скоростният регулатор е изнесен извън токовия контур - фиг.2. Това гарантира работа на управлението, съобразено с електрическата времеконстанта на двигателя, а скоростния контур работи на значително по-ниска честотата, достатъчна за значително по-бавните механични преходни процеси.

При моделиране на електрозадвижване ъгълът на ротора нараства с времето, което на практика не довежда до насищане на променливите - фиг.5.



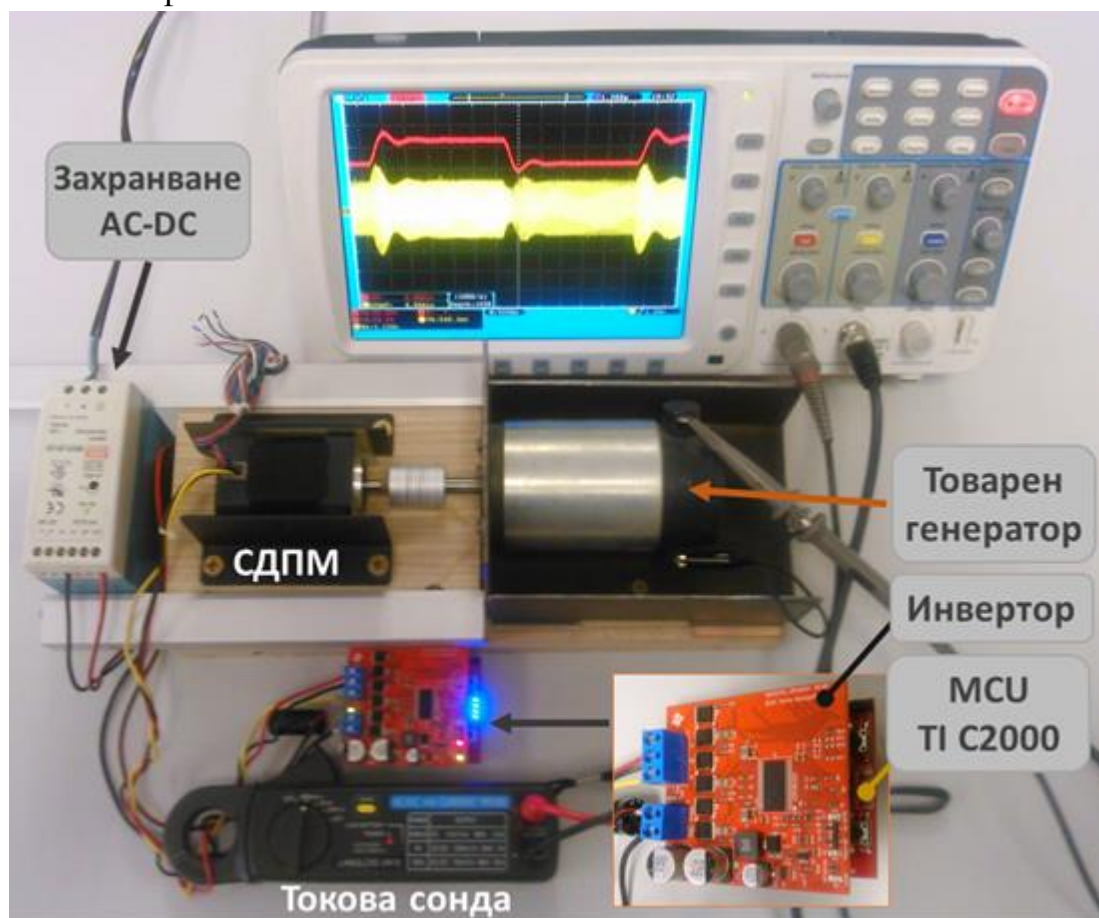
Фиг.5. Скорост – ъглово положение при модел и при микропроцесор

При работа с микропроцесор насищане на интеграторите не може да се допусне, поради което в скоростния контур се налага нулиране на ъгъла на всеки 360 механични градуса или 2π радиана, при това, скоростта не се различава от тази на модела, получена след съответното интегриране на ъгъла.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕАЛИЗАЦИЯ

В настоящата статия е реализиран алгоритъм със следящо токово управление, изпълнен на базата на цифров сигнален микропроцесор от серия C2000-TMS320F28027F. Използваният процесор има интегриран наблюдател InstaSPIN®, разработка на Texas Instruments, но не е използван в доклада, като вместо него е приложен наблюдател на ъгъла и скоростта реализиран в среда

MATLAB/SIMULINK. За верификация на синтезирания алгоритъм за безсензорно управление е реализиран прототип, като са използвани отделни (модулни) блокове за инвертора - развойна микропроцесорна платка, разработка на Texas Instruments и модулен инвертор за ниско напрежение с максимален ток 10А, захранен на 24V - фиг.6.



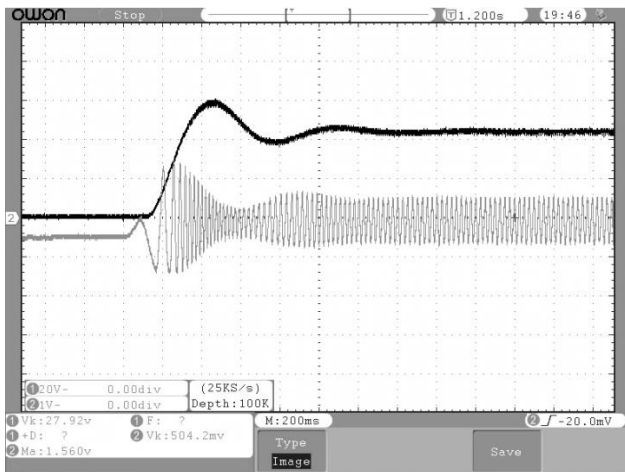
Фиг.6. Снимка на реализирания прототип за проверка на синтезирания алгоритъм за управление на двигател за ниско напрежение

Осцилограми, демонстриращи качествата на реализираното управление са представени на следващите фигури. На фиг.7а е показан старт на двигателя – скорост и статорен ток. Трябва да се отбележи, че управлението изпълнява не само задание за скорост, но и се стреми да поддържа позиция. Свидетелство за това се вижда от постоянния фазен ток преди заданието за промяна на скоростта - фиг.7а, т.е. създаване на статично поле в статора, което се стреми да държи ротора в определена позиция.

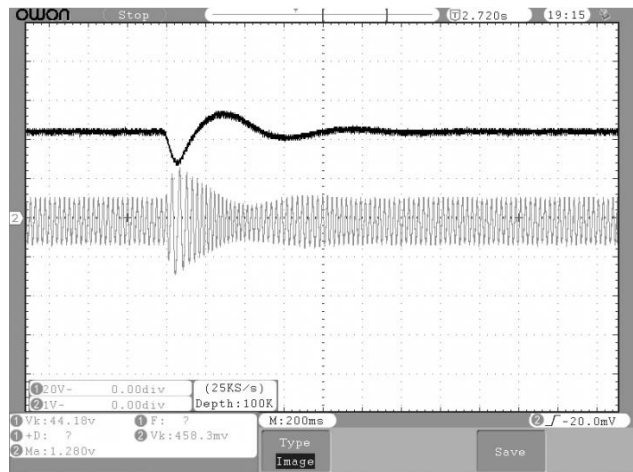
Реакция при кратковременно натоварване и разколебаване на системата е показана на фиг.7б.

На фиг.8а и фиг.8б. са демонстрирани осцилограми на скоростта и тока при промяна на заданието за скорост при две различни настройки на скоростния регулатор.

На фиг.9 е демонстрирана реакцията на задвижването при натоварване. Вижда се, че управлението поддържа устойчиво зададената скорост независимо от типа на натоварване - скокообразен или плавен.

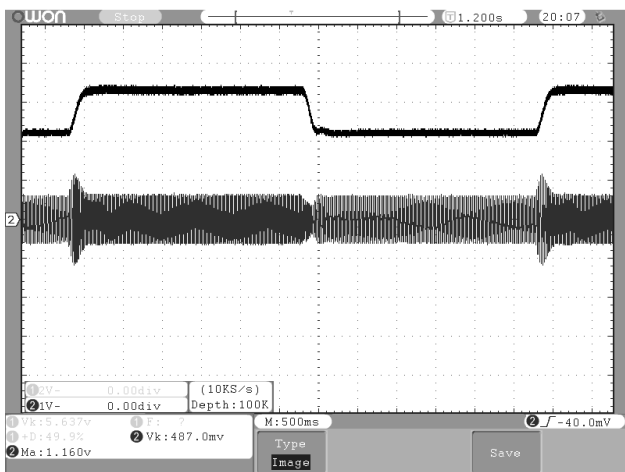


а. Стартиране на двигателя

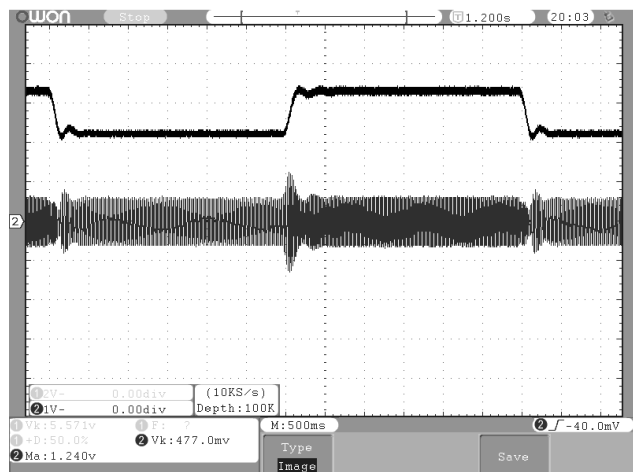


б. Моментно, кратковременно натоварване

Фиг.7. Скорост (черно) и фазен ток (сиво) на СДПМ при безсензорно векторно управление

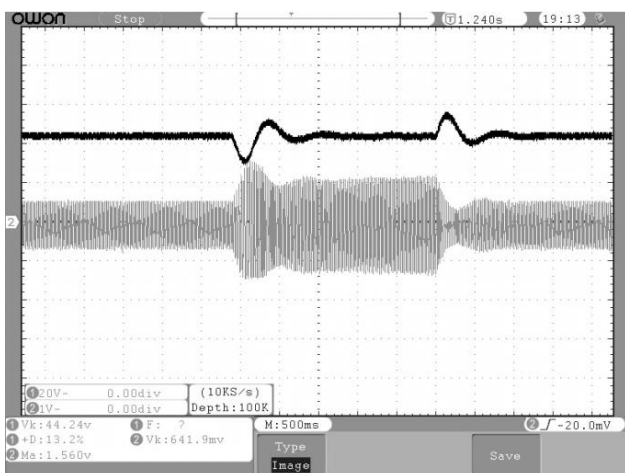


а. настройка 1

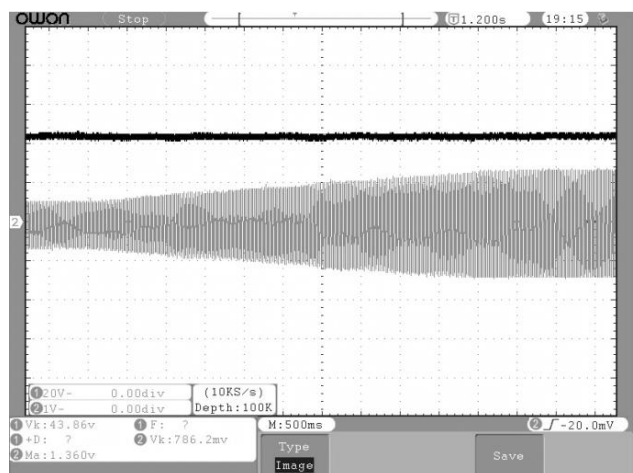


б. настройка 2

Фиг.8. Скорост (черно) и фазен ток (сиво) на СДПМ при безсензорно векторно управление –променливо задание за скорост при празен ход при различни настройки на скоростния регулатор



а. рязко натоварване



б. плавно натоварване

Фиг.9. Натоварване при безсензорно векторно управление на СДПМ - скорост (черно) и фазен ток (сиво)

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представен успешно реализиран подход за генериране на програм-мен код за цифров сигнален процесор на фирма Texas Instruments в среда MATLAB/SIMULINK. Проведени са експериментални изследвания, които де-монстрират качествата на създаденото управление.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рачев, Р., Петров, В., “Високоэффективно управление на синхронни двигатели с постоянни магнити за промишлени вентилационни системи”, Годишник на Техническият Университет - София, Том 64, книга 4, стр.229-236, София, 2014
- [2] Rachev, E. H, Petrov, V. E, Stoev, B. D, 2017, Cogging torque effect on motor start-up in a sensorless motor drive for permanent magnet synchronous motors, 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), pp. 211-214
- [3] Fairchild’s Motor Control Development System (MCDS) - Integrated Development Environment (IDE), Application Note AN-8207, Fairchild Semiconductor Corporation 2013
- [4] Tkadlec, J., “Automated PMSM Parameter Identification”, Freescale Semiconductor Application Note, AN4986, Rev 0, 10/2014

Автор: Владислав Петров, маг. инж., докторант, катедра „Електрически Ма-шини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: vllep@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Адриан Иванов

ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ДВИГАТЕЛЯ И НАБЛЮДАТЕЛЯ ПРИ БЕЗСЕНЗОРНО УПРАВЛЕНИЕ НА СИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Емил Рачев, Владислав Петров

Резюме: В работата е разгледано влиянието на параметрите необходими при настройка на безсензорно управление на синхронен двигател с постоянни магнити - управление без сензор за скорост на вала на двигателя. Приложено е следящо токово управление, като е разгледано не само влиянието на параметрите на двигателя върху наблюдателя за ъглово положение и скорост, но и влиянието и начина за настройка на токовите и скоростни регулатори.

Ключови думи: безсензорно векторно управление, синхронен двигател с постоянни магнити, следящо токово управление

INFLUENCE OF MOTOR AND OBSERVER PARAMETERS IN A SENSORLESS CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Emil Rachev, Vladislav Petrov

Abstract: The work is an overview of the impact of required parameters for implementing a sensorless field oriented control of a permanent magnet synchronous motor – operation without a speed sensor on the motor shaft. An analysis is made not only on the impact of motor parameters on the used sliding-mode observer but also on the topology and parameters of the current and speed controllers.

Keywords: sensorless vector control, permanent magnet synchronous motor, sliding-mode observer

1. ВЪВЕДЕНИЕ

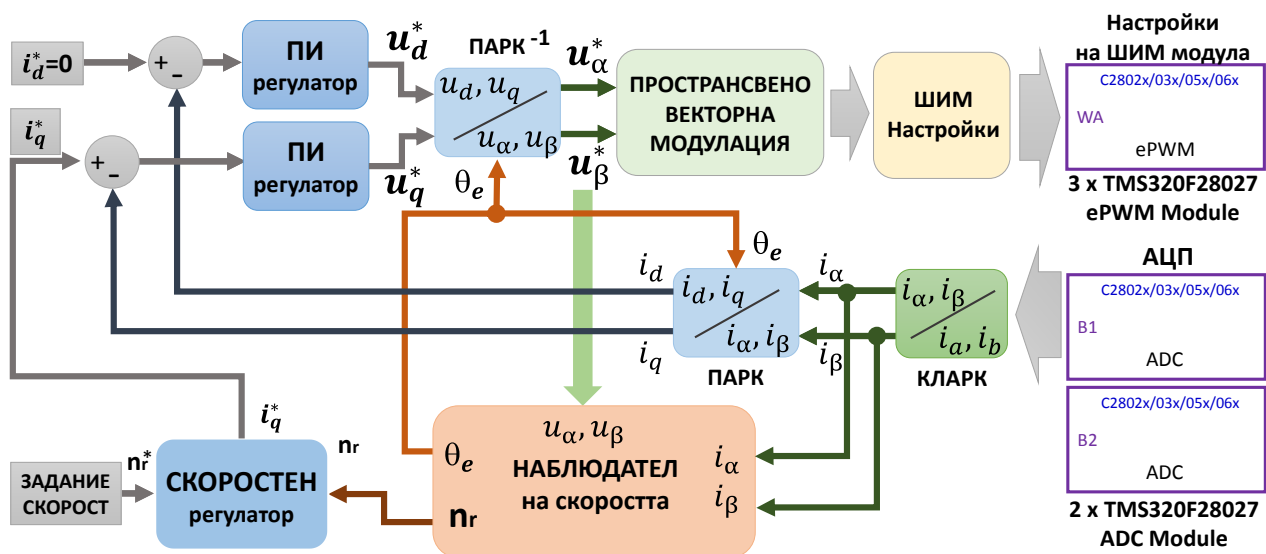
При векторното управление се налага използването на сензор за положение и скорост на ротора. След развиване на метода инженерите започват да търсят начини за елиминиране на сензора за положение и скорост. Това обаче се оказва сериозен проблем през годините и въпреки, че към настоящия момент водещи фирми в областта предлагат сигнални процесори с вградени наблюдатели за положение, работата в тази посока не е напълно решена и все още безсензорното управление не може напълно да покрие качествата на управление със сензор на вала на двигателя.

Един от водещите производители на специализирани микропроцесори - Texas Instruments (TI), внедри безспорно един от най-успешните наблюдатели на скоростта, ъгъла и потока в серията процесори C2000, ориентирана към управление

на електрически двигатели, който нарекоха InstaSPIN®. Модулът InstaSPIN е уникален по рода си инструмент, интегриран в процесорите на TI, който позволява реализация на безсензорно управление както за синхронни, така също и за асинхронни (индукционни) двигатели. Разбира се първият основен недостатък е в това, че InstaSPIN е патентован и „заклучен“ в ROM паметта на микроконтролера и на практика неговата математическа основа остава загадка за потребителя. Освен това, самите TI поясняват, че работата на InstaSPIN е по-успешна при синхронни двигатели и има своите особености при асинхронните двигатели, което по същество се потвърждава в достоверните научни изследвания, публикувани до момента. В InstaSPIN е интегрирана процедура за диагностика на двигателя, но тя има някои проблеми при двигатели с вътрешно разположени магнити и самите TI твърдят, че ще допълнят функционалността в следващи версии на InstaSPIN. В тази връзка в настоящия доклад се цели създаване на гъвкава изследователска среда, която да послужи като база за бъдещи изследвания в областта на векторното управление и по-специално техниките за елиминиране на сензора за скорост и положение на ротора, приети да се наричат безсензорно управление [2], [4], [5], [6].

2. БЕЗСЕНЗОРНО ВЕКТОРНО УПРАВЛЕНИЕ

Блоковата схема на реализираното векторно управление на СДПМ е показана на фиг.1.



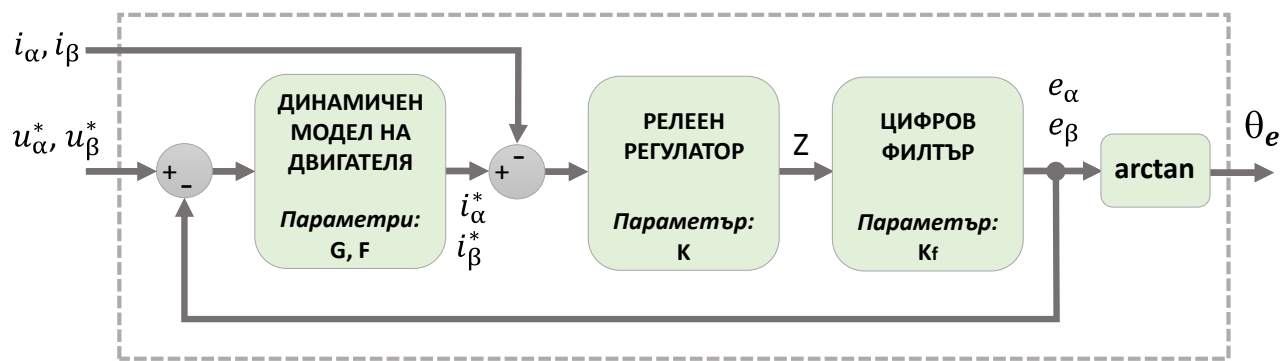
Фиг.1. Блокова схема на безсензорно векторно управление (ВУ) на синхронен двигател с постоянни магнити (СДПМ); i_d , i_q , i_α , i_β , u_d , u_q , u_α , u_β – моментни стойности на съставките на тока и напрежението в d,q и α,β координати

В същността си алгоритъмът на управление не се различава от този на класическо векторно управление с използване на сензор за скорост [1], като изключим това, че в метода за управление е интегриран наблюдател, който определя ъгъла и скоростта на ротора. При управлението на СДПМ в общия случай се задава нулева стойност на тока по оста d. Стойност на тока $i_d = 0$ означава, че управлението не създава магнитен поток от статора, а потокът се създава от магнитите в ротора. Също така управляващият алгоритъм не се стреми да отслабва

магнитното поле. При високи скорости се налага отслабване на магнитното поле в ротора, което при повърхностно разположени магнитни е трудна задача. Отслабването на полето, чрез въвеждане на $i_d \neq 0$ се явява удачно при неявнополюсна конструкция на ротора с вътрешно разположени магнити. При неявнополюсни машини, дори в режим на работа до обявената скорост, е възможно оптимизиране на съставката на тока по оста d с цел постигне на оптимална работа на двигателя, което зависи от конструкцията на ротора. В общия случай обаче, до обявената скорост, се приема $i_d = 0$.

3. НАБЛЮДАТЕЛ НА СКОРОСТТА

Наблюдателят на скоростта и положението на ротора е представен с блокова схема на фиг.2. Измерените статорни токове, трансформирани в статична α - β координатна система - i_α, i_β , се сравняват с изчислените стойности на тока в α - β координатна система, получени от динамичния модел на двигателя.



Фиг.2. Принципната блокова схема на реализирания наблюдател

Динамичният модел на двигателя сравнява зададените напрежения u_α^* и u_β^* с изхода цифровия филтър (фиг.2), който се явява електродвижещото напрежение, с неговите съставки по осите α - β - e_α , e_β .

Ъгловото положение на ротора θ_e се определя както следва:

$$e_\alpha = -\psi_f \omega_e \sin(\theta_e) \text{ и } e_\beta = \psi_f \omega_e \cos(\theta_e) \Rightarrow \theta_e = \arctan(-e_\alpha/e_\beta), \quad (1)$$

където ψ_f е потокосцеплението на статорната намотка получено от постоянните магнити, а ω_e е електрическата кръгова честота.

Динамичният модел на двигателя представлява дискретна реализация на уравненията за равновесие на напреженията по осите α - β с параметри:

$$F = e^{-\frac{R_s t}{L_s}} \text{ и } G = \frac{1}{R_s} \left(1 - e^{-\frac{R_s t}{L_s}} \right), \quad (2)$$

където R_s и L_s са активно съпротивление и статорна индуктивност; t – време на дискретизация.

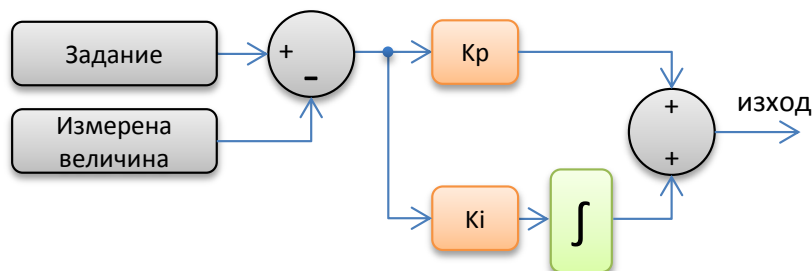
Параметрите на двигателя могат да се определят по няколко различни подхода, като в настоящия отчет е приета методика, предложена в [8] даваща отлични резултати. По-важно е да се отбележи, че при моделиране и изследване на синх-

ронния двигател, в математическия модел участват редица параметри, в това число и касаещи уравнението за движение на ротора, потокосцепление и електродвижещо напрежение в следствие на магнитите в ротора. В случая динамичният модел в наблюдателя има за цел да моделира опростено двигателя, давайки неговата токова реакция при подаване на съответното напрежение. Времеkonстантата на предавателната функция, която моделира двигателя в този случай е $T_s = L_s / R_s$. Определянето на електродвижещото напрежение става на база на релейния регулатор, с коефициент на настройка К - фиг.2. След релейния регулатор се използва цифров нискофrequentен филтър, като с K_f се определя неговата критична честота.

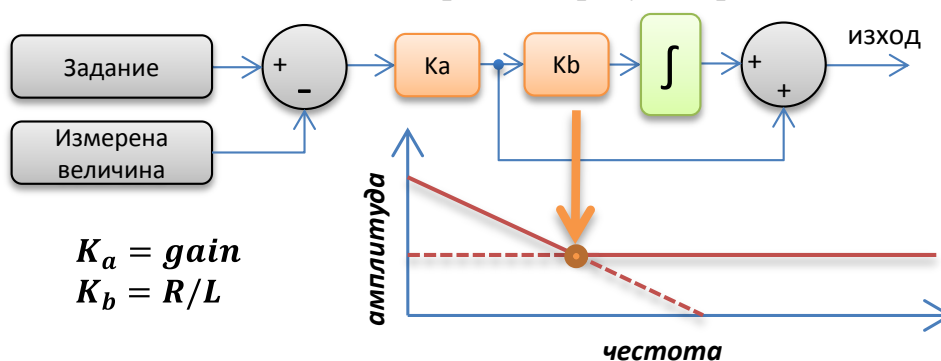
4. ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ДВИГАТЕЛЯ ВЪРХУ ТОКОВИТЕ РЕГУЛАТОРИ

При безсензорно управление е важно да се отбележи, че настройката както на токовите, така също и на скоростните регулатори се оказва критична за устойчивостта на системата, което не е валидно в такава степен при класическо векторно управление. При управление със сензор за скорост/положение, настройката на регулаторите може да варира в доста по-широки граници, без нарушаване на устойчивостта. Важно е да се има предвид настройката на токовите регулатори трябва да бъде съобразена със собствената електрическа времеkonстанта на двигателя, така че регулаторите да не се опитват да форсират или забавят естествените процеси в двигателя. Това разбира се варира в определени граници. Именно в тази връзка обвързването на константите на регулаторите с параметрите на двигателя и тяхното по-точно определяне е от ключово значение при безсензорно векторно управление.

При безсензорно управление се оказва удачно използването не на паралелен тип регулатор, а на регулатор от последователен тип - фиг.3 и фиг. 4.



Фиг.3. Паралелен регулатор

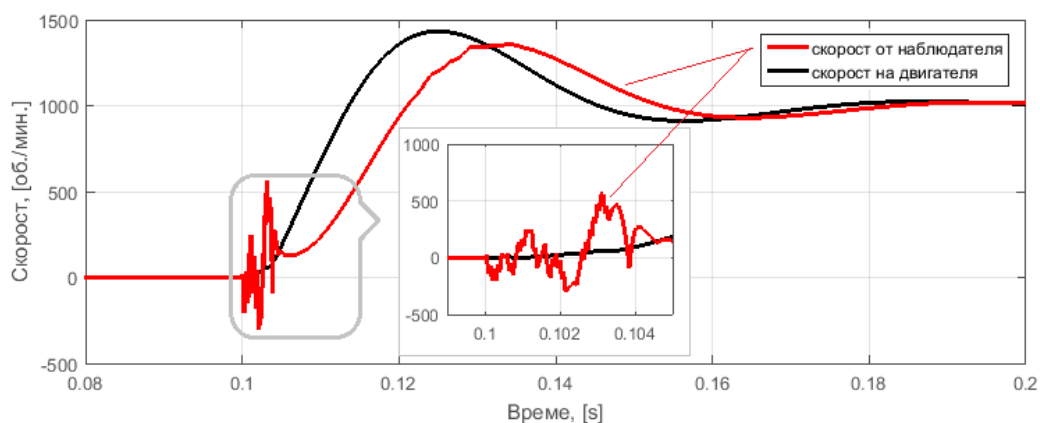


Фиг.4. Последователен регулатор

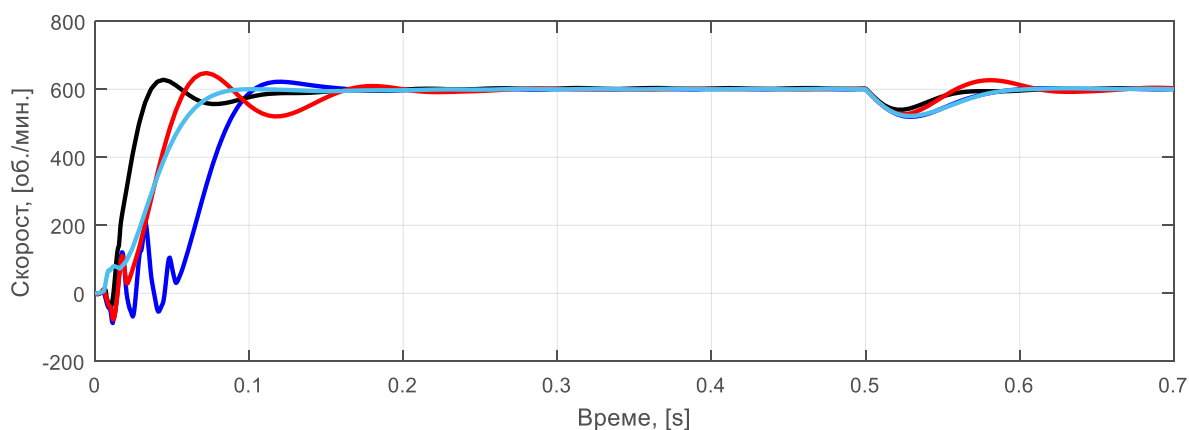
При използването на последователен регулатор константата K_a влияе едновременно и на пропорционалната и на интегралната съставка. Константата K_b се определя на база на електрическата времеконстанта и веднъж настроена би следвало да не се променя. При необходимост от забързване или забавяне на регулаторите се борави единствено с K_a . При съвременните електрозадвижвания обикновено се въвеждат процедури за самодиагностика и определяне на необходимите параметри за управлението в стартова процедура, заложена в алгоритъма за управление. По-подробна и пълна информация за начина на определяне и влияние на параметрите на регулаторите е дадена в [5].

5. ПАРАМЕТРИ НА НАБЛЮДАТЕЛЯ

Основните проблеми при реализация на безсензорно управление са свързани със стартирането, динамиката и устойчивостта при ниски скорости. На фиг.5 е демонстрирано как изглежда скоростта, получена от наблюдателя и действителната скорост:



Фиг.5. Скорост на двигателя и скорост, изчислена от наблюдателя - шум при ниски скорости



Фиг.6. Стартиране и натоварване при различни настройки на наблюдателя

Начинът на настройка на скоростните регулатори също би следвало да бъде съобразен със задвижването, но в този случай времеконстантата на двигателя е механичната времеконстанта зависи не само двигателя, но и от присъединената инерционна маса на задвижващия орган, гъвкавостта на съединителя и динами-

ката на товара. Това значително усложнява настройката на задвижването особено при стартовата процедура, където наблюдателят внася смущения в получения сигнал за ъгъл и скорост - фиг.5. В повечето случаи това налага специални мерки обикновено свързани с друг метод на работа при стартиране (най-често работа в отворена система без обратна връзка по скорост), с което се гарантира сигурно стартиране и включване на следящо токовото управление след това. Някои примери за стартиране без специална стартова процедура при различни настройки в наблюдателя са показани на фиг.6.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настройката на токовите и скоростните регулатори се оказва критична при безсензорно управление, което не е валидно в такава степен при класическо векторно управление. Именно в тази връзка обвързването на константите на регулаторите с параметрите на двигателя и тяхното по-точно определяне е от ключово значение при безсензорно векторно управление.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vas, P., "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford University Press, 1998
- [2] Рац Е., Векторно управление на електрически машини, Авангард Прима, София 2010
- [3] Chou T.Y., Liu T.H., Cheng T.T., "Sensorless micro-permanent magnet synchronous motor control system with a wide adjustable speed range", Electric Power Applications, IET , Volume: 6 , Issue: 6, 2012
- [4] Bobek, V., "PMSM Electrical Parameters Measurement", Freescale Semiconductor Application Note, AN4680, Rev. 0, 02/2013
- [5] Wilson, D., "Teaching your PI controller to behave", Texas Instruments, Web Series, 07/2015

Автори: **Емил Рачев**, гл. ас. д-р, катедра „Електрически Машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: ehra@tu-sofia.bg; **Владислав Петров**, маг. инж., докторант, катедра „Електрически Машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: vlep@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Адриан Иванов

УПРАВЛЕНИЕТО НА ОТПАДЪЦИ ОТ ЕЛЕКТРИЧЕСКО И ЕЛЕКТРОННО ОБОРУДВАНЕ КАТО ЧАСТ ОТ ПРЕХОДА КЪМ КРЪГОВА ИКОНОМИКА

Калинка Тодорова

Резюме: Един от основните приоритети на Европейския съюз е концепцията за кръгова икономика. Внедряването на кръговата икономика налага преосмисляне на политиката на Европейския съюз чрез въвеждане на промени в етапите на жизнения цикъл на продуктите: дизайн, производство, потребление, управление на отпадъците и повторно третиране на вторичните материали. Удължаването на живота на продуктите, повторното използване на продукти и техните компоненти, както и преработката, са ключов елемент на кръговата икономика. Към тези дейности е насочено и общото законодателство на Съюза в областта на управлението на отпадъците. Целта на Директива 2012/19/ЕС на Европейския парламент и на съвета на Европейския съюз относно Отпадъци от Електрическо и Електронно Оборудване (ОЕЕО) е да допринесе за устойчивото производство и потребление основно чрез предотвратяване на ОЕЕО както и чрез повторна употреба, рециклиране и други форми на оползотворяване на такива отпадъци.

Ключови думи: кръгова икономика, устойчиво развитие, ефективно използване на ресурси, отпадъци от електрическо и електронно оборудване

WASTE MANAGEMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT AS PART OF TRANSITION TO CIRCULAR ECONOMY

Kalinka Todorova

Abstract: One of the main priorities of the European Union is the concept of a circular economy. The introduction of the circular economy necessitates a rethinking of the European Union's policy by introducing changes in the life stages of the products: design; production; consumption; waste management and reprocessing of secondary materials. Extending product life, reuse of products and their components as well as processing are a key element of the circular economy. The general Union waste management legislation addresses these activities. The objective of Directive 2012/19 / EC of the European Parliament and of the Council of the European Union on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) is to contribute to sustainable production and consumption mainly through the prevention of WEEE and through reuse, recycling and other forms of recovery of such waste.

Key words: circular economy, sustainable development, resource efficiency, waste electrical and electronic equipment

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През второто десетилетие на XX век интересът към кръговата икономика постепенно се увеличава по различни причини. Като по-важни екологични фактори за това се открояват недостигът на ресурси и отрицателното влияние върху околната среда от неустойчиво производство и потребление. Основните икономически причини са непостоянството на цените на стоките и потенциалът за икономически изгоди от внедряването на концепцията за кръгова икономика. През декември 2015 г. Европейската комисия публикува План за действие за налагане на кръгова икономика, поставяйки я на централно място за въвеждането на политика за устойчиво развитие [1]. С този план Европейският съюз (ЕС) цели да направи икономическия си модел по-устойчив. Приет е пакет от мерки, който включва нови законодателни предложения в областта на отпадъците и План за действие с мерки за всеки етап от производствения цикъл – от дизайн през производството и използването до управлението на отпадъците и рециклирането. Предложените действия ще допринесат за „затваряне на кръга“ в рамките на жизнения цикъл на продуктите чрез увеличаване на рециклирането и повторната употреба и ще бъдат от полза както за околната среда, така и за икономиката [2]. Всички суровини, продукти и отпадъци ще бъдат използвани оптимално, което ще доведе до увеличаване на икономии на енергия и намаляване на емисиите на парникови газове. Предложенията обхващат пълния жизнен цикъл на продуктите – от производството и потреблението до управлението на отпадъците и пазара на вторични суровини. Планът също така дефинира приоритетни области, които се изправят пред специфични предизвикателства. Според документа, към тези предизвикателства трябва да се подходи чрез изменение на съответните закони и внедряване на законодателни инициативи между 2015 и 2019 г. Този процес вече е започнал с въведените директиви за депонирането на отпадъци и увеличаване използването на органични и базирани на отпадъчни материали торове.

Директива 2012/19/ЕС на Европейския парламент и на Съвета на Европейския съюз относно отпадъци от електрическо и електронно оборудване (ОЕЕО) допълва общото законодателство на ЕС в областта на управлението на отпадъците [3]. С разрастването на пазара и с постоянното съкращаване на иновационните цикли се увеличава подмяната на оборудването, което превръща Електрическото и електронно оборудване (ЕЕО) в бързо растящ източник на отпадъци. Съставът на опасните компонентни в ЕЕО е основен проблем на фазата на управление на отпадъците и рециклирането на ОЕЕО не се извършва в необходимата степен. Липсата на рециклиране води до загуба на ценни ресурси. Целта на Директива 2012/19/ЕС е да допринесе за устойчивото производство и потребление основно чрез предотвратяване на ОЕЕО и, в допълнение на това – чрез повторната употреба, рециклирането и други форми на оползотворяване на такива отпадъци, така че да се намали обезвреждането на отпадъци и да се допринесе за ефективното използване на ресурсите и за извличането на ценни вторични суровини. Тя също така цели подобряване на свързаните с околната среда резултати от работата на операторите, които участват в жизнения цикъл на ЕЕО.

Разликите в прилагането на национално ниво на принципа за отговорността на производителя може да доведат до значителни несъответствия във финансовата тежест, която се поема от икономическите оператори. Наличието на различни национални политики за управление на ОЕЕО ограничава ефективността на политиките за рециклиране. Поради тази причина основните критерии следва се определят на ниво ЕС и следва да се разработят минимални стандарти за третирането на ОЕЕО.

2. КРЪГОВАТА ИКОНОМИКА - ПРИОРИТЕТ ЗА ЕВРОПЕЙСКИЯ СЪЮЗ

Концепцията за кръгова икономика започва да се развива като алтернативен икономически модел през 70-те години, поставяйки под съмнение традиционната линейна икономика [4]. Дотогава е прилаган линеен процес, насочен към висока производителност и ниски разходи за производство, разчитайки на изобилието от суровини на сравнително ниска цена. Ресурсите на планетата обаче са ограничени и е нужно разумно отношение към тях. Решението би могло да бъде многократното използване, поправката и рециклирането на продукти и материали. Целта е да бъде удължен жизненият цикъл на продуктите. Това може да се постигне чрез подобряване на издръжливостта, улесняване на поправката и повторното използване на продуктите, както и чрез по-ефективно управление на отпадъците. За да се постигне икономически растеж е необходимо да се промени използваният **линеен модел** на икономически растеж „*вземи, произведи и изхвърли*“ и да се премине към

кръгов модел, при който енергийните ресурси се използват *многократно по време на техния жизнен цикъл* или до т.н. „**кръгова икономика**“.

Стремежът е да се постигне различен икономически модел (фиг.1), при който повторното използване, поправянето и рециклирането са норма, а отпадъците остават в миналото.

Фиг.1. Модел на кръгова икономика

Основната идея на кръговата икономика е запазването на стойността на продуктите и материалите възможно най-дълго време. Генерирането на отпадъци и използването на ресурси са сведени до минимум и ресурсите се запазват в икономиката, когато продуктът достигне края на жизнения си цикъл. Отпадъците от своя страна се използват многократно за създаване на допълнителна стойност [5].

Преходът към кръгова икономика се основава на три стълба:

- ползи за околната среда, особено по отношение на ограничаване на въздействието върху нея и намаляване използването на ресурси;



- спестяване на разходи от понижените нужди от природни ресурси;
- създаване на нови пазари, предоставящи допълнителни икономически ползи от кръгови практики, например по отношение на създаването на работни места или подобряване на благосъстоянието.

Кръговата икономика може да повиши ефективността при използването на първични суровини в Европа и света чрез запазване на материали, включени във високостойностни продукти или чрез връщане на отпадъци в икономиката като висококачествени вторични суровини. Това ще спомогне за намаляване на зависимостта на европейските страни към внос от други държави. По този начин веригите за доставка в много сектори няма да се влияят от нестабилността на международните стокови пазари и несигурността на доставките, дължащи се на недостиг и/или геополитически фактори.

Икономическите модели, които са насочени към използване на отпадъците като ресурси, насърчават междусекторните връзки чрез създаване на пазари за вторични суровини. По този начин може да се намали използването на енергия и материали по време на производството и последващата употреба, както и да се улеснят дейностите за предотвратяване превръщането на вторични продукти в отпадъци, т. нар. индустриална симбиоза.

Положителни икономически ефекти могат да възникнат в резултат от наличието на по-евтини материали, добити от отпадъци, като алтернатива на нови материали, включително избягване на разходите за обезвреждане на отпадъците и усвояване на остатъчната икономическа стойност на съществуващите материални потоци. Положителни екологични ефекти могат да бъдат измерени като нетно намаление на натиска върху околната среда от депонирането на отпадъци и производство на нови материали.

Удължаването на живота на продуктите, повторното използване на продукти и техните компоненти, както и преработката, са ключов елемент на кръговата икономика. При повторната употреба се съхраняват физическите характеристики на суровините, както и енергията, вложена в продуктите и техните съставни части.

Електрическото и електронно оборудване е неизменна част от ежедневието ни, като бързото технологично развитие в сектора води до постоянен поток от нови решения и скъсяване на експлоатационния живот на продуктите. В световен мащаб годишното количество Излязло от Употреба Електрическо и Електронно Оборудване (ИУЕЕО) на човек варира от 7 до 20 кг/човек/год. Факторите, обуславящи необходимостта от рециклиране на ИУЕЕО, са икономически, екологични и здравни.

Електронните устройства съдържат над 60 различни елемента, много от които са ценни. Производителите от сектора са основен консуматор на благородни и специални метали като никел и никелови сплави, кобалтови сплави, титан и титаниеви сплави. Затова от ключово значение за индустрията е да се установи цикличен поток с цел да бъдат възстановени тези ценни метали и елементи. С изчерпването и поскъпването на суровините, инвестициите в технологии за рециклиране на ИУЕЕО стават все по-мащабни.

В допълнение към възстановяването на ценни метали, рециклирането на

ИУЕЕО редуцира и въздействието върху околната среда при първичното производство на тези продукти. То обикновено е свързано с енергоемки етапи като добив и топене на благородни и специални метали, които оказват значителен ефект върху емисиите на въглероден диоксид.

Отпадъците от електрическо и електронно оборудване представляват съществен екологичен и здравен риск, ако не се управляват правилно.

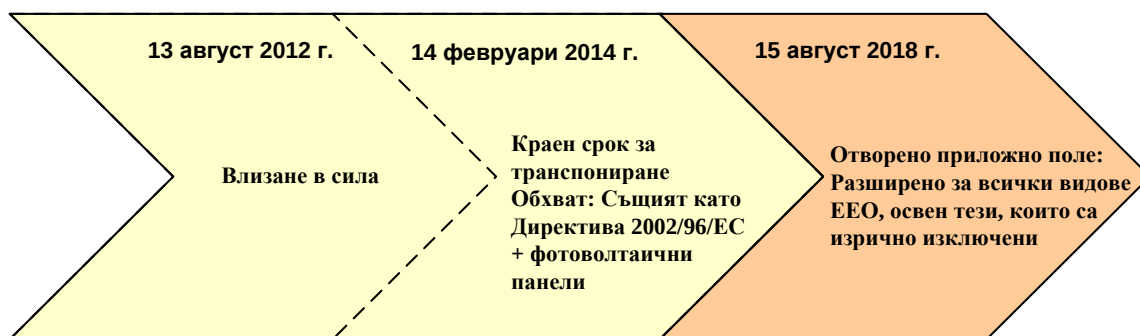
За осигуряване на устойчивото развитие на икономиката и повишаване потреблението на уреди без да се нарушават екологичния и суровинния баланс е необходимо създаването на системи за разделно събиране и внедряването на технологии за ефективно използване на материалите, съдържащи се в излязлото от употреба електрическо и електронно оборудване.

3. ДИРЕКТИВА 2012/19/ЕС - ЧАСТ ОТ ОБЩОТО ЗАКОНОДАТЕЛСТВО НА ЕС В ОБЛАСТТА НА УПРАВЛЕНИЕТО НА ОТПАДЪЦИТЕ

Общата цел на Директива 2012/19/ЕС е:

- да се предотвратят или намалят негативните въздействия върху околната среда, произтичащи от генерирането и управлението на ИУЕЕО и от използването на ресурси;
- да допринася за устойчиво производство и потребление основно чрез превенция на ИУЕЕО и в допълнение - чрез повторна употреба, рециклиране и други форми на оползотворяване на такива отпадъци.

Директива 2012/19/ЕС относно ОЕЕО влиза в сила на 13 август 2012 г. и отменя старата Директива относно ОЕЕО (Директива 2002/96/ЕО). Периодът между 13 август 2012 г. и 14 август 2018 г. е преходен период (фиг.2).



Фиг.2. Приложение на Директива 2012/19/ЕС

По време на този период обхватът на директивата е идентичен към обхвата на старата директива (10 категории на електрическо и електронно оборудване (ЕЕО)) с изключение на фотоволтаичните панели (PV панели), които са добавени към обхвата на директивата. След 15 август 2018 г. директивата вече има „отворено приложно поле” и цялото ЕЕО трябва тогава да се класифицира в една от шестте нови категории, посочени в приложение III. Съгласно отвореното приложно поле всяко оборудване, което попада под дефиницията за ЕЕО, е в обхвата на Директивата. Според член 3 (1) (а) „Електрическо и електронно оборудване“ или „ЕЕО“ означава *оборудване, което е зависимо от електрически ток или електромагнитни полета, за да функционира правилно, както и оборудване за*

генериране, пренос и измерване на такъв ток и полета и проектирано за употреба с напрежение не повече от 1000 V за променлив ток и 1500 V за постоянен ток. От периода на отвореното приложно поле нататък ЕЕО е извън обхват, само ако попада в някое от изключенията, изрично споменати в член 2, параграфи (3) и (4) на Директивата.

Член 2 на Директива 2012/19/ЕС определя обхвата ѝ и дава списък на оборудването, изключено от обхвата.

През април 2014 г. Европейската Комисия изготвя документ *Често задавани въпроси към Директивата* [6]. Документът е предназначен главно да окаже помощ на компетентните публични органи и икономически оператори да тълкуват разпоредбите на директивата за осигуряване спазването на изискванията на директивата. Въпреки че директивата е адресирана само към държавите членки, правата и задълженията за частните страни произтичат изключително от мерките на органите на държавите членки за прилагането ѝ. Част 1 от Приложението на [6] съдържа „дърво на решенията”, което да се използва за решаване на това дали едно оборудване отговаря на дефиницията за ЕЕО и като такава попада в обхвата на директивата. Част 2 от Приложението на [6] дава описание на критериите, определящи дали продуктът попада в обхвата на директивата, както и описание и редица примери за изключения от обхвата.

4. НАЦИОНАЛНО ЗАКОНОДАТЕЛСТВО, СВЪРЗАНО С ИУЕЕО

Директивата е акт, който обвързва по отношение на постигането на даден резултат от държавите-членки, до които е адресиран, като оставя на националните власти свобода при избора на формата и средствата за постигане на този резултат. За въвеждане на изискванията на Директива 2012/19/ЕС на Европейския парламент и на Съвета от 4 юли 2012 г. относно отпадъци от електрическо и електронно оборудване Министерски съвет в Р България приема НАРЕДБА за излязлото от употреба електрическо и електронно оборудване (Приета с ПМС № 256 от 13.11.2013 г., обн., ДВ, бр. 100 от 19.11.2013 г., в сила от 1.01.2014 г.) [7]. С Наредбата се определят изискванията за разделното събиране, транспортирането, съхраняването, предварителното третиране, повторната употреба, рециклирането, оползотворяването и/или обезвреждането на ИУЕЕО. С Наредбата се регламентират:

- въвеждането на изисквания за проектиране и маркиране на ЕЕО;
- извършването на дейностите по разделно събиране, транспортиране, съхраняване, предварително третиране, подготовка за повторна употреба, оползотворяване и/или обезвреждане на ИУЕЕО без риск за човешкото здраве и околната среда;
- информирането на крайните потребители за ролята им в разделното събиране на ИУЕЕО и за наличните системи за разделно събиране;
- случаите и условията за носене на отговорност от първоначалния причинител на ИУЕЕО по цялата верига от неговото събиране до третирането му, както и за споделяне и прехвърляне на отговорността между лицата, участващи във веригата за събиране и третиране на ИУЕЕО;
- мерките, които определят носенето на разширена отговорност от производителите

лите, в т.ч. лицата, които пускат на пазара ЕЕО.

Наредбата за ИУЕЕО е изцяло съобразена с въведените в Закона за управление на отпадъците (ЗУО) принципи на ЕС за покриване на разходите за разделно събиране, предварително третиране, оползотворяване и обезвреждане на отпадъци - *“замърсителят плаща”* и *“отговорност на производителя”*. Според Чл. 10. (1) от Наредбата за ИУЕЕО, лицата, които пускат на пазара ЕЕО, отговарят за разделното събиране, транспортирането, съхраняването, предварителното третиране, подготовката за повторна употреба, рециклирането, оползотворяването и обезвреждането на ИУЕЕО, образувано от пуснатото от тях на пазара ЕЕО. Количеството ИУЕЕО (в тонове), което всяко лице, пускащо на пазара ЕЕО, е длъжно да събере, е равно на частта от количеството, за което са отговорни всички лица за съответната година, съответстваща на пазарния му дял за същата година. Като пазарният дял се изчислява съгласно формула (1) за всяка една категория поотделно.

$$П[\%] = \frac{П_{ЛК} \cdot 100}{(П_H + П_{H_1} + П_{H_2}) / 3}, \quad (1)$$

където $П[\%]$ е пазарният дял на лицето за съответната категория; $П_{ЛК}$ е пуснатото на пазара ЕЕО от съответната категория през съответната година; $(П_H + П_{H_1} + П_{H_2})$ е пуснатото на пазара ЕЕО на Република България от съответната категория от всички лица през предходните три години.

Според Ч.57 (1) от Наредбата за ИУЕЕО ежегодно до 30 ноември въз основа на събраните данни по чл. 50 – 56 изпълнителният директор на Изпълнителната агенция по околна среда (ИАОС) изготвя и представя на министъра на околната среда и водите доклад за предходната година относно прилагането на разпоредбите на наредбата на национално ниво.

Както се вижда от доклада от ИАОС от ноември 2017 г. [8], Р България е изпълнила целта си по събиране на ИУЕЕО, образувано за 2016 г., като събраното ИУЕЕО е 48 779,9 т. Заложените цели за този период по рециклиране и оползотворяване на ИУЕЕО също са изпълнени.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

След като декември 2015 г. прие пакет от мерки за въвеждане кръгова икономика, през 2017 г. Европейската Комисията представи доклад [9] за изпълнението и напредъка по ключови инициативи от своя план за действие от 2015 г. Освен доклада Комисията:

- създаде платформа за финансова подкрепа на кръговата икономика заедно с Европейската инвестиционна банка (ЕИБ). Платформата ще свързва новаторите с инвеститори;
- публикува насоки за държавите от ЕС относно производството на енергия от отпадъци;
- предложи целево подобряване на законодателството за определени опасни вещества в електрическото и електронното оборудване.

Направеният преглед следва да помогне на производителите на ЕЕО и на материали

и компоненти за него, както и на лицата, пускащи на пазара ЕЕО, да поемат своите задължения и отговорности, свързани с разделно събиране, транспортиране, съхраняване, предварително третиране, рециклиране, оползотворяване и обезвреждане на ИУЕЕО. Вредното въздействие на ИУЕЕО може да бъде ограничено само чрез съгласувани действия на правителството, производителите, предприятията, ангажирани с разделното събиране, и потребителите.

Преходът към кръгова икономика предлага големи възможности на Европа и нейните граждани. Той е важна част от нашите усилия за модернизиране и трансформиране на европейската икономика, поемайки в една по-устойчива посока.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_bg.htm (посетен 5.09.2018 г.)
- [2] https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_bg (посетен 05.09.2018 г.)
- [3] <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/BG/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=BG> (посетен 05.09.2018 г.)
- [4] <https://www.ecology-and-infrastructure.bg/bg/broi-1/6/20/> (посетен 05.09.2018 г.)
- [5] <https://www.energbg.com/blog-circular-economy-energbg/> (посетен 05.09.2018 г.)
- [6] <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/faq.pdf> (посетен 05.09.2018 г.)
- [7] <http://eea.government.bg/bg/nsmos/waste/naredba-eeo> (посетен 05.09.2018 г.)
- [8] <http://eea.government.bg/bg/nsmos/waste/dokumenti/dokumentiNEW/DokladWEE E2016final.pdf> (посетен 05.09.2018 г.)
- [9] https://europa.eu/rapid/press-release_IP-17-104_bg.pdf (посетен 05.09.2018 г.)

Автор: Калинка Тодорова, доцент д-р, катедра “Обща електротехника” (ОЕ), Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: ktodorova@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Иван Костов

ОГРАНИЧАВАНЕ НА ВРЕДНОТО ВЛИЯНИЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНОТО ПОЛЕ

Захари Иванов, Ива Драганова - Златева, Владимир Шаламанов

Резюме: Ползвайки съществуващите познания и резултатите от досегашните изследвания, се посочват възможни вредни последствия на електромагнитните полета върху здравето на човека и начините за предотвратяване на тези последствия. Изследвани са яркостите и светимостите на различни видове монитори. Разработвани са предложения на мероприятия за защита от вредното влияние на електромагнитни полета (ЕМП).

Ключови думи: електромагнитно поле, електрическо оборудване, защита, яркост

DEFENSE FROM DETRIMENTAL INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN ELECTRIC EQUIPMENT

Zahari Ivanov, Iva Draganova -Zlateva, Vladimir Shalamanov

Abstract: Using existing knowledge and the results of previous studies, indicate possible harmful effects of electromagnetic fields on human health and how to prevent these consequences. The brightness and lightness of different monitors have been studied. Proposals for measures to protect against harmful electromagnetic fields (EMF) have been developed.

Keywords: electromagnetic field, electric equipment, defense, brightness

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години са направени много значими изследвания за възможни вредни последствия на електромагнитните полета върху здравето на човека. Изследователите сега се опитват да идентифицират упоменатите влияния, които биха могли да засегнат здравето на хората. Тези влияния трябва внимателно да се проучат и това има първостепенно значение за опазването на здравето на хората. Все повече се засилва мнението, че електромагнитните полета, произведени по различни начини, от електропроводи, до мобилните телефони и мониторите предизвикват различни заболявания, включително и рак. По този въпрос, поради недостатъчни познания, все още няма единствено становище.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

Източници на електрически и магнитни полета са [2]: а) DC източници - магнитосфера, магнитен резонанс; б) AC източници - проводниците, намотки. Полета с много ниска честота -до 3 kHz. Полета с много ниски честоти (МНЧ)

в нашето обкръжение са: а) електроенергийната система; б) надземни енергийни проводници; в) подземни кабели; г) трансформаторни станции; д) електрически инсталации; е) превозни средства; ж) електрически уреди; з) компютри и телевизори.

Табл.1.

Стандарти и директиви за излагане на магнитни полета

Институция/ държава	Ниво (μT)	
	Работна среда	Битова среда
ANSI/IEEE (1991 г.)	205	205
Австралия (1989 г.)	500	100
Канада (1989 г.)	5,01	2,26
Масачусетс (1986 г.)	1,99	-
Германия	314	314
НАТО (1976 г.)	3,27	-
BBC на САЩ (1987 г.)	1,99	1,99

Табл. 2.

Стандарти за много ниско честотни полета в Швеция

Честотен обхват	MPR 2	TCO
Електрически полета		
Статични полета	+/- 500 V	+/- 500 V
Обхват 1	$\leq 25 \text{ V/m}$	$\leq 10 \text{ V/m}$
Обхват 2	$\leq 2,5 \text{ V/m}$	$\leq 1 \text{ V/m}$
Над 400 kHz	-	-
Магнитни полета		
Обхват 1	$\leq 0,25 \mu\text{T}$	$\leq 0,2 \mu\text{T}$
Обхват 2	$\leq 0,025 \mu\text{T}$	$\leq 0,025 \mu\text{T}$
Над 400 kHz	-	-

3. РЕГУЛАТОРНИ ДЕЙНОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ ПО БЕЗОПАСНОСТТА

В табл.1-табл.5 са дадени нормите за допустимото излагане на електромагнитни полета [1, 2, 3, 4, 6].

Табл.3.

Ефективни стойности на допустимото излагане на електрическо и магнитно поле на Комисия за защита от не йонизираща радиация

	Електрическо поле – kV/m (ефективна стойност)	Магнитно поле - μT (ефективна стойност)
Работна среда		
Цял ден	10	0,5
Кратък период (2 часа/ ден	30	5
За крайници	-	25
Битова среда		
Цял ден	5	0,1
Няколко часа на ден	10	1

Табл. 4.*Норми за излъчване УВЧ и СВЧ*

Специфична мощност , W/m^2	Допустимо време за престой в зоната на въздействие на ЕМП
до 0,1	Работен ден
0,1 – 1	Не повече от 2 ч
1-10	Не повече от 10 мин.

Табл.5.*Допустимо време за престой при напрежение 400 kV и над 400 kV*

Електрическо поле kV/m	Допустимо време за престой в зоната на въздействие, мин.
< 5	Без ограничение
5÷10 10÷15	(работен ден) < 180
15÷20 20 ÷ 25	< 90 < 10 < 5

На фиг.2 са посочени разстоянията на опасните зони при високо напрежение.

Управление на полето

На фиг. 3 [3] е даден пример за отслабване на магнитни полета чрез пасивно брониране в трансформаторното помещение и електрическото табло.

Когато магнитопроводите за дроселите са направени от магнитен материал със Z хистерезисен цикъл и без въздушна междина се ограничава влиянието на магнитното поле [7,8].

Източници на електрически и магнитни полета са [2]: а) DC източници - магнитосфера, магнитен резонанс; б) AC източници - проводниците, намотки.

Полета с много ниска честота - до 3 kHz.

Полета с много ниски честоти (МНЧ) в нашето обкръжение са: а) електроенергийната система; б) надземни енергийни проводници; в) подземни кабели; г) трансформаторни станции; д) електрически инсталации; е) превозни средства; ж) електрически уреди; з) компютри и телевизори.

Целта на работата е, ползвайки съществуващите познания и резултатите от досегашните изследвания, да се посочат възможни вредни последствия на електромагнитните полета върху здравето на човека и начините за предотвратяване на тези последствия.

През последните години са направени много значими изследвания на тези ефекти. Изследователите сега се опитват да идентифицират упоменатите влияния, които биха могли да засегнат здравето на хората.

Тези влияния трябва внимателно да се проучат и това има първостепенно значение за опазването на здравето на хората. Все повече се засилва мнението, че

електромагнитните полета, произведени по различни начини, от електропроводи, до мобилните телефони и мониторите предизвикват различни заболявания, включително и рак. По този въпрос, поради недостатъчни познания, все още няма единствено становище.

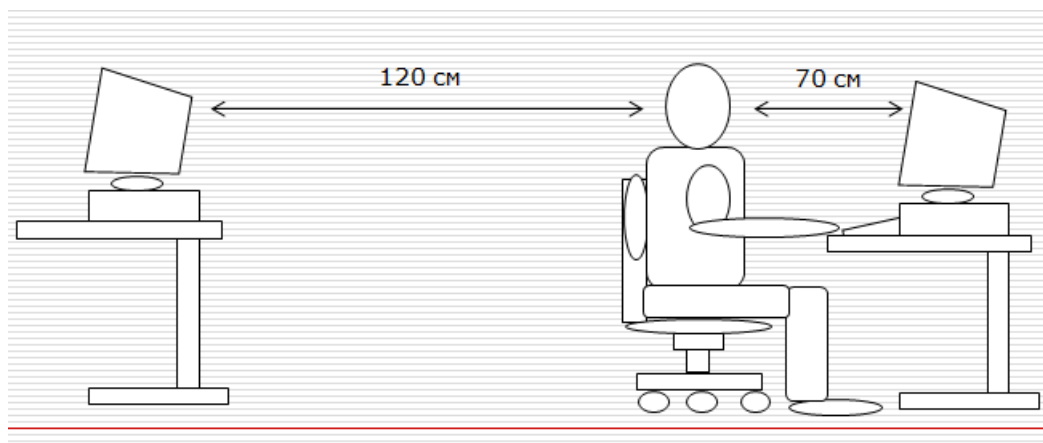
4. МЕРОПРИЯТИЯ ЗА ЗАЩИТА ОТ ВРЕДНОТО ВЛИЯНИЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ ПОЛЕТА

Общи процедури за намаляване на нивата на електрическите и магнитните полета на работното място и в жилищата са:

1. Определяне на източници на електромагнитни полета;
2. Използване на снопове от кабели и усукани кабели за създаване на по-слаби полета;
3. Поставяне на разпределителни табла далеч от помещения, които повече се използват;
4. Поставяне на правилно заземяване;
5. Поставяне на високо натоварени инсталации по далеч от помещения, които повече се използват;
6. Избягване на разделяне на фаза и нулев проводник;
7. Поставяне на уреди, консумиращи повече електрическа енергия, като бойлер, по-далеч спални помещения, кухня и подобни;
8. Избягване на използване на уреди, като електрически часовник, в близост до леглото;
9. Като крайно решение, да се използват техники за ограничаване и намаляване на нивото на полето. Техника за ограничаване, поразбира мерки за пренасочване на полето около зоната, която се счита за чувствителна, или задържа не на полето в рамките на източника, който го произвежда

5. МЕРОПРИЯТИЯ ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА ВЪЗДЕЙСТВИЕТО ОТ ЕЛЕКТРОМАГНИТНИТЕ ПОЛЕТА ПРИ РАБОТА С КОМПЮТЪР

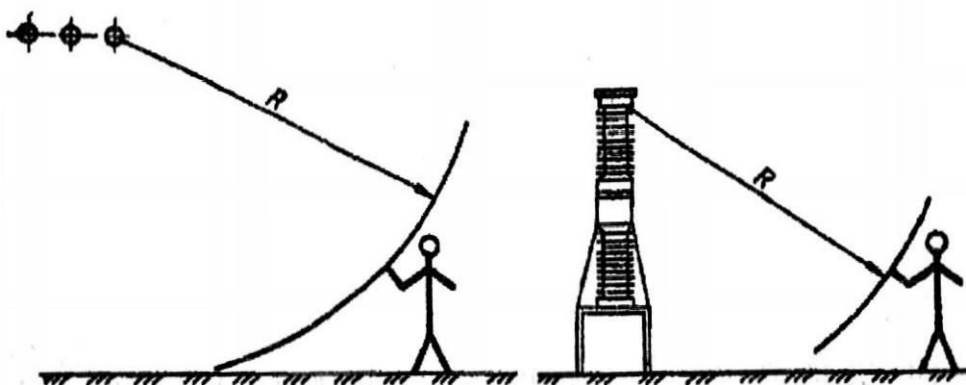
- 1) Използване на монитори със слабо излъчване;
- 2) Препоръчва се с цел намаляване на напрежение в очите, работещите пред монитора да взимат почивка, например на всеки час работа пред монитора;
- 3) Повечето полета идват от индукционните компоненти, които се намират отстрани или отзад на монитора. Съответно, трябва да се избягва работа на места, които са на отстояние по-малко от 1,2 m [3] (фиг.1);



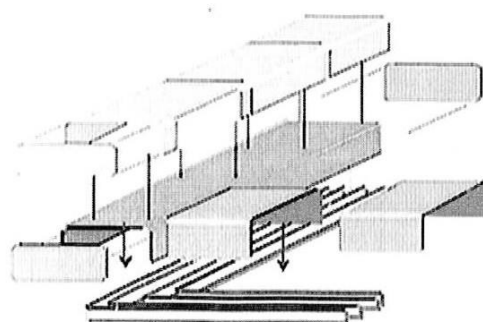
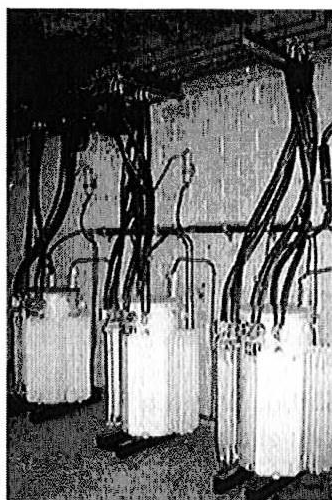
Фиг.1. Препоръчително отстояние от мониторите при работа с компютър

- 4) Да се седи на разстояние най-малко 70 cm от екрана, тъй като магнитните полета рязко намаляват с отдалечаването от монитора (фиг.1);
- 5) При работа с монитор целесъобразно е използването на подходящи очила (очилата да не са с метална рамка).
- 6) Да не се слага легло до стената до която се намира компютър, понеже строителните материали не предпазват от магнитното поле.
- 7) Преди да започнете да ползвате компютър, трябва да го държите няколко дни в проветриво празно помещение, за да се освободи от излишните газове.
- 8) Използване на осветители с подходяща светлоразпределителна крива и габаритна яркост и тяхното правилно разположение в помещението, съгласно БДС EN 12464-1/ 2011;
- 9) Изключване на компютъра, когато не се използва;
- 10) При преносимите компютри (лаптопи) под клавиатурата на лаптопа има силно съсредоточени електромагнитни излъчвания. Поради това когато се използва отделна клавиатура може да се екранира компютърната част с пет странна защитна кутия (от магнитно защитно фолио), която е отворена в задната си част (фиг.4) [5]. По-голямата част от магнитното поле на лаптопа идва от неговата долна част и няма да има нужда от защита на екрана.
- 11) За защита от електрическите полета от CRT монитори е необходимо защита на страните и задната част на монитора с допълнителна кутия (фиг. 5). Тази кутия е изработена от фино надупчено фолио, което е високо проводимо [5]. Дупчиците позволяват по-лесна въздушна циркулация и по-малко тегло, докато проводимостта осигурява отлична защита. По този начин се намаляват вредните излъчвания от задната част на монитора и хората около монитора са много по защитени.

- 12) Поставяне на предпазен екран на монитора, който намалява ултравиолетовото излъчване (UV-A / UV-B), и елиминира статичното електричество.



Фиг.2. Радиуси на опасните зони на влияние: $R < 20$ т за $(400+500)$ kV;
 $R < 30$ т за 750 kV

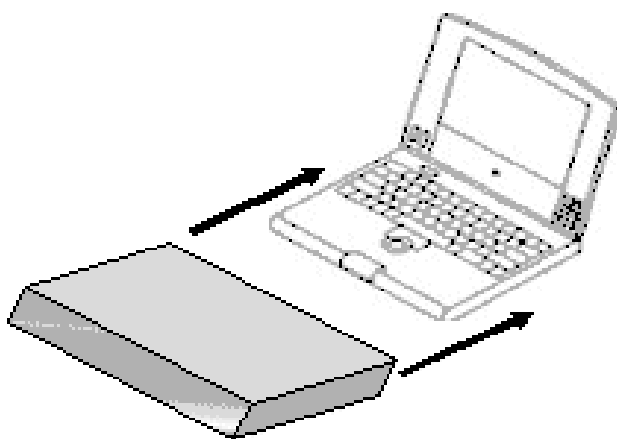


Фиг. 3. Пасивно брониране в трафопост

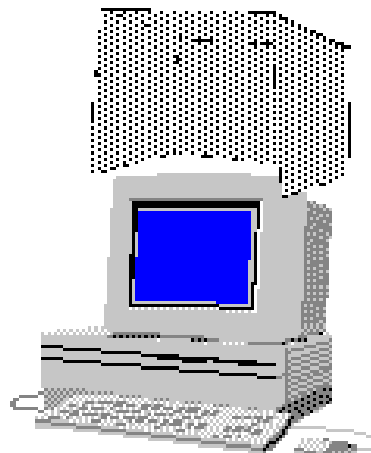
За дисплеи с яркост на фона $L_f > 200 \text{ cd/m}^2$ се допуска $L_{\text{макс}} \leq 3000 \text{ cd/m}^2$.

За дисплеи с яркост на фона $L_f < 200 \text{ cd/m}^2$ – яркостта на светещата повърхност на осветителя в посочената зона трябва да бъде $L_{\text{макс}} < 1500 \text{ cd/m}^2$.

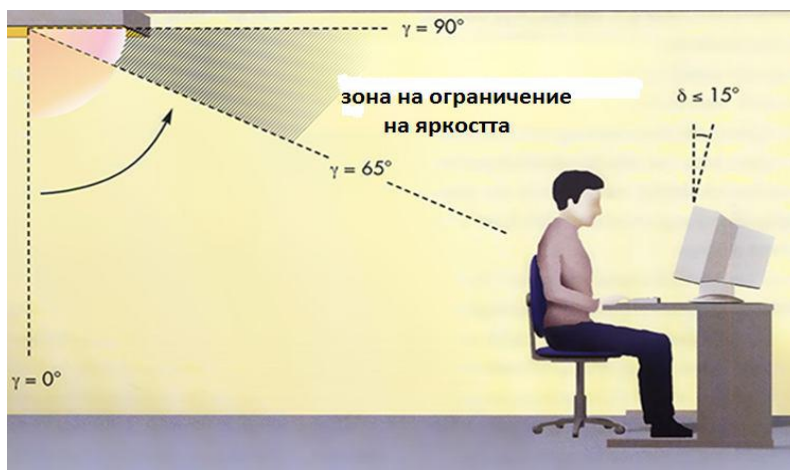
Новото поколение монитори са с яркост на фона $L_f > 200 \text{ cd/m}^2$.



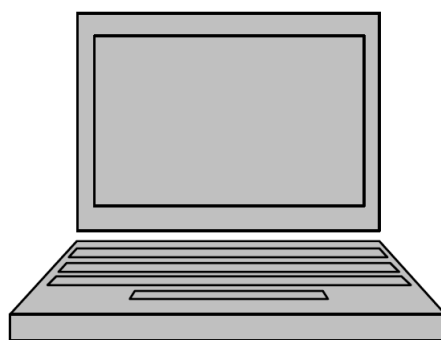
Фиг.4. Защита на лаптоп от електромагнитни полета



Фиг.5. Защита на монитор от електромагнитни полета



Фиг.6. Изискване за ограничаване на габаритната яркост на осветителите в помещението

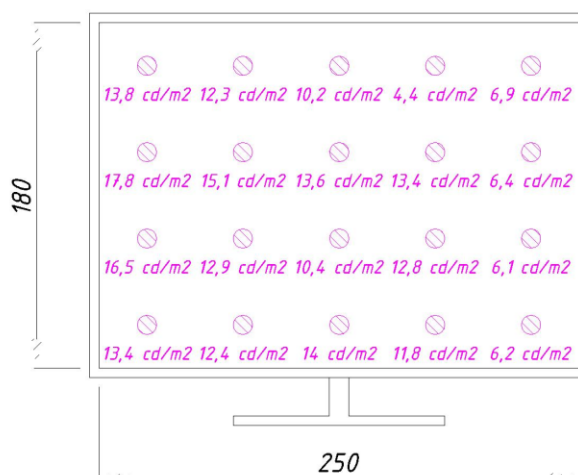


Фиг.7. Изискване за ограничаване на габаритната яркост на осветителите при работа с лаптоп в помещението

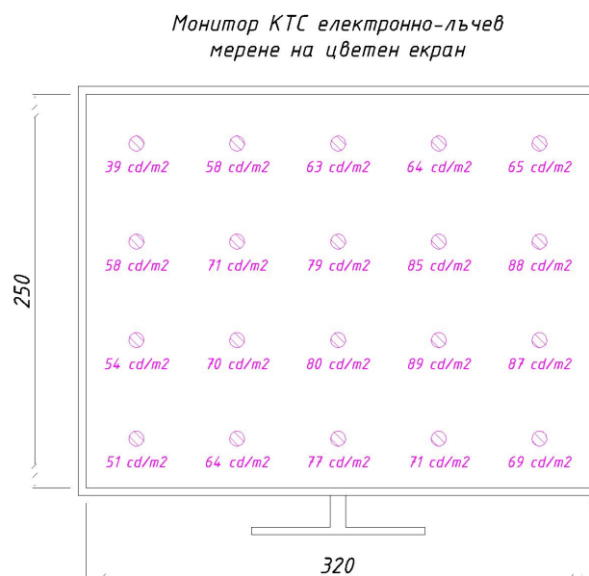
За **портативни компютри** (тип Notebook, Laptop, iPad) описаните изисквания на БДС EN 12464-1: 2011 **не се използват**. Тяхното разположение и наклон на монитора могат да бъдат най - различни. Затова за предпазване от отражение ползващият променя ориентацията на лаптопа.

6. ИЗМЕРВАНЕ ЯРКОСТТА НА МОНИТОРИ ЗА КОМПЮТРИ

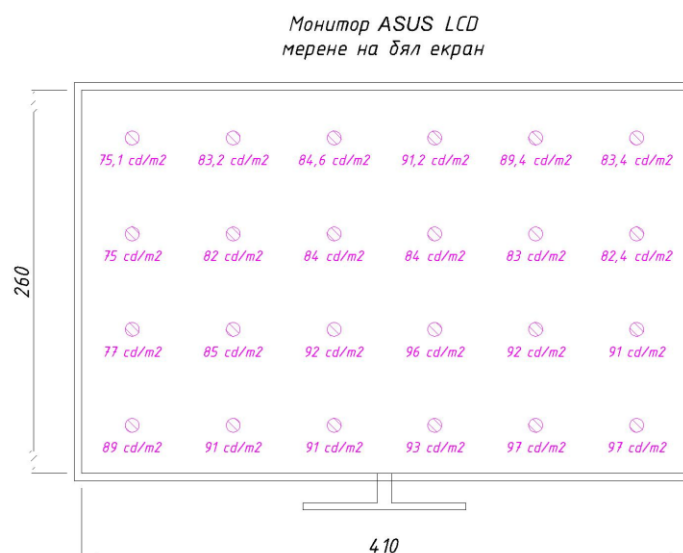
*Монитор Провец-8 електронно-лъчев
цвят черно-бял (зелен шрифт)*



Фиг.8. Разпределение на яркостите на монитор “Провец 8”.



Фиг.9. Разпределение на яркостите на монитор “КТС”.



Фиг.10. Разпределение на яркостите на LCD монитор “ASUS”.

Измервани са три различни монитора. Първият монитор е ”Правец8” - черно бял, електронно лъчев , вторият монитор е “КТС - цветен , електронно лъчев третият монитор е “Asus” LCD.

Средната яркост (L_{cp}) и равномерности на яркостта (g_1) за монитор ”Правец8” са следните: $L_{cp} = 11,52 \text{ cd/ m}^2$ $g_1 = 0,0955$.

Средната яркост (L_{cp}) и равномерности на яркостта (g_1) за монитор ”КТС” са следните: $L_{cp} = 80,62 \text{ cd/ m}^2$ $g_1 = 0,4837$.

Средната яркост (L_{cp}) и равномерности на яркостта (g_1) за монитор ”ASUS” LCD са следните: $L_{cp} = 87,01 \text{ cd/ m}^2$ $g_1 = 0,839$.

След направените измервания и анализ на резултати се оказа, че нито един от трите монитора не е в нормите за средна яркост определена от производителя. Средната яркост на CRT монитори е между 100 cd/m^2 и 150 cd/m^2 . Средната яр-

кост на трите компютърни монитори е под 100 cd/m^2 . Видно е, че трите дисплеи са с много малка яркост. В заключение смятаме, че е редно и трите монитора да не се използват тъй като са морално и технически остарели и не отговарят на изискванията за употреба.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Електромагнитни полета (ЕМП), произведени по различни начини, от мобилните телефони до електропроводи, предизвикват различни нервни, сърдечни, ракови и други заболявания. Поради недостатъчни изследвания при стационарни и нискочестотни полета, с промишлена честота (50/60) Hz, има различни становища за отрицателното влияние на ЕМП. Не трябва да се пренебрегва въпросът за вредните влияния на стационарни и нискочестотни ЕМП върху здравето на човека. Този въпрос е много актуален през последните години. Съществуват убедителни доказателства, че високочестотните ЕМП, при определени условия, имат отрицателни последствия върху човешкото здраве. Въз основа на резултатите от досегашните изследвания могат да посочат възможни вредни последствия на тези полета за здравето на човека, да се приемат нормативни документи да се предложат начините за предотвратяване на тези последствия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Riadh W. Y. Habash *Electromagnetic Fiels and Radiation*, Marchel Dekker Inc, New York- Basel
- [2] IEEE Spectrum, Special Report –*Electromagnetic fiels: the jury's styll aut*, Fitzgerald, Morgan and Nair august 1990.
- [3] Lakis D., *Influence of electric and magnetic fiels on human helth*, TU – Ilmenau
- [4] NRB, Avise on limiteing Exposure to Electromagnetic fiels (0-300GHz Nov 2004.)
- [5] <http://www.lessemf.com/mag-shld.html>
- [6] Иванов З. А., *Защита от вредното влияние на електромагнитните полета в електрическите съоръжения* , INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE " UNITECH 08", 21-22 November 2008, Gabrovo, pp. I-75÷ I-79.
- [7] Slavkova M., Milanov K., *Reduction of IGBT Turn-on Losses via Saturable Choke with F Characteristic of the Magnetic Core*, "Proceedings of XXth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIElA 2018), 3-6 June, 2018.
- [8] Milanov K., Slavkova M., *Design of Saturable Choke for Reduction of IGBT Turn-on Losses*, " Proceedings of XXth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIElA 2018), 3-6 June, 2018.

Автори: Захари Иванов, проф. д-р, катедра ЕСЕО, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: zai@tu-sofia.bg; Ива Драганова-Златева, гл.ас. д-р, катедра ЕЕ, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: ivadraganova@tu-sofia.bg , Владимир Шаламанов, маг. инж., фирма „Алфа лайт”, E-mail address: alphalight@abv.bg

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Симона Петракиева

КАЧЕСТВО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНА СИСТЕМА, ЗАХРАНВАЩА ОБОСОБЕНИ КОНСУМАТОРИ

Анна Георгиева, Светлана Цветкова

Резюме: В статията са представени резултати от направено измерване и анализ на показателите за качество на електрическата енергия в електроснабдителна система, захранваща обособени консуматори в предприятие за оптични кабели. Целта на проведеното изследване е оценка на показателите и на правилното разпределение на товарите по фази.

Ключови думи: електроснабдителна система, качество на електрическата енергия, захранващо напрежение, хармоници.

QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN AN ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM, SUPPLING SEPARATE CONSUMERS

Anna Georgieva, Svetlana Tzvetkova

Abstract: The report presents the results of measurements and analysis of the quality indexes of electrical energy in an electrical supply system, supplying separate consumers in a fiber optic production plant. The aim of the research is to evaluate the indexes and the correct distribution of the loads by phases.

Keywords: electrical supply system, power quality, supply voltage, harmonics.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електрическата енергия, която се доставя до крайните потребители е необходимо да бъде с определено качество, за да осигури добра работа и удължен живот както на захранващите проводници и кабели, така и на оборудването. Качеството на електрическата енергия се характеризира с непрекъснатост на захранването, постоянна честота, постоянна големина и синусоидална форма на захранващото напрежение. В действителност тези параметри не могат да бъдат строго постоянни, защото им влияят редица системни и случайни фактори и варират около определени стойности.

Всеки консуматор на електрическа енергия е предназначен да работи при номинални или близки до тях параметри на електрическата енергия (напрежение, честота и др.), поради което за неговата нормална работа трябва да бъде осигурена качествена електрическа енергия [1].

Отклонението на напрежението оказва върху консуматорите и елементите на електроснабдителната система следните отрицателни въздействия: увеличава продъл-

жителността на технологичния процес; намалява производителността и увеличава себестойността на продукцията; разстройва технологичния процес и увеличава разхода на суровини и брака в продукцията; съкращава живота на изолацията, консуматорите и елементите на електроснабдителната система.

Несиметричните режими на напрежението и тока в електроснабдителните системи са кратковременни и продължителни. Кратковременната несиметрия възниква при несиметрични къси съединения. Причините за възникване на продължителната несиметрия са: несиметричен режим на напрежението на захранващия източник; непълнофазни режими на електрическата мрежа, предизвикани от изключване на линии и/или трансформатори по фази; неравномерно разпределение на товарите.

През последните години, нивата на хармониците се покачват много бързо в електрическите захранващи системи поради широкото разпространение на уреди с нелинейни характеристики, които генерират висши хармоници, IT оборудване, приемници на TV сигнали и др.

В работата са представени резултати от направено измерване и анализ на показателите за качество на електрическата енергия в електроснабдителна система, захранваща обособени консуматори в производствено предприятие за оптични кабели. Целта на проведеното изследване е оценка на показателите и на правилното разпределение на товарите по фази.

2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОКАЗАТЕЛИТЕ ЗА КАЧЕСТВО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

Измерването е проведено на извод ниско напрежение в електромерно табло, захранващо част от етаж на предприятие за производство на оптични кабели. Захранването се осъществява на ниско напрежение 0,4/0,23 kV с кабели и за осигуряване на непрекъснато електроснабдяване се използва дизел агрегат. От таблото се захранват електрически машини, електрически пещи за изпичане лепилото на кабелите, компютърни системи и луминесцентно осветление. Таблото е разделено на две секции. Инсталираната мощност на първа секция „Дизел генератор“ е 91,4 kW с работен ток 131,9 A. На втора секция „Работна“ инсталираната мощност е 12,7 kW с работен ток 18,3 A.

Измерването е проведено с преносим анализатор на качеството на електрическата енергия съгласно БДС EN 50160 [2], който позволява откриване и проследяване на потенциални дефекти и повреди в мрежата. Измервателният уред отговаря на IEC 61000-4-30 [3]. Приборът дава възможност за запис на: фазни и линейни напрежения, токове, мощност (активна, реактивна и пълна), честота на захранващото напрежение, отклонение на напрежението, хармонични съставки на напрежението и тока, общо хармонично изкривяване на напрежението и тока, несиметрия на напрежението и тока, бързи изменения на напрежението, фликер, пропадания и прекъсвания на напрежението.

Включването на измервателният уред е трифазно, директно към захранващото напрежение. За оценка на измерването се вземат под внимание пределните стойности на показателите за качество на електрическата енергия съгласно [1, 2, 4].

Периодът на измерване е една седмица от 15.05 до 22.05.2018 г., с период на осредняване от 10 минути. За всеки период от 10 минути се определят минималната, средната и максималната стойност на изследваните величини. За даденият период са събрани 1008 броя данни за всеки от показателите, разпределени съответно 287 броя през нощта от 23 до 6 часа и 721 броя по време на работния ден от 6 до 23 часа. Данните от измерванията са обработени със специализиран софтуер.

1.1. Честота

Честотата на захранващото напрежение за периода на измерване е почти постоянна, като нейната средна стойност е 50 Hz. Максималната стойност на честотата е 50,05 Hz, а минималната е 49,94 Hz. Максималното отклонение на честотата е -0,06 Hz (-0,12%). Следователно в 100% от измерванията, измерените стойности на честотата на захранващото напрежение отговарят на нормата от $50\text{Hz} \pm 1\%$ (49,5 Hz до 50,5 Hz) за период от една седмица, дадена в [1, 2, 4].

1.2. Напрежение

За номинално напрежение, служещо за опорно се използва напрежение 230 V и 400 V. Съгласно БДС EN 50160 при нормални условия на работа, 95% от средните ефективни стойности на захранващото напрежение за 10 минути трябва да бъдат в обхвата на $\pm 10\%U_N$ за всеки период от една седмица, т.е. в диапазона от 207 до 253 V и от 360 до 440 V.

Изменението на фазните напрежения е показано на фиг.1. В табл.1 са дадени минималната, средната и максималната стойност. Максималното отклонение на фазните напрежения е: 4,52% за L1, 4,13% за L2 и 4,04% за L3.

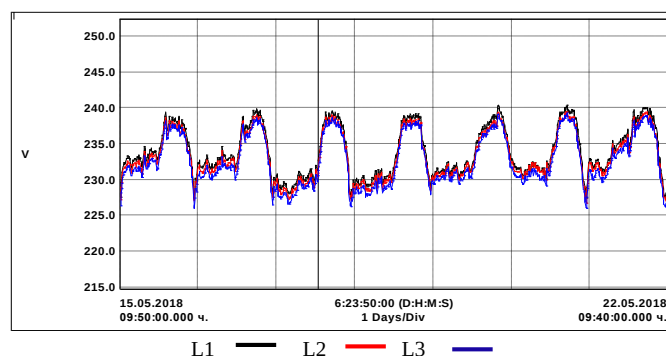


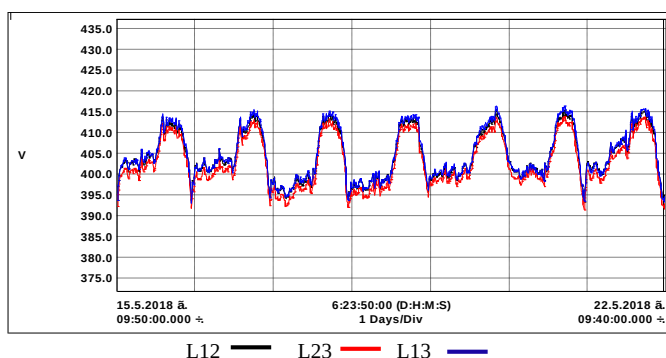
Таблица 1

Величина	Фаза	Стойност		
		Минимална	Средна	Максимална
Фазно напрежение, V	L1	227,3	233,9	240,4
	L2	226,7	233,3	239,5
	L3	226,0	232,7	239,3

Фиг.1. Изменение на фазните напрежения

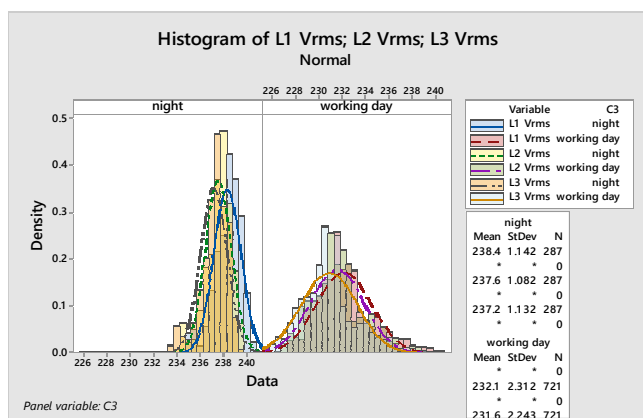
На фиг.2 е показано изменението на линейните напрежения, а в табл.2 са дадени минималната, средната и максималната им стойности. Максималното отклонение на линейните напрежения е съответно: 3,88% за L12, 3,50% за L23 и 4,10% за L13.

На фиг.3 са показани хистограмите на трите фазни напрежения. Вижда се, че както през нощта (неработно време), така и през деня (работно време) и трите напрежения имат нормално разпределение. Математическото очакване на фазните напрежения през нощта е 238,4V за L1, 237,6V за L2 и 237,2V за L3 и през деня е 232,1V за L1, 231,6V за L2 и 230,9V за L3.



Фиг.2. Изменение на линейните напрежения

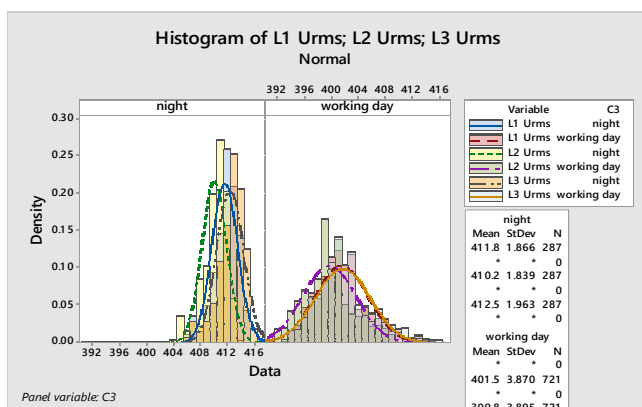
На фиг.4 са показани хистограмите на линейните напрежения. И трите линейни напрежения имат нормално разпределение. Математическото очакване на линейните напрежения през нощта е 411,8V за L12, 410,2V за L23 и 412,5V за L13 и през деня е 401,5V за L12, 399,8V за L23 и 401,7V за L13.



Фиг.3. Хистограми на фазните напрежения

Таблица 2

Величина	Фаза	Стойност		
		Минимална	Средна	Максимална
Линейно напрежение, V	L12	393,3	404,6	415,5
	L23	391,4	402,9	414,0
	L13	393,1	404,9	416,4



Фиг.4. Хистограми на линейните напрежения

И на фазните, и на линейните напрежения, през нощта хистограмите са изместени надясно и са с по-малко средноквадратично отклонение, т.е. с по-малко разсейване. През деня (в работно време) разсейването е по-голямо, но хистограмите са по-добре разпределени и центрирани около средната стойност.

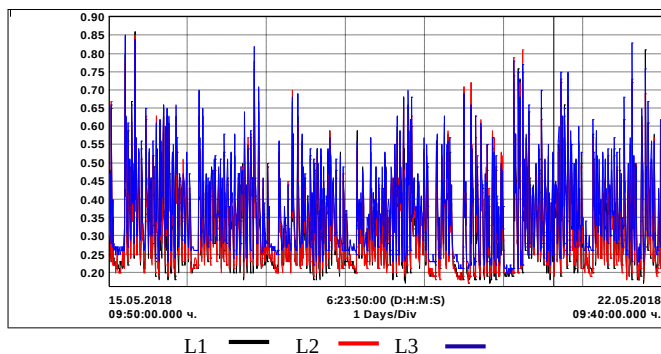
Краткотрайни спадания и пренапрежения на захранващото напрежение не се наблюдават.

1.3. Фликер

Бързите изменения на напрежението се оценяват по стойността на фликера и неговата строгост за дълъг интервал от време. В табл.3 са дадени минималната, средната и максималната стойност на фликера за трите фази, а на фиг.5 е показано неговото изменение за периода на измерване.

Съгласно БДС EN 50160 при нормални условия на работа бързите изменения на напрежението трябва да са не по-големи от $5\%U_N$ или изменения до $10\%U_N$ с малка продължителност могат да настъпват няколко пъти на ден при някои условия. Фликерът трябва да е по-малък от 1 за 95% от период от една седмица [1,

2, 4]. В случая, 100% от измерените стойности на фликера са под допустимата стойност от 1.



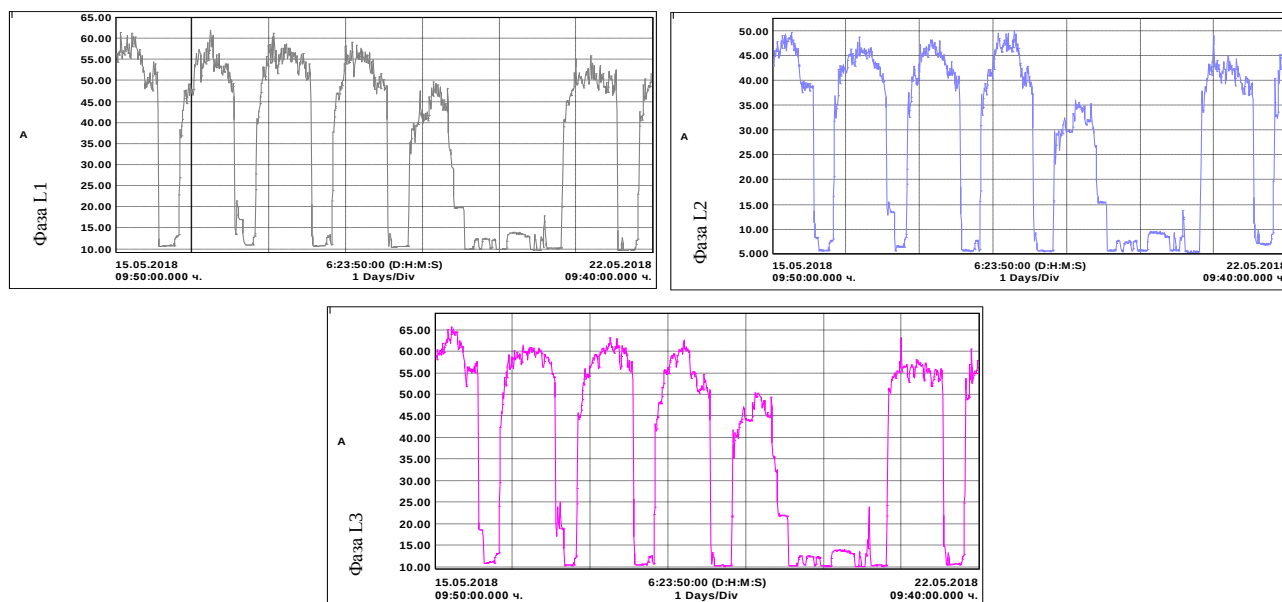
Фиг.5. Фликер

Таблица 3

Величина	Фаза	Стойност		
		Мини-мална	Средна	Макси-мална
Фликер	L1	0,17	0,33	0,86
	L2	0,17	0,33	0,85
	L3	0,19	0,37	0,85

1.4. Токове

На фиг.6 е показано изменението на тока в трите фази и часовете на работа на обекта.



Фиг.6. Изменение на фазните токове

В табл.4 са дадени минималната, максималната и средната стойност на токовете за периода на измерване. Максималното натоварване на фаза L1 е 61,9А, фаза L2 е 65,6А, а на фаза L3 е 50,0А.

Вижда се, че натоварването в трите фази е различно.

Най-натоварена е втора фаза с измерена

максимална стойност на тока от 65,6А. Токът на първа фаза е с 5,64% по-малък от тока на втора фаза. Токът на трета фаза е с 23,8% по-малък от тока на втора фаза. Разликата в стойностите на токовете е значителна, като причина за това

Таблица 4

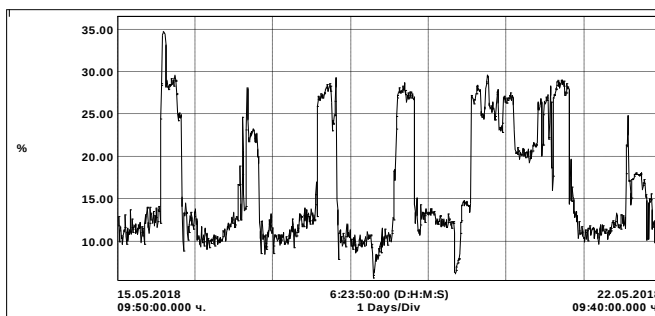
Величина	Фаза	Стойност		
		Мини-мална	Средна	Макси-мална
Ток, А	L1	9,70	34,84	61,9
	L2	10,10	37,81	65,6
	L3	5,40	27,61	50,0

може да бъде разпределението на монофазните товари между фазите. Минималните стойности на тока са измерени през нощта, когато натоварването е по-малко, както и в неделя когато няма производство.

1.5. Несиметрия на напрежението и тока

Максималната измерена стойност на несиметрията на напрежението е 0,50%. Според БДС EN 50160 несиметрията трябва да бъде в граници от 0 до 2% за 95% от период от една седмица. Следователно 100% от измерените стойности на несиметрията на напрежението са под допустимата граница от 2%.

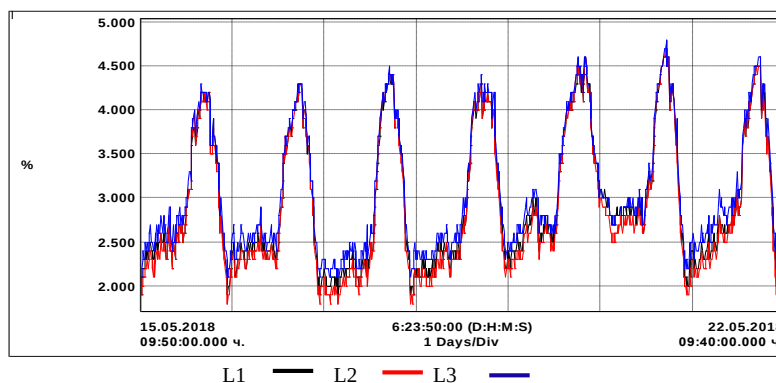
На фиг.7 е показана несиметрията на тока. В по-голямата част от времето несиметрията на тока е в границите от 5,7 до 15%. В отделни моменти през работния ден са регистрирани много високи стойности, но с неголяма продължителност. През нощта несиметрията на тока е силно увеличена и голяма част от стойностите са над 20%, като в определени случаи надхвърлят 30%. Забелязва се, че несиметрията се повишава през времето, когато фирмата не работи.



Фиг.7. Несиметрия на тока

1.6. Хармоници на напрежението и тока

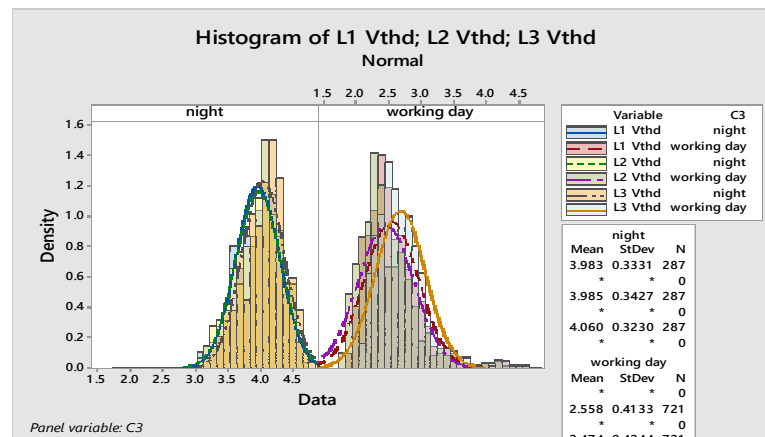
На фиг.8 е показано общото хармонично изкривяване на фазните напрежения. Измерените максимални стойности са съответно 4,7% за фаза L1, 4,8% за фаза L2 и 4,7% за фаза L3. Следователно в 100% от случаите големината на общото хармонично изкривяване на захранващото напрежение не превишава допустимата норма от 8% за мрежи ниско напрежение, дадена в БДС EN 50160 [1, 2, 4].



Фиг.8. Общо хармонично изкривяване на фазните напрежения

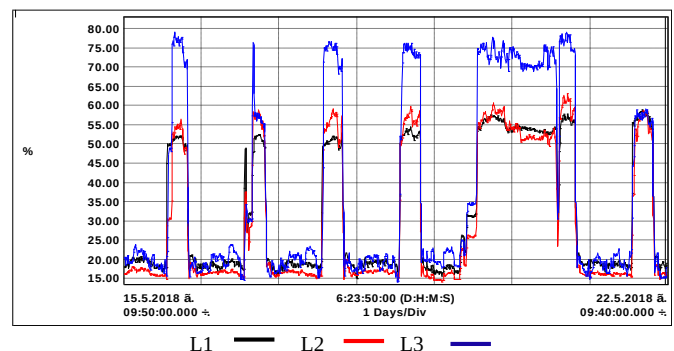
На фиг.9 са дадени хистограмите на общото хармонично изкривяване на фазните напрежения, съответно през деня (работно време) и през нощта (неработно време). И в трите фази се наблюдава увеличение на стойностите на общото хармонично изкривяване на напрежението през нощта. Математическото очакване на общото хармонично изкривяване на фазните напрежения през нощта е 3,983% за L1, 3,985% за L2 и 4,060% за L3 и през деня е 2,558% за L1, 2,474% за L2 и 2,697% за L3. През нощта хистограмите са изместени на дясно, т.е стойностите на хар-

мониците на напрежението са по високи, от тези през деня, чиято хистограма съответно е изместена наляво. Средноквадратичното отклонение е малко и за всички фази измерванията са с малко разсейване.



Фиг.9. Хистограми на общото хармонично изкривяване на фазните напрежения

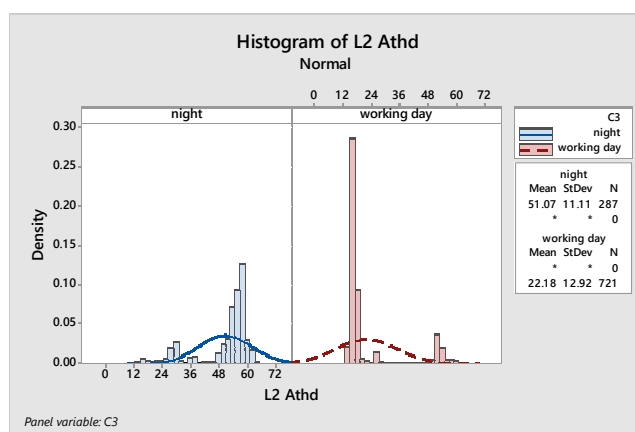
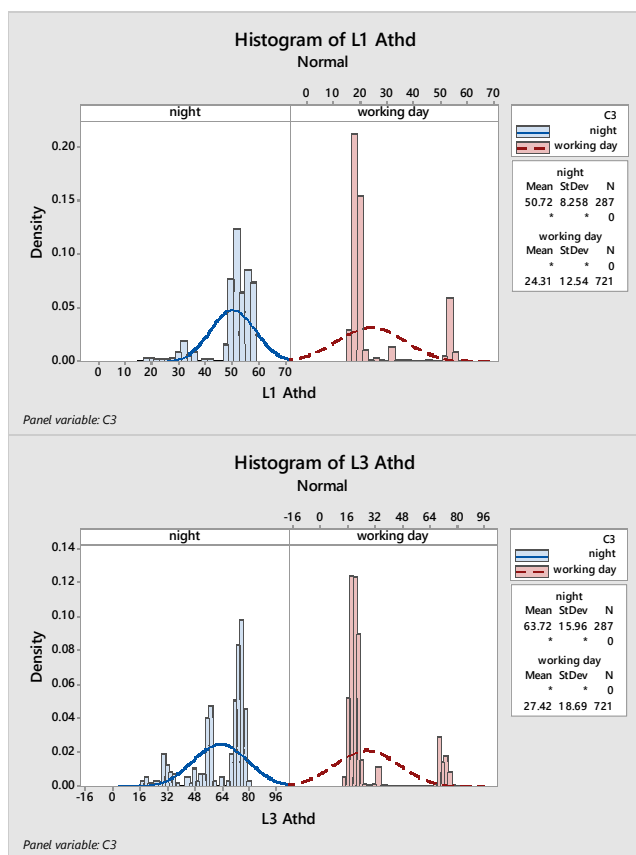
На фиг.10 е показано общото хармонично изкривяване на фазните токове. Максималните измерени стойности са съответно 58,9% за L1, 63,3% за L2 и 79,2% за L3. В повече от 5% за период от една седмица, измерените стойности на общото хармонично изкривяване на тока са по-високи от допустимата стойност от 25%, дадена в БДС IEC 61000-3-4 [5] за мрежи ниско напрежение.



Фиг.10. Общо хармонично изкривяване на фазните токове

На фиг.11 са дадени хистограмите на общото хармонично изкривяване на фазните токове, съответно за работно време и през нощта. И в трите фази се наблюдава увеличение на хармониците нощем и през почивните дни. Хистограмите не са с нормално разпределение – изолирани хистограми, които говорят вероятно за краткотрайни включвания на уреди денем, създаващи хармоници.

В табл.5 са дадени максималните измерени стойности на хармониците на напрежението и нормите им [1, 2, 4]. Наблюдават се нечетни хармоници от 3 до 25 хармоник. Най-голямо е съдържанието на 5 и 7 хармоник, с максимална измерена стойност съответно 4,8% и 1,2%. Всички измерени стойности на хармониците на напрежението са много по-ниски от допустимите норми. Четни хармоници на напрежението не се наблюдават.



Фиг.11. Хистограми на общото хармонично изкривяване на фазните токове

В табл.6 и табл.7 са дадени максималните измерени стойности на хармониците на тока и нормите им [5]. Наблюдават се всички нечетни хармоници до 25 хармоник, като всички те са много по-високи от допустимите стойности. Наблюдават се четни хармоници на тока, като само 8 и 14 хармоник са над допустимата норма.

Таблица 5

	Номер на хармоника											
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Максимална стойност, %	0,6	4,8	1,2	0,2	0,5	0,6	0,2	0,8	0,5	0,1	0,7	0,6
Норма по БДС EN 50160, %	5,0	6,0	5,0	1,5	3,5	3,0	0,3	2,0	1,5	0,2	1,5	1,5

Таблица 6

	Номер на хармоника											
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Максимална стойност, %	29,0	48,8	44,7	15,8	29,2	30,9	5,6	23,1	20,5	3,7	11,4	9,5
Норма по БДС IEC 61000-3-4,%	21,6	20,7	7,2	3,8	3,1	2,0	0,7	1,2	1,1	0,6	0,9	0,8

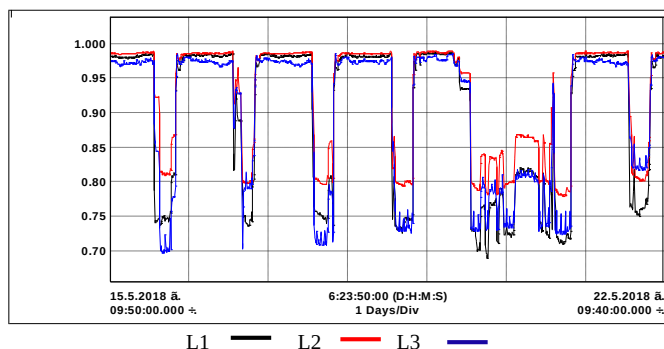
Таблица 7

	Номер на хармоника											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Максимална стойност, %	2,6	1,4	1,1	1,1	1,0	0,7	0,7	0,5	0,4	0,2	0,5	0,3
Норма по БДС IEC 61000-3-4, %	4,0	2,0	1,3	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

1.7. Фактор на мощността, активна, реактивна и пълна мощност

На фиг.12 са дадени измерените стойности на фактора на мощността на отделните фази, а в Таблица 8 минималната, максималната и средната стойност. Вижда се, че при увеличение на хармониците на тока, фактора на мощността намалява и съответно реактивната съставляща на тока се увеличава. Средната стойност на фактора на мощността е между 0,90 и 0,93.

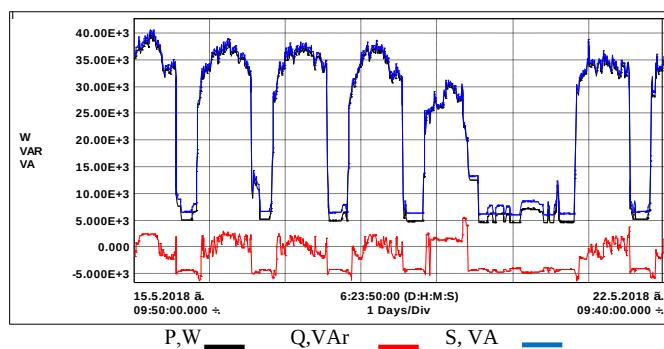
На фиг.13 са дадени сумарните активна, реактивна и пълна мощности.



Фиг.12. Фактор на мощността

Таблица 8

Величина	Фаза	Стойност		
		Минимална	Средна	Максимална
Фактор на мощността	L1	0,690	0,899	0,988
	L2	0,779	0,926	0,989
	L3	0,697	0,900	0,986



Фиг.13. Активна, реактивна и пълна мощност

Таблица 9

Величина	Фаза	Стойност		
		Минимална	Средна	Максимална
P, kW	L1	1,65	7,45	14,18
	L2	1,89	8,50	15,03
	L3	0,95	6,12	11,23
	Sum	4,55	22,4	39,93
Q, kVAr	L1	-2,76	-1,91	1,93
	L2	-2,56	-0,46	2,57
	L3	-1,64	0,70	2,76
	Sum	-6,27	-1,66	5,61
S, kVA	L1	2,26	8,12	14,38
	L2	2,35	8,78	15,24
	L3	1,31	6,39	11,53
	Sum	5,98	23,29	40,73

В табл.9 са дадени максималните стойности на активната, реактивната и пълна мощност за периода на измерване.

Забелязва се връщането на реактивна мощност по време на почивките на компанията, което води до допълнителни загуби, „прекомпенсиране“ и заплащане на допълнителна енергия, но тъй като стойностите им са малки, биха могли да се пренебрегнат.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените измервания и анализ, може да се каже, че качеството на електрическата енергия е добро. Извън нормите са общото хармонично изкривяване на тока и несиметрията на тока през нощта. Увеличението на хармониците през нощта се дължи на работещото луминесцентното осветление. Наличието на хармоници на тока води до преждевременното стареене на изолацията на тоководещите части и от там до съкращаване на експлоатационния срок на съоръженията.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Цанев Ц., С. Цветкова, *Качество на електрическата енергия*, Авангард Прима, София, 2011.
- [2] BDS EN 50160:2011 „*Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks*”.
- [3] BDS IEC 61000-4-30:2015 „*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*”.
- [4] ДКЕВР, „*Показатели за качество на електроснабдяване*”, 2010.
- [5] BDS IEC 61000-3-4:1998 „*Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A*”.

Автори: Светлана Цветкова, доц., д-р, маг. инж., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: stzvet@tu-sofia.bg; Анна Георгиева, маг. инж., докторант, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; E-mail address: georgieva.a@gmail.com

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Николай Матанов

ВЛИЯНИЕ НА ЗАРЯДНИТЕ СТАНЦИИ ЗА АВТОМОБИЛИ ВЪРХУ НЯКОИ ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

Красимир Иванов, Николай Михайлов, Цветан Наумов

Резюме: Този доклад изследва някои параметри на въздействие на станциите за зареждане на електрически автомобили върху енергийната система през време на зареждане на акумулатора. Предоставена е примерна схема на зарядната станция. Проведени са изследвания относно токовите хармонични по време за зареждането и степента на зареждане. Резултатите от изследванията са представени в графичен формат.

Ключови думи: електрически коли, зарядни станции за електро автомобили, електромагнитна съвместимост

ABOUT THE INFLUENCE OF CAR-CHARGING STATIONS TO SOME ELECTRICAL ENERGY PARAMETERS

Krasimir Ivanov, Nikolay Mihaylov, Tzvetan Naumov

Abstract: This report examines parameters for evaluating the impact of electric vehicle charging stations on the utility power system during the times of battery charging. Provided is a sample schematic of a charging station for electric vehicles. Studies were conducted of the current harmonic in relation to the charge time and charge level. The results are presented in a graphical format.

Keywords: Electric vehicles; charging station for electric vehicles; electromagnetic compatibility; current harmonics

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Благосъстоянието на човешкия живот на съвременния етап е свързано с използването на електрическата енергия. Нейното приложение е всеобхватно в индустрията и в човешкия бит. Снабдяването на различните консуматори става с помощта с изградена преносна и разпределителна електрическа мрежа. Използването на електрическата енергия започва и в личния транспорт, т.е. вече се движат серийно произведени електрически коли. Те все още са много скъпи, но в близко бъдеще с увеличаване на обемите на производството и предоставяне на различни допълнителни стимули цената им ще намалява. В тях се използват акумулатори, които периодично трябва да се зареждат. Това става с помощта на зарядни станции. В бъдеще се предвижда при необходимост акумулаторите да се използват като допълнителен източник на електроенергия. Ето защо в групата на зарядните станции се включват - освен токоизправители и инвертори, преобразу-

ватели на честота и регулатори на напрежение. Изброените елементи са източник на изкривявания в синусоидата на напрежението и тока. Хармониците на ток причиняват спадове на напрежения в импедансите на електрическите вериги, които се наслаждат върху синусоидата на захранващото напрежение и деформират синусоидалната му форма. Това води до влошаване качеството на електрическата енергия, подавана към потребителите, което може да доведе до проблеми при експлоатацията им. Най-често се забелязва греење в магнитопровода на електрическите машини, проблеми в кондензаторните батерии, защото с повишаване номера на хармоника, тяхното съпротивление намалява и се увеличава, недопустимо стойността на протичащите токове през тях.

Не на последно място източниците на висши хармоници като вентилните преобразователи е възможно сами да си затруднят нормалната експлоатация, ако се захранват от напрежение с деформирана синусоида, която е резултат от тяхната работа. Влиянието на зарядните станции върху разпределителната електрическа мрежа е изследвано недостатъчно [5, 6, 7, 8].

2. ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ

Известно е, че теорията на електромагнитната съвместимост (ЕМС) се занимава с генерирането, разпространението и приемането на електромагнитна енергия и появата на съпътстващи ефекти при тези процеси. Целта на ЕМС е правилната работа в същата електромагнитна среда на различно по вид оборудване и избягването на всякакъв интерферентен ефект.

Стандартът IEC 61000-3-2 определя гранични стойности за хармонични съставлящи на тока (входен ток на устройства/съоръжения) до 16 А, включително за фаза [2]. **Стандартът IEC 61000-3-4 определя** граничните стойности за хармонични съставлящи на тока в ниско волтови електроразпределителни системи за оборудване с номинален ток по-голям от 16А на фаза [3]. Общите коефициенти на нелинейните (хармоничните) изкривявания THD се изчисляват по формулите:

$$\begin{aligned} THD_I &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} 100, \% \\ THD_U &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} 100, \% \end{aligned} \quad (1)$$

където I_1, I_n са съответно ефективната стойност на първия хармоник на тока и на хармоника с $n \geq 2$; U_1, U_n - съответно ефективната стойност на първия хармоник на напрежението и на хармоника с $n \geq 2$.

Параметрите на хармонични съставлящи на тока, съгласно IEC 61000-3-4, спрямо изследвания обект са дадени в табл.1.

Таблица1.

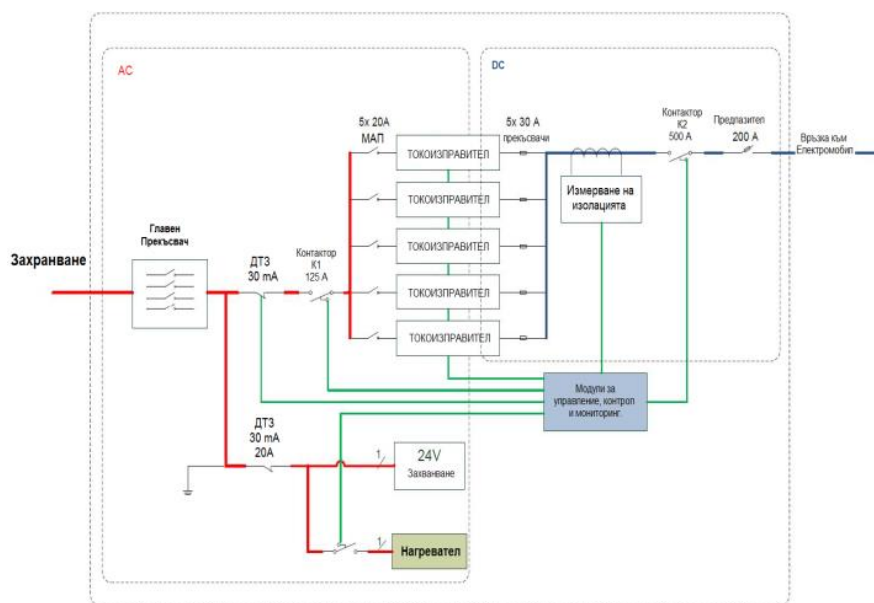
Стойности на допустими нива на хармоничните съставлящи на тока

Хармоничен номер n	Допустима хармонична съставляща на тока* I_n/I_1 , %	Хармоничен номер n	Допустима хармонична съставляща на тока I_n/I_1 , %
3	21,6	21	$\leq 0,9$
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	$\leq 0,6$
11	3,1	29	0,7
13	2	31	0,7
15	0,7	≥ 33	$\leq 0,6$
17	1,2		
19	1,1		
* I_1 - ток на основната хармонична; I_n - ток на n-я хармоник			

3. СХЕМА, ПАРАМЕТРИ И ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ НА ЗАРЯДНАТА СТАНЦИЯ ЗА ЕЛЕКТРОАВТОМОБИЛИ

Изследването е проведено на зарядна станция за електрически автомобили от 3^{то} поколение, тип Terra 53 CJG. Тя може да зарежда няколко автомобила едновременно [1]. Характерно за зарядните станции от 3^{то} поколение е двупосочността на енергийния поток - от електрическата мрежа към акумулаторната батерия и от акумулаторната батерия към енергийната мрежа. Тази техническа възможност позволява на зарядната станция да стане клетка на системата "интелигентна електрическа мрежа". При тази система може да се управлява оптимално производството, преноса и потреблението на електроенергия. Така например акумулаторните батерии на електроавтомобилите се явяват товар за енергийната система през нощта, когато има „излишък“ от електроенергия, като по този начин допринасят за подобряване на енергийната ефективност на системата. Освен това за зареждане на батериите се ползва по-евтината нощна енергия. Схемата съдържа 2 преходника на постоянно напрежение с мощност на зареждане 50 kW и един крайник с променливо напрежение с мощност на зареждане до 43 kW. Тя е предназначена за зареждане на всички видове литиево-йонни батерии и се инсталира в молове, представителства на автомобили, бензиностанции и натоварени градски терени.

Захранването на станцията за зареждане на електро автомобили е трифазно 400V, променливо напрежение, което се свързва към главния прекъсвач на зарядната станция (фиг.1). За захранване на модулите, които служат за управление, контрол и следене на зареждането е необходимо 24V, постоянно напрежение. Използваните зареждани батерии са литиево-йонни с енергийно съдържание от 24 kWh, предлага се и 2-ра разновидност с енергийно съдържание от 30 kWh.



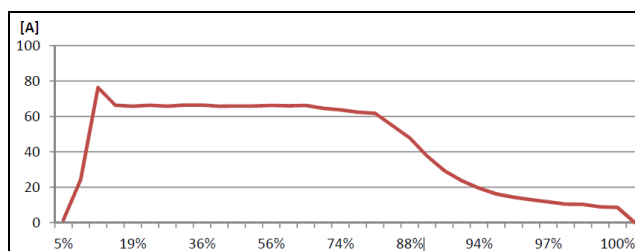
Фиг.1. Блокова схема на изследваната зарядна станция

След преминаването на тестовите от модулите се подават сигнал към намотката на контактора K1. Той затваря нормално отворените си контакти и подава напрежение към токоизправителите, които са свързани с мощностния модул, следящ за тяхното правилно функциониране и работната им температура. След изправянето на напрежението се измерват параметрите на изолацията, непосредствено преди контактора K2. Ако теста бъде преминат успешно, отново се подава напрежение към намотката на контактора K2, той затваря своите нормално отворени контакти, и зареждането на автомобила започва.

Изследванията са проведени на зарядна станция, монтирана в гр. Раковски.

4. РЕЗУЛТАТИ

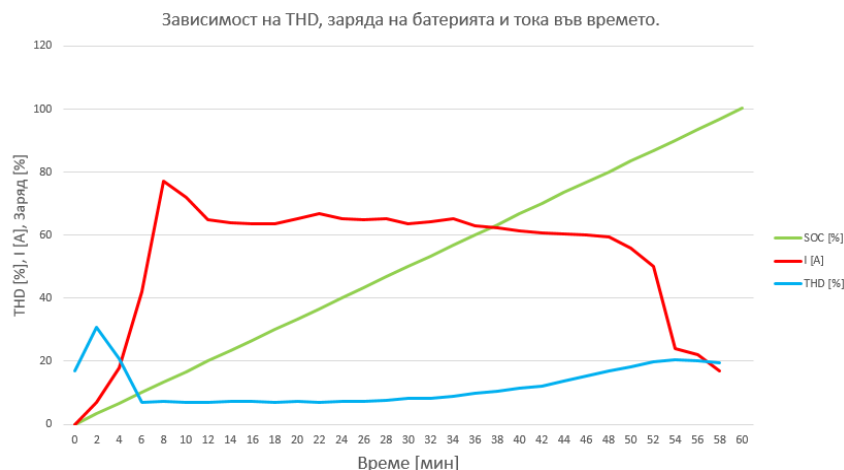
За измерването на електротехническите величини е използван мрежов анализатор ABB M2M Low Voltage. Процесът на зареждане на батериите не е стационарен. На фиг.2 са показани стойностите на тока в зависимост от степента на заряд на батерията. Токът на зареждане нараства в началото, достига своя максимум при степен на зареждане около 15%, след това намалява и се установява до пониска стойност. След като батерията се зареди до около 80% се наблюдава постепенно спадане в тока на зареждане, до пълното насищане на батерията.



Фиг.2. Зависимост между тока и степента на зареждане

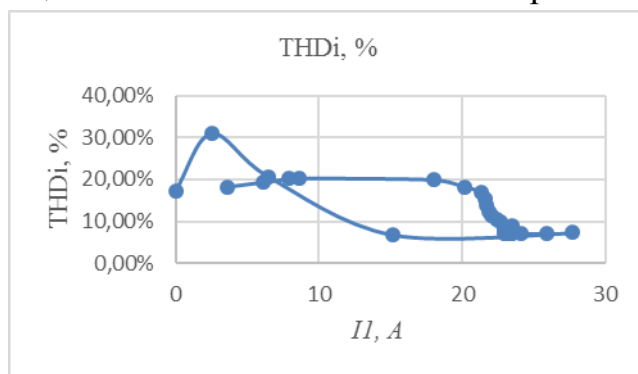
От отчетените стойности се вижда, че при стартиране на зареждането на батерията, токът достига пикова стойност в първите 20% от заряда, докато висшите

хармоници имат колеблив характер и достигат своя максимум в първите 10% от заряда на батерията (фиг.3). В интервала (20-80) %, стойностите на висшите хармоници и тока поддържат стойностите си в процеса на зареждане на батерията. След достигането на 80% от заряда на батерията се наблюдава значителен спад в големината на тока. Пълното зареждане отнема 60 минути, а времето за зареждане на последните 20% от заряда е около 20 минути. Намаляването на тока обаче води до нарастване на висшите хармоници, при последните 20% от заряда на батерията.

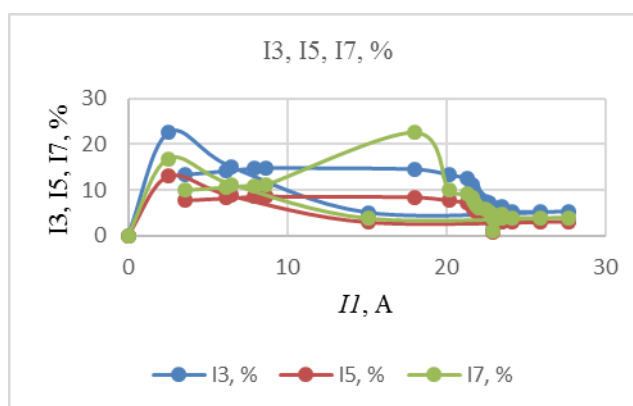


Фиг.3. Времедиаграма на коефициента на хармонично изкривяване по ток, тока на зареждане и степента на заряд.

На фиг.3. е показана зависимостта на коефициента хармонични изкривявания на тока (THD-Total harmonic distortion), тока и степента на заряд на батерията (SOC – State of Charge) във функция от времето. Фиг.4 илюстрира изменение на коефициента на хармонично изкривяване по ток в зависимост от тока на първата хармонична по време на заряд на електроавтомобила, а на фиг.5 са представени графиките на изменение на 3-я, 5-я и 7-я хармоник по ток, в %, в зависимост от тока на първата хармонична по време на заряд на електроавтомобила. Получените резултати показват, че при стартиране на зареждането, в първите минути общото отклонение на висшите хармоници достига своя пик, след като токът се увеличава, отклонението на висшите хармоници намалява и се запазва постоянно до настъпване на процеса на допълване на батерията, който започва след около 80% заряд на батерията. След това, се наблюдава спад на тока, което води до увеличаване на общото отклонение на висшите хармоници.



Фиг.4. Изменение на коефициента на хармонично изкривяване по ток в зависимост от тока на зареждане



Фиг.5. Изменение на 3^{-я}, 5^{-я} и 7^{-я} токов хармоник спрямо първата хармонична на тока на зареждане

Седмата токова хармонична в процеса на зареждане се увеличава и достига гранични стойности. Вижда се още, че в началото на процеса на заряд третата хармонична е над допустимата стойност и коефициента на хармонично изкривяване също е над допустимата норма.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от проведените изследвания могат да се използват за по-прецизно до настройване на филтрите на зарядната станция и попълване на данните за генерираните хармонични в различни електротехнически програми за пресмятане на тези режими на работа и разпространение им в електрическата мрежа ниско напрежение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ABB B.V. (2010), *Multi-standart DC fast charging station Terra 53 CJG*, 2010.
- [2] EN 61000-3-2:2014, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions* (equipment input current ≤ 16 A per phase)
- [3] IEC 61000-3-4: 1998, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A*, 1998
- [4] EN 50160 (2000), *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*, 2000
- [5] H. Farooq, K. Qian, M. E. Farrag (2011), *Power Quality Analysis of Distribution Systems Incorporating High Penetration Level Of EV Battery Chargers*, CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution Frankfurt, 6-9 June 2011, paper 0167, pp.1-4
- [6] T. A. Buchh and A. Domijan Jr. (2001), *Harmonic effect of electric vehicle loads*, Int. Journal of Power and Energy Systems, Vol. 21, No. 2, 2001, pp. 62-66.
- [7] K. Qian, C. Zhou, M. Allan, Y. Yuan (2011), *Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 26, Issue 2, May 2011, pp.802-810

[8] M. Basu, K. Gaughan, E. Coyle (2004), *Harmonic Distortion Caused by EV Battery Chargers in the Distribution Systems Network and its Remedy*, Proceedings Universities Power Engineering Conference, UPEC, 2004, vol. 2, pp.869-873

Автори: **Красимир Иванов**, доц. д-р, катедра Основи на електротехниката и електроенергетиката, Технически Университет-Габрово; **Николай Михайлов**, проф. д-р, катедра ЕСЕО, Русенски Университет “Ангел Кънчев”; **Цветан Наумов**, инж. към ЧЕЗ Разпределение България, E-mail address: krmri@tugab.bg

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: гл. ас. д-р Борислав Бойчев

ФЕММ АНАЛИЗ НА КАНАЛНОТО РАЗСЕЙВАНЕ ПРИ ПРОМЕНЛИВОТОКОВИ МАШИНИ С НАСИТЕНИ ЗЪБНИ ЗОНИ-I част

Михо Михов, Ганчо Божилов

Резюме: В работата са определени относителните магнитни проводимости на каналното разсейване на променливотокова машина. За целта са използвани данни от решението на магнитното поле в средата на FEMM. Предложени са два подхода за решаване на задачата. Резултатите са сравнени с класическия подход, при който не се отчита насищането. Получените резултати показват значително намаляване на каналните индуктивности във функция от магнитната индукция в зъбите и от относителната магнитна проницаемост на използваната електротехническа стомана.

Ключови думи: канално разсейване, относителна магнитна проводимост, магнитна проницаемост, FEMM анализ

FEMM ANALYSIS OF THE SLOT LEAKAGE ON AC ELECTRIC MACHINES WITH SATURATED TEETH ZONES - Part one

Miho Mihov, Gantcho Bojilov

Abstract: In this paper a relative magnetic conductivity of the slot leakage of the AC machines are estimated. For this purpose a data of the resolve of the magnetic field in the area of FEMM are use. Two approaches for resolving the problem are proposed. The results are compared with classical approach where the saturation is not report. The got results present a considerable decrease of the slot inductances in function of the magnetic induction in the teeth zone and relative magnetic permeability of the use electrical steel.

Keywords: slot leakage, relative magnetic conductivity, magnetic permeability, FEMM analysis

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Влиянието на магнитните полета на каналното разсейване при променливотоковите машини количествено се изразява с параметъра индуктивно съпротивление на каналното разсейване $X_k = \omega L_k$, което е една от съставките на пълното съпротивление на разсейване на намотката X_σ [1].

Известният класически подход, съгласно [1] и други източници за определяне на индуктивността L_k от потоците на каналното разсейване на правоъгълен отворен канал с еднослойна намотка е построен върху допускането за линейност, а

именно че магнитната проницаемост на магнитопровода е безкрайно голяма $/\mu_{Fe} = \infty/$, т.е. няма насищане, независимо от стойността на тока в канала.

От горното произтичат следните удобни за технологията на аналитичното решение следствия:

1. Създаденото от тока в проводниковия слой м.д.н. изцяло се „изразходва“ за прокарване на магнитния поток на разсейване през немагнитната област на канала, тъй като магнитното съпротивление на зъбите е „нула“ -

$$R_{\mu Fe} \equiv \frac{1}{\mu_{Fe}} \rightarrow 0 \quad ;$$

2. Магнитната индукция в канала се определя с помощта на закона за пълния ток в линейна немагнитна („въздушна“) среда, както следва:

- Магнитните силови линии на индукцията на полето пресичат канала праволинейно и перпендикулярно на стените и оста му [2].

- Магнитната индукция на полето на каналното разсейване се променя (нараства) линейно в границите на проводниковия слой по закона

$$B_{kn \text{ слой}} = \frac{\mu_0}{b_k} \frac{x}{h_{\text{слой}}} w_C i_C \quad (1)$$

- Магнитната индукция на полето на каналното разсейване в границите на шлица е неизменна.

$$B_{kn \text{ шлиц}} = \frac{\mu_0}{b_k} w_C i_C = const. \quad (2)$$

Целта е да се определи пълното канално потокосцепление с проводниците от слоя (секционната страна).

$$\Psi_k = \Psi_{\text{слой}} + \Psi_{\text{шлиц}} \quad (3)$$

При горните допускания (1) и (2) съставките му за каналната и шлицовата част са:

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{слой}} &= \int_{x=0}^{x=h_{\text{слой}}} \frac{x}{h_{\text{слой}}} w_C B_{kn \text{ слой}}(x) l_\delta dx = \mu_0 w_C^2 l_\delta i_C \frac{h_{\text{слой}}}{3b_k} = k_\Psi i_C \lambda_{\text{слой}} \\ \Psi_{\text{шлиц}} &= \int_{x=h_{\text{слой}}}^{x=h_{\text{слой}}+h_{\text{шлиц}}} w_C B_{kn \text{ шлиц}}(x) l_\delta dx = \mu_0 w_C^2 l_\delta i_C \frac{h_{\text{шлиц}}}{b_k} = k_\Psi i_C \lambda_{\text{шлиц}} \end{aligned} \quad (4)$$

където

$$k_\Psi = \mu_0 w_C^2 l_\delta \quad (5)$$

В горните зависимости освен известната магнитна проницаемост на въздуха μ_0 участват още:

w_C - броят на навивките в секционната страна или броят на ефективните проводници;

i_C - токът в ефективен проводник;

l_δ - изчислителната дължина на машината;

$h_{\text{слой}}$ - височината на проводниковия слой;

$h_{\text{шлиц}}$ - височината на пространството над проводниковия слой до върха на зъба;

b_k - ширината на канала, която при разглежданата му форма е $b_k = b_{\text{шлиц}}$.

Величините $\lambda_{\text{слой}}$, $\lambda_{\text{шлиц}}$ са относителните магнитни проводимости на каналното разсейване в областите на проводниковия слой и на каналния шлиц и са съставки на относителната магнитна проводимост на общото канално разсейване λ_k . Така в съответствие с (3) и (4) ще имаме

$$\begin{aligned}\lambda_k &= \lambda_{\text{слой}} + \lambda_{\text{шлиц}} \\ \lambda_{\text{слой}} &= \frac{1}{b_k} \frac{h_{\text{слой}}}{3} \\ \lambda_{\text{шлиц}} &= \frac{h_{\text{шлиц}}}{b_k}\end{aligned}\quad (6)$$

Определянето на пълното канално потокосцепление е необходимо, за да се определи индуктивността на секционната страна от потока на каналното разсейване [1,2]:

$$\begin{aligned}L_{\text{слой}} &= \frac{\Psi_{\text{слой}}}{i_C} = k_{\Psi} \lambda_{\text{слой}} \\ L_{\text{шлиц}} &= \frac{\Psi_{\text{шлиц}}}{i_C} = k_{\Psi} \lambda_{\text{шлиц}} \\ L_k &= \frac{\Psi_k}{i_C} = k_{\Psi} \lambda_k = k_{\Psi} \lambda_{\text{слой}} + k_{\Psi} \lambda_{\text{шлиц}}\end{aligned}\quad (7)$$

По-нататък тази величина се използва за определяне на индуктивното съпротивление X_k на каналното разсейване на цялата намотка.

Вижда се, че в (6) всички величини отдясно са константи – геометрични размери $/h_{\text{слой}}, h_{\text{шлиц}}, b_k/$ и параметри на машината $/w_c, l_{\delta}/$. Следователно $L_k = \text{const.}$ независимо от натоварването. Това се дължи на направеното предварително допускане $/\mu_{Fe} = \infty/$. Подобни допускания се използват и от други автори, където обект на изследванията е правоъгълен канал е двуслойна намотка [3] или такава намотка при по-сложна форма на канала [4].

Очевидно това не съответства на действителната физическа картина на явленията и за това в проектантската практика е приет друг подход за отразяване влиянието на насищането на коронките на зъбите [5]. Това става чрез намаление на коефициента на проводимостта за отворени и полуотворени канали с $\square \lambda_{k_{\text{нас}}} = f(I, b_{\text{шлиц}}, h_{\text{шлиц}}, t_k)$, което съответства на „допълнително отваряне на канала” [5]. Стойността на корекцията се определя на базата на убедителна умозрителна представа за потоците на разсейване, но не на основание на решението на уравнението на магнитното поле в зоната на канала.

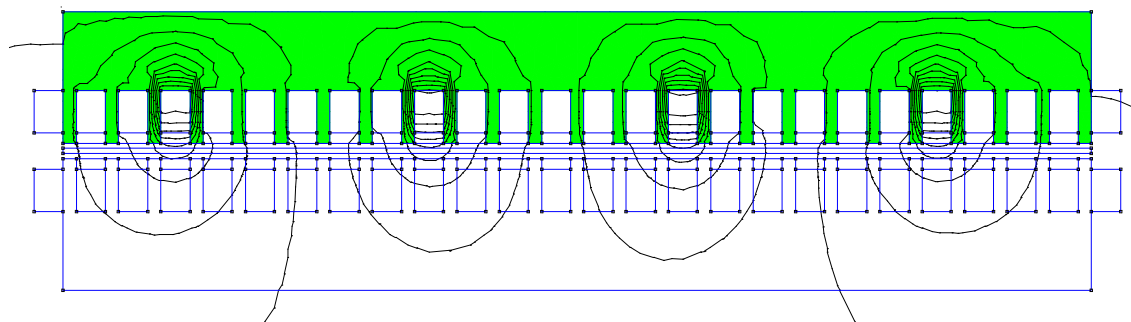
В настоящата разработка е предложен подход за определяне на стойностите на $\lambda_{\text{слой}}, \lambda_{\text{шлиц}}, \lambda_k$ чрез решаване на задачата за магнитното поле в средата на FEMM

[8] в зоната на каналите и феромагнитния магнитопровод на електрическата машина в зависимост от тока в секционната страна

2. ПОДХОДИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОТНОСИТЕЛНИТЕ МАГНИТНИ ПРОВОДИМОСТИ НА КАНАЛНОТО РАЗСЕЙВАНЕ В СРЕДАТА НА FEMM

Принципната основа за решението на поставената задача е поставена в наши разработки, в които чрез подходяща интерпретация на резултатите от решението на магнитното поле във FEMM и зависимости от типа на (4) и (6) са определени относителните магнитни проводимости за роторен [6] и статорен [7] канали. Разработките са за въртящи се електрически машини – асинхронни, със зъби с успоредни стени. Освен това въпросът за влиянието на насищането на зъбната зона не е третиран.

В настоящата разработка, с оглед да се постигне коректност при сравняване на резултатите от аналитичното изчисление (6) и тези, получени в средата на FEMM, е използван модел на горен магнитопровод на трифазен линейен асинхронен двигател с правоъгълни отворени канали и зъби /както е в [1]/ и $2p = 4$ – фиг.1.



Фиг.1.

„Захранен” е само един канал от всяка полюсно фазна група от горния магнитопровод за една фаза. Магнитната характеристика $B = f(H)$ на горния магнитопровод е нелинейна, а тази на долния – идентична с тази на въздуха.

Таблица 1

Величина	Озн.	Стойност	Изм.ед.
Дължина на индуктора	L	390.0	mm
Ширина на индуктора	B	80.0	mm
Дебелина на горната/долната част на индуктора	H	50.0	mm
Височина на ярема на индуктора	h_a	30.0	mm
Височина на проводниковия слой в канала	$h_{\text{слой}}$	16.0	mm
Канално деление в индуктора	t_K	16.0	mm
Ширина на зъба	b_z	5.0	mm
Ширина на канала	$b_K = b_{\text{шлиц}}$	11.0	mm
*Височина на шлица /получава се от горните/	$h_{\text{шлиц}}$	4.0	mm

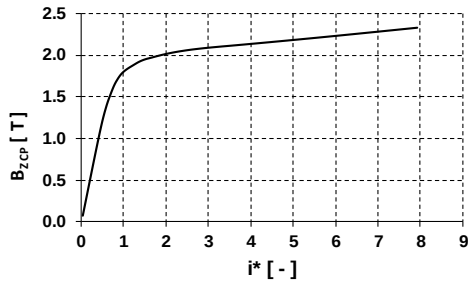
Броят на навивките в секционната страна е $w_c = 172$.

Въведен е безразмерен показател за изменение на тока в секционната страна:

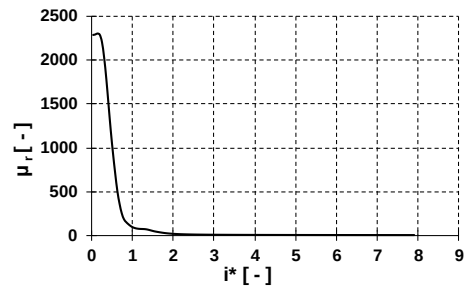
$$i^* = \frac{i_C}{i_{C1.8T}} \quad (8)$$

В горната зависимост $i_{C1.8T}$ е токът, при който индукцията в средата на зъбите, съседни на канала с ток, е $B_{zCP} = 1.8T$, $\mu_r \approx 86$ - фиг. 2. Изследванията за изменението на изследваните величини $\lambda_{слой}$, $\lambda_{шлиц}$, λ_k са проведени за $0 < i^* \leq 8$.

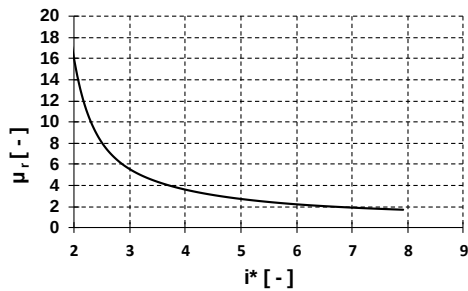
Фиг.3.1 и фиг.3.2 показват изменението на относителната магнитна проницаемост на зъбната зона в разглеждания интервал, като фиг.3.2 допълнително показва това изменение при големи стойности на тока.



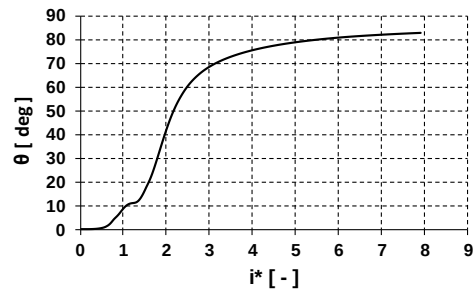
Фиг.2.



Фиг.3.1.

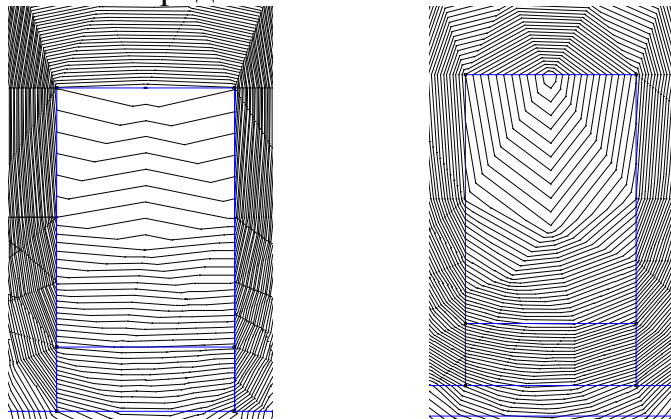


Фиг.3.2.



Фиг.4.

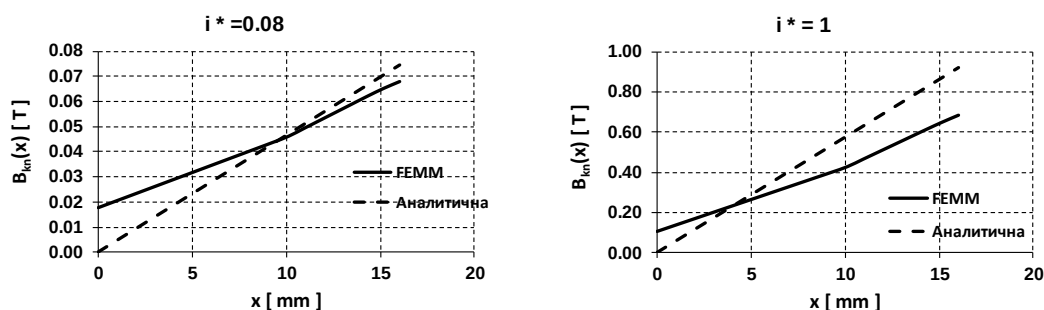
На фиг.4 е показан ъгълът на отклонението от нормалата към стената на канала на вектора на магнитната индукция, определен съгласно [2] по закона за пречупване при преминаването на магнитното поле през границата между две различни среди. Вижда се, че от определена стойност на тока този ъгъл нараства и условието перпендикулярност към стените на канала, заложено в аналитичния подход $\mu_{Fe} = \infty$, се нарушава. Казаното се илюстрира на фиг.5, където изображението в ляво показва картината на полето при малки стойности на тока /п.х./ а това в дясно – при тези от порядъка на к.с.



Фиг.5.

2.1. ПОДХОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОТНОСИТЕЛНИТЕ МАГНИТНИ ПРОВОДИМОСТИ НА КАНАЛНОТО РАЗСЕЙВАНЕ В СРЕДАТА НА FEMM ЧРЕЗ ЧИСЛЕНО ИНТЕГРИРАНЕ

В този случай се използва възможността, предоставена в пост процесора на FEMM за определяне на нормалната съставляваща на магнитната индукция по даден контур – в случая осевата линия на канала в границите на проводниковия слой - $B_{kn}(x)$, както е по [1]. Примерно разпределение на индукцията при две стойности на тока в посочения по-горе интервал е показано на фиг.6. С получените за поредица стойности на тока ($0 < i^* < 8$) в секционната страна еднотипни масиви от данни $B_{kn}(x)$ се решават числено интегралите по зависимостта (4), т.е. определят се потокосцепленията в рамките на проводниковия слой $\Psi_{\text{слой}}$ и на шлица $\Psi_{\text{шлиц}}$.



Фиг.6.

По (7) се определят съответните индуктивности от потоците на каналното разсейване $L_{\text{слой}}, L_{\text{шлиц}}, L_k$, а с помощта на (5) - магнитните проводимости $\lambda_{\text{слой}}, \lambda_{\text{шлиц}}, \lambda_k$

$$\lambda_i = \frac{L_i}{k_{\Psi}} \quad (9)$$

Резултатите са показани на фиг.7, фиг.8, фиг.9*.

*Забележки:

1. Целесъобразно е резултатите от изчисленията по този и другия /следващ/ подход да са представени в общи графични изображения.

2. С оглед отчитането на определящото влияние на магнитното състояние на феромагнитната среда върху разглежданите величини е целесъобразно аргументът във функционалните зависимости да е стойността на относителната магнитна проницаемост μ_r . Това става посредством определената в средата на FEMM зависимост $\mu_r = f_1(i_c) = f_2(i^*)$.

3. Означенията по графиките са :

- **Клас.** – величините са определени по класическите аналитични зависимости – ур. (6);

- **Клас. & FEMM** - величините са определени с данните за магнитната индукция от решението на полето в средата на FEMM с числено интегриране за определяне на потокосцепленията – т. 2.1;

- **Магн. ен. & FEMM** - величините са определени с данните за магнитната енергия от решението на полето в средата на FEMM – т. 2.2.

2.2. ПОДХОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОТНОСИТЕЛНИТЕ МАГНИТНИ ПРОВОДИМОСТИ НА КАНАЛНОТО РАЗСЕЙВАНЕ В СРЕДАТА НА FEMM ЧРЕЗ МАГНИТНАТА ЕНЕРГИЯ

Съгласно основни положения в класическата електротехника [2] магнитната енергия, запасена в проводник е :

$$W_M = \frac{L i^2}{2} \quad (10)$$

Определянето на тази величина е уредено в пост процесора на FEMM с функцията **Magnetic field energy** като двоен интеграл върху напречното сечение на обекта, чиято магнитна енергия се определя. Впрочем, практически същите резултати се получават и при използване на функцията **Magnetic field coenergy** по причина на линейността на средата $\mu_{\text{слой}} = \mu_{\text{шлиц}} = \mu_0$.

Технологично резултатите за стойностите на магнитната енергия се получават на същия етап на решението, когато се определят индукциите $B_{kn}(x)$ в предходната т. 2.1. Това позволява коректно получаване на данни за един и същ обект при еднакви обстоятелства и създава възможност за обективното съпоставяне на резултатите.

От уравнение (10) следва:

$$L_j = \frac{2W_{Mj}}{i_c^2} \quad (11)$$

Индексът "j" посочва обекта – проводников слой, шлиц или канал, чиято магнитна енергия се определя за да се получат съответните индуктивности $L_{\text{слой}}, L_{\text{шлиц}}, L_k$.

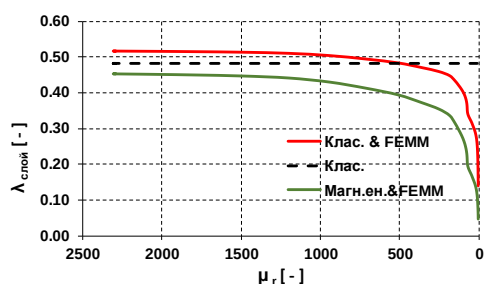
По-нататък с помощта на (9) се определят магнитните проводимости $\lambda_{\text{слой}}, \lambda_{\text{шлиц}}, \lambda_k$.

Резултатите от изчисленията са показани на фиг.7 - $\lambda_{\text{слой}} = f(\mu_r)$, фиг. 8 - $\lambda_{\text{шлиц}} = f(\mu_r)$ и фиг. 9 - $\lambda_k = f(\mu_r)$.

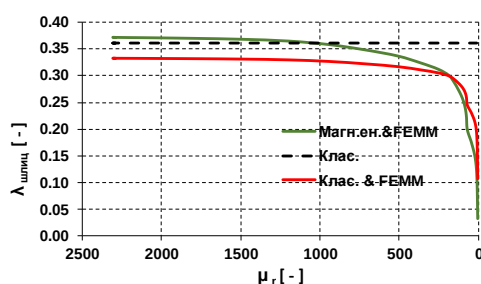
3. ГРАФИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Нетрадиционния характер на представяне на изменението на аргумента по оста на графиките на фиг.7, фиг.8 и фиг.9 от по-големи към по-малки стойности е избран да съответства на посоката му на изменение при увеличаване на магнитната индукция - виж фиг.2 и фиг.3.

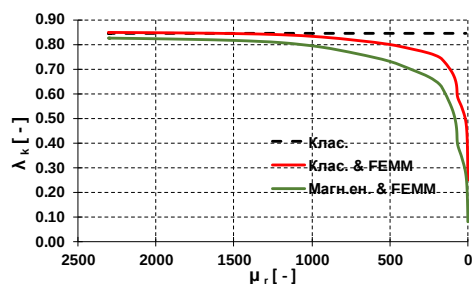
Фиг.10 показва едно по-обичайно представяне на изменението на изследваните нелинейни величини - в зависимост от стойността на тока, създаващ полето.



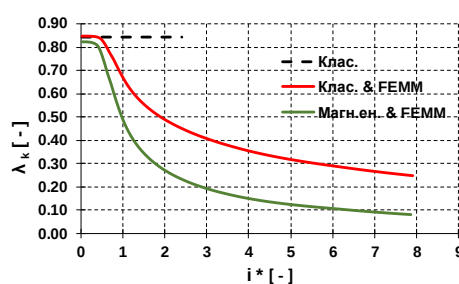
Фиг.7.



Фиг.8.



Фиг.9.



Фиг.10.

4. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

1. В интервала $\mu_r > 1500$ /ниски магнитни натоварвания/ резултатите от аналитичния и полевия подход за определяне на $\lambda_{\text{слой}}, \lambda_{\text{шлиц}}, \lambda_k$ са очаквано близки по стойност.

2. Резултатите за разпределението на магнитната индукция по оста на канала потвърждават приетото в аналитичния подход допускане, че тя се изменя линейно по височината му (фиг.6) поради линейността на средата на канала $\mu_{\text{слой}} = \mu_{\text{шлиц}} = \mu_0$. Не така стои въпросът с допускането за формата на магнитните силови линии, че те са успоредни прави, перпендикулярни на стените на канала линии. То има отношение към приетия начин за определяне на потокосцепления чрез интегриране (аналитично или числено) само по оста на канала. Очевидно при нарушаване на това допускане за определянето на потокосцепления трябва да се направи интегриране и по ширината на канала, което ще се разгледа в друга наша разработка.

3. По горната причина може да се предположи, че резултатите при подхода за определяне на магнитните проводимости с помощта на магнитната енергия (т. 2.2) са по-коректни, тъй-като последната се определя чрез интегриране върху цялата напречна площ на изследвания обект.

4. Както вече се посочи и при големи магнитни натоварвания, предизвикани от големи токове, разпределението на индукцията на полето по оста на канала запазва линейния си характер, но наклонът на линията е много по-малък от този на теоретичната поради факта, че в магнитната верига се включва магнитното съпротивление $R_{\mu Fe} = \frac{1}{\mu_{Fe}} \gg 0$ - нарушава се т.1.

5. Друга особеност на разпределението на магнитната индукция в канала, получена от решението в средата на FEMM е, че стойностите ѝ не започват от нулева стойност в дъното на канала - фиг.6. Въпреки това, при ниски индукции

в зъбите (в линейната част на магнитната характеристика), получените стойности за $\lambda_{\text{слой}}$ чрез аналитичното и численото интегриране са доста близки, тъй като двете характеристики с пресичат около средата на височината на канала и заградените от тях площи, съответстващи на магнитния поток пресичащ слоя, са съизмерими.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати за относителните магнитни проводимости на каналното разсейване $\lambda_{\text{слой}}, \lambda_{\text{щели}}, \lambda_k$, определени с данни от решението за магнитното поле в канала в средата на FEMM, кореспондират със стойностите, получени по аналитичен път, но отразяват и влиянието на степента на насищане на зъбната зона.

Такива изследвания могат да бъдат направени и за реални въртящи се машини с произволна форма на канала. Изведените числени зависимости са от безразмерния параметър μ_r , което способства за универсалната им приложимост към различни видове електротехнически стомани при зададени геометрични размери на активната част на машината.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волдек А., Електрически машини, ДИ "Техника", 1971, стр.437 – 444.
- [2] Бессонов Л., Теоретические основы электротехники, Высшая школа, Москва, 1973, стр. 91-92 и др.
- [3] Staszak Jan, Determination of slot leakage inductance for three-phase induction motors using an analytical method; Archives of electrical engineering, Vol. 62(4), pp. 569-591 (2013).
- [4] Xusheng Wu, Wei Gao, Research on Stator Winding Leakage Reactance Calculation of Doublewinding AC-DC Generator, © 2012 Trans. Tech. Publications, Switzerland, 2011.
- [5] Копилов И. и колектив, Проектиране на електрически машини, ДИ "Техника", 1988, стр.225-235.
- [6] Rizov P., Mihov M., Sotirov D., Stiptzov V., Kushleva J., Femm's Application for Determination of Slot Magnetic Conduction of a Rotor Slot of Induction Machine, 6th International Conference on Applied Electromagnetics, Nish, Serbia and Montenegro, 1 - 3 June 2003, PES 2003.
- [7] Mihov M., Brandisky K., Rizov P., Determination of The Stator Slot Magnetic Conductance of Induction Machine, 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau 22 - 25 September 2003.
- [8] Meeker, D. Finite Element Method Magnetics, Ver. 3.3, User's Manual, May, 2003.

Автори: **Михо П. Михов**, доц. д-р, катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: mmihov_old@abv.bg; **Ганчо Й. Божилов**, проф. д.т.н., катедра „Електрически машини“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: gjboj@tu-sofia.bg.

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Радослав Спасов

ФЕММ АНАЛИЗ НА КАНАЛНОТО РАЗСЕЙВАНЕ ПРИ ПРОМЕНЛИВОТОКОВИ МАШИНИ С НАСИТЕНИ ЗЪБНИ ЗОНИ-II част

Михо Михов, Ганчо Божилов

Резюме: В работата са определени относителните магнитни проводимости на каналното разсейване на еднофазен колекторен двигател. За целта са използвани данни от решението на магнитното поле в средата на FEMM. Резултатите са сравнени с класическия подход, при който не се отчита насищането. Получените резултати показват значително намаляване на каналните индуктивности във функция от тока в каналите и от относителната магнитна проницаемост на електротехническата стомана.

Ключови думи: канално разсейване, относителна магнитна проводимост, магнитна проницаемост, FEMM анализ

FEMM ANALYSIS OF THE SLOT LEAKAGE ON AC ELECTRIC MACHINES WITH SATURATED TEETH ZONES - Part two

Miho Mihov, Gantcho Bojilov

Abstract: In this paper a relative magnetic conductivity of the slot leakage of the single phase commutator motor are estimated. For this purpose a data of the resolve of the magnetic field in the area of FEMM are use. The results are compared with classical approach where the saturation is not report. The got results present a considerable decrease of the slot inductances in function of the magnetic induction in the teeth zone and relative magnetic permeability of the use electrical steel.

Keywords: slot leakage, relative magnetic conductivity, magnetic permeability, FEMM analysis

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Известният класически подход за определяне на индуктивността L_k и индуктивното съпротивление от потоците на каналното разсейване χ_s , е построен върху допускането за линейност на магнитната среда, а именно че магнитната проницаемост на магнитопровода е безкрайно голяма, т.е. няма насищане, независимо от стойността на тока в канала. Очевидно това не съответства на действителната физическа картина на явленията и за това в проектантската практика е приет друг подход за отразяване влиянието на насищането на коронките на зъбите. Това става чрез намаление на коефициента на проводимостта на каналите, което съответства на допълнително “отваряне на канала”. Стойността на корекцията се определя на базата на умозрителна представа за потоците на разсейване, но не на основание на решението на уравнението на магнитното поле.

Затова в настоящата разработка е предложен подход за определяне на стойностите на L_k чрез решаване на задачата за магнитното поле в средата на FEMM в зоната на каналите и феромагнитния магнитопровод на машината в зависимост от тока в проводниците на канала.

В част I на настоящата работа са показани подходи за определене на каналната индуктивност L_k и относителната магнитна проводимост λ_k на базата на отчитане на насищането на зъбната зона от потока на разсейване без да се взема предвид участието на работния поток, което неминуемо изменя магнитното състояние на магнитната система и в частност на зъбната зона.

Затова в настоящата част II това е отчетено като за обект на изследването е избран еднофазен колекторен двигател, при който едновременно действие на възбудителния поток и потока на реакцията на котвата има по-силно изразено влияние върху насищането на зъбната зона, поради големите пускови токове и тези при претоварване, според механичната му характеристика.

Възможни са два подхода за определяне на λ_k - с еквивалентен постоянен ток в единичен проводник и с еквивалентен обобщен канален ток с използване на магнитната енергия на полето в канала W_{mk} .

а) С ток в единичен проводник $I_{np} = Ia/2a$ и брой на проводниците в канала N_k , където Ia е консумираният котвен ток през четките, идващ от външната верига, a – броят на двойките паралелни клонове на намотката.

б) С обобщен канален ток $I_{ob} = N_k \cdot Ia/2a$ и изчислителен брой на проводниците в канала $N_k = 1$. И в двата случая резултатът е един и същ.

$$\lambda_k = \frac{L_k}{\mu_0 N_k^2 l} = \frac{8W_{mk} a^2}{\mu_0 N_k^2 l I_a^2} \quad (1)$$

2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОТНОСИТЕЛНИТЕ МАГНИТНИ ПРОВОДИМОСТИ НА КАНАЛНОТО РАЗСЕЙВАНЕ В СРЕДАТА НА FEMM ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА МАГНИТНАТА ЕНЕРГИЯ W_{mk}

Определянето на тези величини е уредено в пост процесора на FEMM с функцията **Magnetic field energy** като двоен интеграл върху напречното сечение на обекта, чиято магнитна енергия се определя. Впрочем, практически същите резултати се получават и при използване на функцията **Magnetic field coenergy** по причина на линейността на средата.

За нуждите на изследването са използвани два модела:

а) модел, съответстващ на действителния случай, при който $i_a = i_f$ - фиг.1

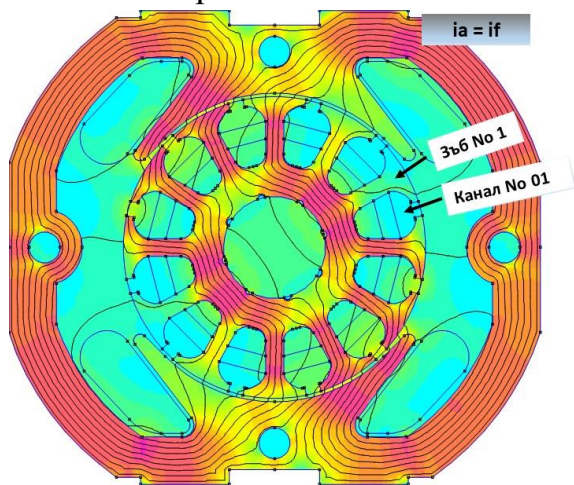
б) модел, при който котвата е в среда с $\mu_r = 1$ и са запазени два канала - фиг.2.

За удобство е въведена кратността на тока $i_a^* = \frac{i_a}{i_n}$.

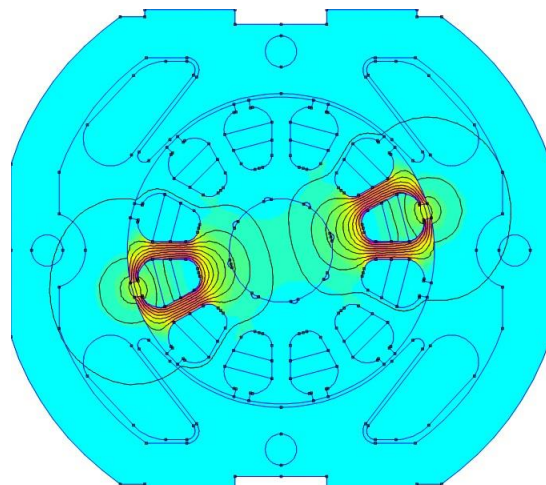
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗЧИСЛЕНИЯТА

Както може да се очаква, при работните режими магнитните натоварвания в зъбите са твърде разнообразни поради различното им разположение спрямо полю-

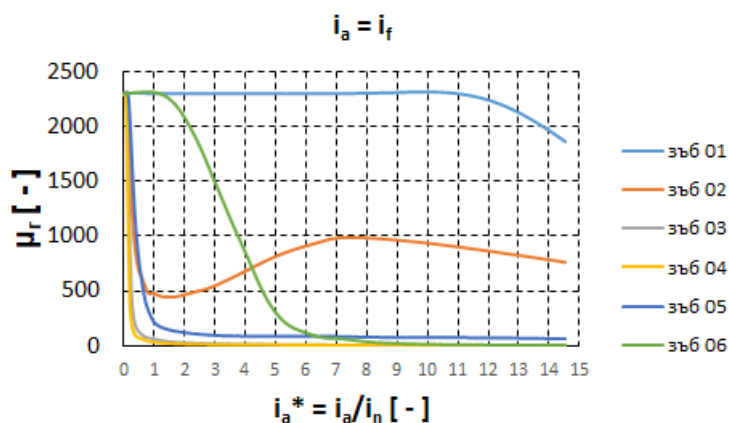
сите. Това се вижда както на фиг.1, така и от показаните на фиг.3 графични зависимости на относителната магнитна проницаемост μ_r при различни стойности на товарния ток.



Фиг.1.



Фиг.2.



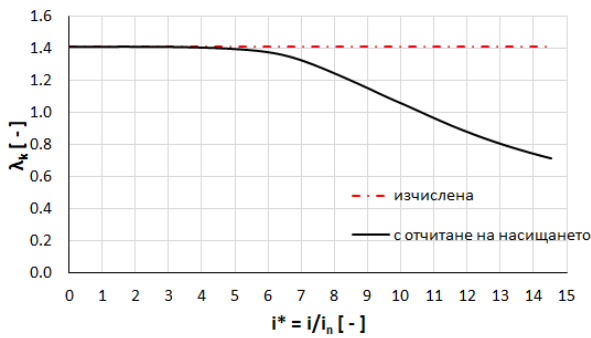
Фиг.3.

При това магнитната проницаемост на два съседни зъба, обграждащи един канал, е различна. На практика магнитното състояние на зъбите на котвата зависи от две магнитни полета – това на основния магнитен поток и това на полето на разсейване, което се затваря през зъбите

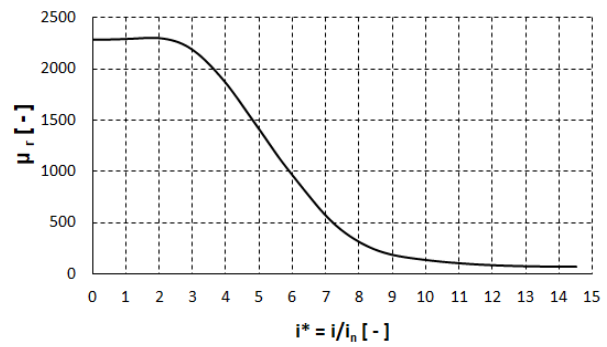
Отчитането на тази характерна особеност изисква следната последователност на решение на проблема:

А/ Определяне на зависимостта на относителната магнитна проводимост λ_k от насищането на зъбите, когато в съседните зъби магнитното натоварване е еднакво – моделът от фиг.2. В случая двата канала с ток са достатъчно далеч, а в другите няма ток, така че няма взаимна индукция и се разглежда само явлението самоиндукция.

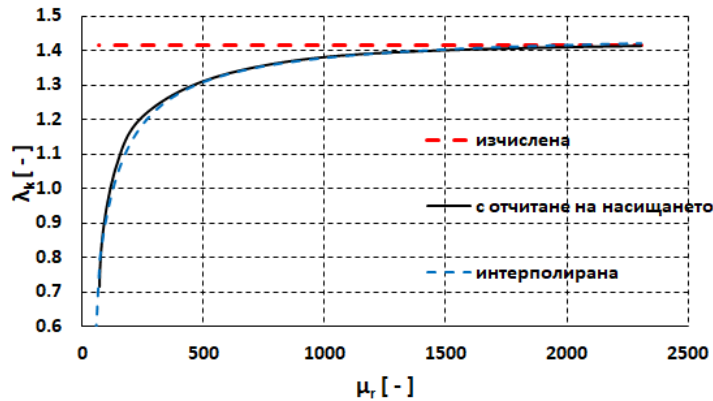
На фиг.4 е показан характерът на изменение на относителната магнитна проводимост λ_k в зависимост от тока в канала. Стойността на „изчислената” λ_k е получена с традиционните зависимости от курсовете по проектиране на електрически машини. На фиг.5 е показано изменението на μ_r на модела от фиг.2 при изменение на тока до стойности от порядъка на пусковите.



Фиг.4.



Фиг.5.



Фиг.6.

Б/ За по-нататъшните нужди на изследването е направено познатото вече от ч. I изключване на тока от горните зависимости до получаването на $\lambda_k = f(\mu_r)$ - фиг.6.

В/ За разглеждания конкретен двигател е намерена подходяща интерполационна зависимост :

$$\lambda_k = -0.131 + \frac{1.5867 \mu_r}{50.8253 + \mu_r} \quad (2)$$

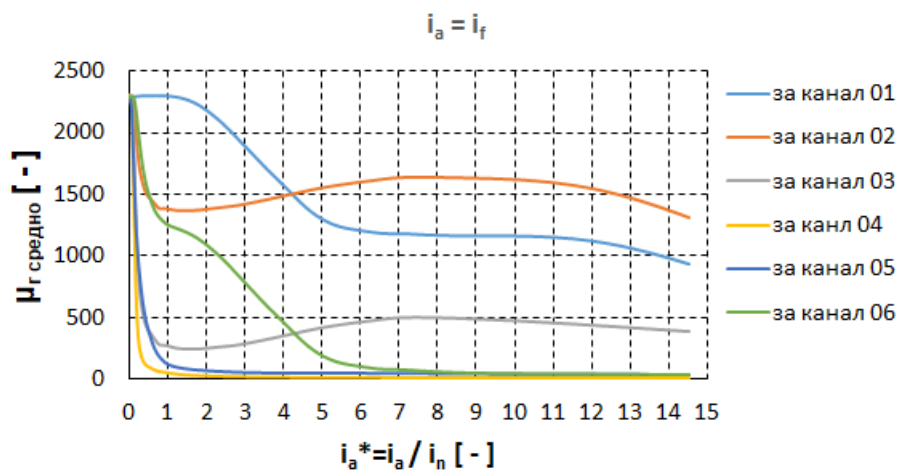
Г/ От данните, необходими за построяване на зависимостите от фиг.3, се определя средната магнитна проницаемост на зъбите около всеки канал

$$\mu_{r \text{ средно } j} = \frac{\mu_{r j-1} + \mu_{r j}}{2} \quad (3)$$

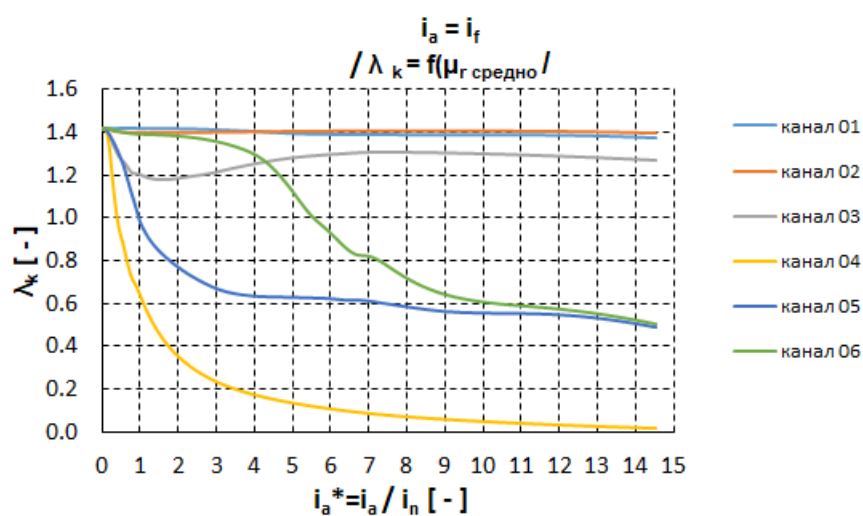
С тези стойности са построени графичните зависимости на фиг.7.

Д/ С помощта на получените стойности за $\mu_{r \text{ средно}}$ се определят относителните магнитни проводимости λ_k за съответните канали, графично показани на фиг. 8.

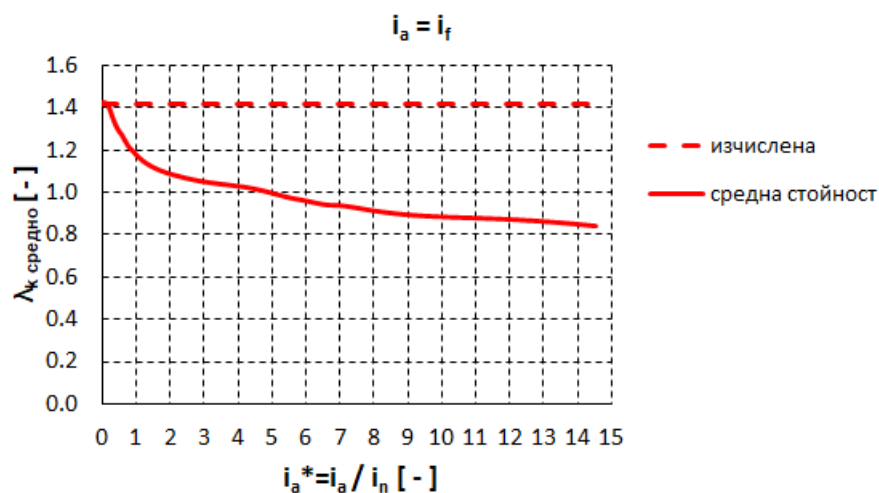
Е/ За нуждите на изчислителните методики и програми се определя средната стойност $\lambda_{k \text{ средно}}$ на относителните магнитни проводимости λ_k за каналите в границата на полюсното деление.



Фиг.7.



Фиг.8.



Фиг.9.

Получената зависимост за средната относителна магнитна проводимост $\lambda_{к\text{срдно}}$, която е свързана с магнитното състояние на машината във всеки работен режим, е показана на фиг.9. Тя може да се използва в изчислителните програми, като учас-

тва в итеративни процедури, свързани с определяне на тока при решаване на уравнението за равновесие на напрежението за определяне на е.д.н. с участие на уточненото индуктивно съпротивление на разсейване

4. АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1. Получените резултати за относителните магнитни проводимости на каналното разсейване, определени с данни от решението за магнитното поле в средата на FEMM, кореспондират със стойностите, получени по аналитичен път, но отразяват и влиянието на степента на насищане на зъбната зона, както и влиянието на възбудителния поток и резултантното магнитно поле.

2. Степента на това влияние се изразява в намаление на индуктивността на разсейване и зависи от общото насищане на цялата магнитна система на машината като в някои случаи може да бъде доста съществено.

3. Такива изследвания могат да бъдат направени за различни въртящи се машини с произволна форма на каналите. Изведените зависимости са във функция от магнитната проницаемост на зъбите, което способства за универсалната им приложимост към различни видове електротехнически стомани при зададени геометрични размери на активната част на машината.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Staszak Jan, Determination of slot leakage inductance for three-phase induction motors using an analytical method; Archives of electrical engineering, Vol. 62(4), pp. 569-591 (2013).
- [2] Xusheng Wu, Wei Gao, Research on Stator Winding Leakage Reactance Calculation of Doublewinding AC-DC Generator, © 2012 Trans. Tech. Publications, Switzerland, 2011.
- [3] Копилов И. и колектив, Проектиране на електрически машини, ДИ "Техника", 1988, стр.225-235.
- [4] Rizov P., Mihov M., Sotirov D., Stiptzov V., Kushleva J., Femm's Application for Determination of Slot Magnetic Conduction of a Rotor Slot of Induction Machine, 6th International Conference on Applied Electromagnetics, Nish, Serbia and Montenegro, 1 - 3 June 2003, PES 2003.
- [5] Mihov M., Brandisky K., Rizov P., Determination of The Stator Slot Magnetic Conductance of Induction Machine, 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau 22 - 25 September 2003.
- [6] Meeker, D. Finite Element Method Magnetics, Ver. 3.3, User's Manual, May, 2003.

Автори: **Михо П. Михов**, доц. д-р, катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: mmihov_old@abv.bg; **Ганчо Й. Божилов**, проф. д.т.н., катедра „Електрически машини”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: gjboj@tu-sofia.bg.

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Радослав Спасов

МЕТОДИ ЗА НАМАГНИТВАНЕ НА МАГНИТНО-ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Ангел Петлешков

Резюме: В статията са разгледани методи за импулсно намагнитване на магнитно-технологични приспособления. След анализ на получените резултати е избран метод за намагнитване с три импулса.

Ключови думи: импулсно намагнитване, магнитно-технологични приспособления.

METHODS FOR IMPULSE MAGNETIZATION OF MAGNETIC TECHNOLOGICAL DEVICES

Angel Petleshkov

Abstract: Methods for impulse magnetization of magnetic technological devices are considered in the paper. After analysis of the results obtained, a three-pulse magnetization method was chosen.

Keywords: impulse magnetization, magnetic technological devices.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Както е известно, процесът на намагнитване на феромагнитния материал представлява изменение на намагнитеността на веществото под действие на външно магнитно поле. Рационалното използване на постоянномагнитни технологични приспособления е възможно само при намагнитването им до насищане. Насищане на феромагнетика настъпва, когато посоката на резултантния (сумарния) вектор на намагнитеността на домените, а след това и спиновите моменти на отделните електрони се приближат към посоката на външното поле.

Достатъчна за насищането се счита такава стойност на напрегнатостта на намагнитващото поле $H_{\max}$, намаляването на която с 25% да не води до намаляване на остатъчната индукция $B_{\text{ост}}$ и коерцитивната сила H_C .

За достигане на максимална ефективност на действието на постоянния магнит е необходимо намагнитването да се извършва след като е събрана цялата магнитна система, при минимална въздушна междина.

За намагнитване на постоянни магнити може да се използва както източник на постоянно магнитно поле, така и източник на импулсно магнитно поле. Импулсните методи са най-перспективни. При избор на продължителността на импулса на намагнитващото поле трябва да се отчитат и вихровите токове, създаващи соб-

ствено поле, възпрепятстващо проникването в дълбочина на материала на намагнитващото външно поле.

Продължителността на намагнитващия импулс се определя с решаването на сложна задача. Приблизително може да се изчисли по формулата

$$\Delta t = 6,4 \sigma \frac{B}{H} D^2 \cdot 10^{-9}, \text{ s} \quad (1)$$

където: B е магнитната индукция, Т;

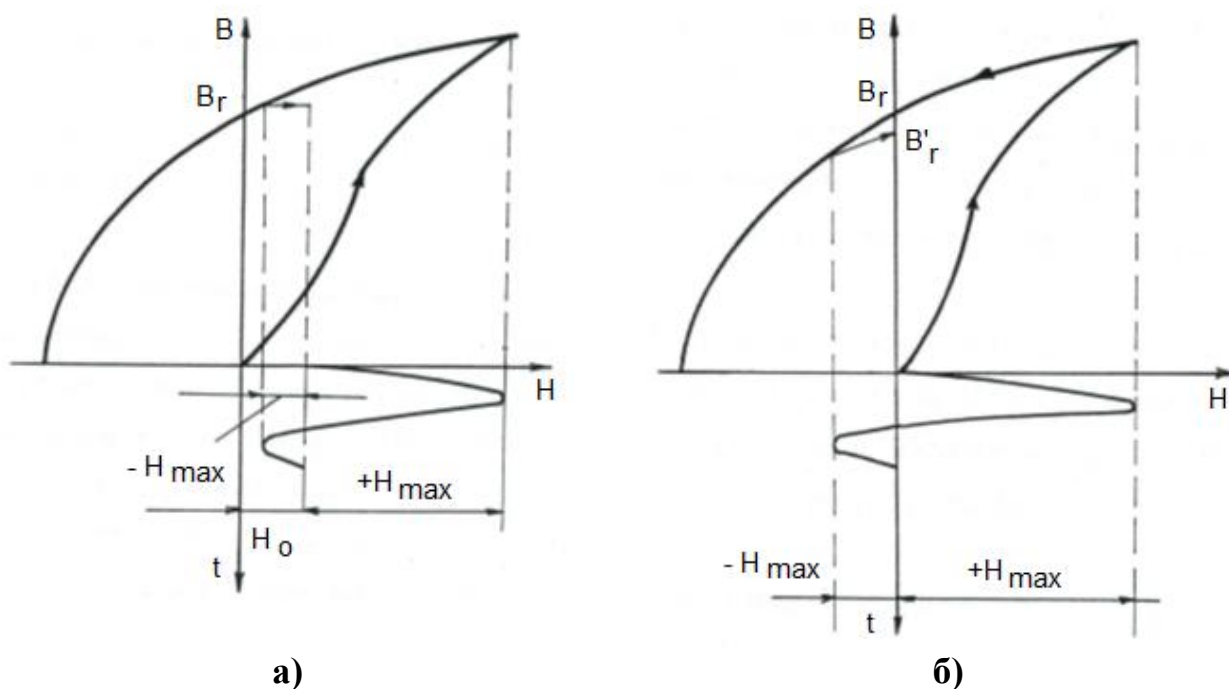
H - напрегнатост на външното магнитно поле, kA/m;

σ - специфична проводимост на материала, S/m;

D - ефективен диаметър на магнита, m.

Често се използва комбинирано намагнитване, при което импулсното магнитно поле с напрегнатост $H_{\max}$ се наслагва към стационарното с напрегнатост H_0 , създавано от постоянен ток (фиг.1а).

Ефективността на този начин се състои в това, че част от общото намагнитващо поле се създава от постоянен ток, в резултат на който се намалява напрегнатостта на импулсното поле, а това в крайна сметка води до намаляване на мощността и габаритите на цялото намагнитващо устройство. При това може да се изключи частичното размагнитване, предизвикано от възникването на обратна полувълна на разрядния ток (фиг.1б).



Фиг.1. Комбинирано намагнитване

При отсъствие на мощен източник за намагнитващите устройства намагнитването на магнитите може да се извърши по безхистерезисна крива на намагнитване, т.е. чрез прилагане на променливо магнитно поле, намаляващо амплитудата на напрегнатостта на постоянното магнитно поле. При това максималната амплитуда на напрегнатостта на променливото магнитно поле трябва да е равна на напрегнатостта на постоянното поле, необходимо за намагнитване на магнита до насищане.

Интерес представлява методът за намаляване на намагнитеността и размагнитване в условията, при които се наблюдава обратимо намаляване на коерцитивната сила на магнитно-твърдия материал.

Едно от условията е нагряването на висококоерцитивните материали. Напрегнатостта на коерцитивната сила на бариерен ферит в областта на точката на Кюри (450°C) се намалява до $100\text{--}150\text{ A/m}$ и за тяхното намагнитване до насищане е достатъчно въздействието на магнитно поле с напрегнатост до 500 A/m , което е 15 пъти по-малко спрямо това при нормална температура.

Ефективността на този метод е очевидна, ако се вземе под внимание, че в последните години все по-широко се прилагат магнити от висококоерцитивни материали на основата на съединения на редкоземни елементи с кобалт. Коерцитивната сила достига $1600\text{--}2000\text{ kA/m}$, а напрегнатостта на полето, необходимо за намагнитване до насищане - $10\,000\text{ kA/m}$. Използването за тази цел на електромагнити и даже на най-ефективни свръхпроводящи соленоиди е затруднено и изисква създаване на сложни и скъпи уредби.

Този метод може да се използва за намагнитване и размагнитване на образци от редкоземни елементи и кобалт.

2. ИМПУЛСНО НАМАГНИТВАНЕ НА ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Широкото използване на магнитно-технологични приспособления (МТП) с постоянни магнити изисква разработването на по-ефективни методи за намагнитване. Един от най-разпространените методи е импулсното намагнитване, чието предимство е възможността за създаване на сравнително компактни устройства, които бързо намагнитват системи със сложна конфигурация на магнитната верига.

Разглежда се импулсното намагнитване на разпространените в МТП постоянни магнити с кръгло и правоъгълно сечение, поставени в еднородно импулсно магнитно поле на намагнитващата установка. Арматурата не е включена, тъй като нейните размери и конфигурация за всяко МТП са различни.

Разработеният метод може да бъде прилаган при всякаква форма на импулса. Разглежда се импулс във вид на полуълна от синусоида, който най-често се използва в импулсните устройства.

Електромагнитните процеси вътре в магнита се описват с уравненията

- за цилиндричен магнит

$$\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} = \sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

- за призматичен магнит с правоъгълно сечение

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

където σ е относителната проводимост на материала на магнита.

Напрегнатостта на полето на повърхността на магнита се представя във функция от времето

$$H_{\text{пов}} = \begin{cases} H(t) = H_m \sin\left(\frac{t}{T}\pi\right), & 0 \leq t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases} \quad (4)$$

където T е продължителност на намагнитващия импулс.

За оста на магнитите трябва да е изпълнено условието:

- за цилиндричен магнит

$$\left. \frac{\partial H}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (5)$$

- за призматичен магнит

$$\left. \frac{\partial H}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{и} \quad \left. \frac{\partial H}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (6)$$

Задачата се разглежда за размагнитен материал, т.е. при $t = 0$.

$$H|_{t=0} = 0 \quad B|_{t=0} = 0 \quad (7)$$

Връзката между магнитната индукция B и напрегнатостта на полето H се определя от хистерезисната крива за дадения материал. Използването на аналитични методи за решаване на тази задача се усложнява поради трудното математично описание на нелинейните свойства на средата.

За получаване на универсални резултати изчисленията се извършват в относителни единици. За базисни стойности на напрегнатостта на полето, магнитната индукция и времето, са избрани коерцитивната сила H_C , остатъчната индукция B_r и продължителността на намагнитващия импулс T . Базисна стойност за линейните размери е диаметърът D за цилиндрични магнити и размера на голямата страна D (паралелна на оста X) за призматичните

$$\begin{aligned} h &= \frac{H}{H_C} & b &= \frac{B}{B_r} & \tau &= \frac{t}{T} \\ r^* &= \frac{r}{\frac{D}{2}} & x^* &= \frac{x}{\frac{D}{2}} & y^* &= \frac{y}{\frac{c}{2}} \end{aligned} \quad (8)$$

Връзката на тези величини се отчита с обобщения параметър g

$$g = \sigma \frac{B_r}{H_C T} \frac{D^2}{4} = \frac{\mu_0 \sigma R^2}{T} \quad (9)$$

който е като критерий за подобие между процесите, извършващи се при намагнитването на магнитите.

Въвеждането на параметъра g позволява да се получат универсални зависимости за съпоставяне условията на импулсно намагнитване на различни магнити.

Уравненията за цилиндричния магнит в относителни единици са:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial h}{\partial r^*} = g \frac{\partial b}{\partial \tau} \quad (10)$$

$$h|_{r^*=1} = \begin{cases} h_m \sin \pi \tau, & 0 \leq \tau \leq 1 \\ 0, & \tau > 1 \end{cases} \quad (11)$$

където

$$\left. \frac{\partial h}{\partial r^*} \right|_{r^*=0} = 0 \quad (12)$$

$$h(r^*, 0) = 0 \quad (13)$$

и за магнит с правоъгълно сечение с размери на страните D и C

$$\frac{\partial}{\partial x^*} \left(q \frac{\partial b}{\partial x^*} \right) + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(q \frac{\partial b}{\partial y^*} \right) = g \frac{\partial b}{\partial \tau} \quad (14)$$

$$h|_{y^*=1} = h|_{x^*=1} = \begin{cases} h_m \sin \pi \tau, & 0 \leq \tau \leq 1 \\ 0, & \tau > 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial b}{\partial x^*} \right|_{x^*=0} = \left. \frac{\partial b}{\partial y^*} \right|_{y^*=0} = 0 \quad (16)$$

$$b(x^*, y^*, 0) = 0 \quad (17)$$

където: $p = \frac{D^2}{c^2}$ и $q = \frac{1}{\mu_d} \frac{H_C}{B_r}$.

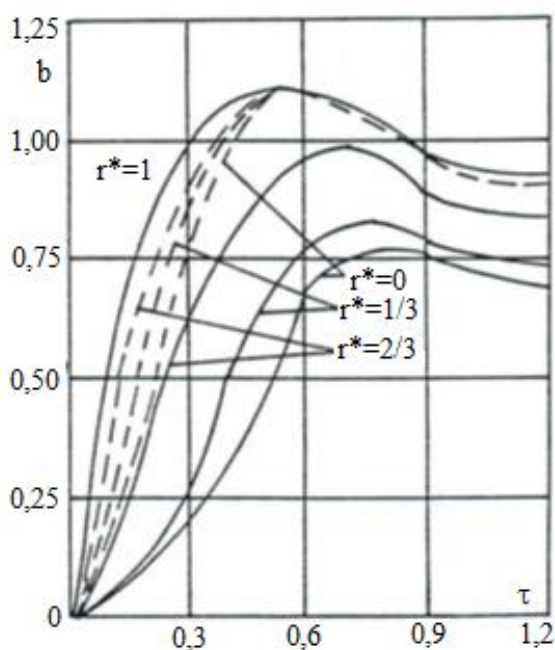
Материалът напълно се намагнитва при постоянна напрегнатост на полето само при малко g ($g \leq 0,03$), т.е. при голяма продължителност на импулса. При нарастване на g даже до 0,1 остатъчната индукция на оста на цилиндъра се оказва почти с 20% по-малка спрямо тази на повърхността, при което и значителното повишаване на напрегнатостта на полето не води до увеличаване на намагнитеността, поради влиянието на вихровите токове.

Аналогична картина се наблюдава и за призматичен магнит с квадратно или правоъгълно сечение.

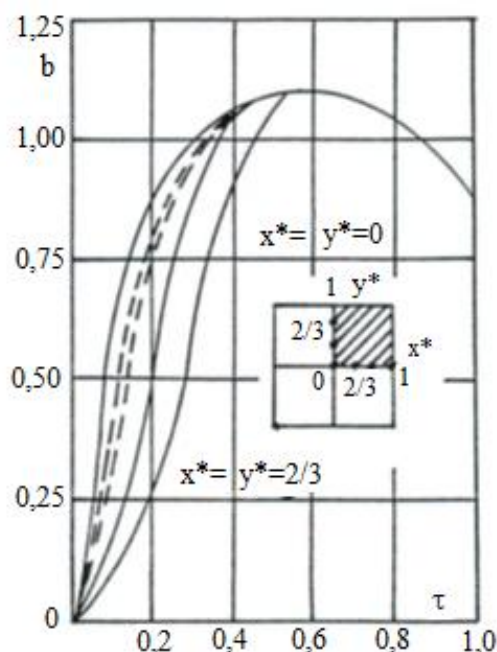
На фиг.2 е показана, в относителни единици, зависимостта на изменението на индукцията $b(\tau)$ при $\frac{H_{max}}{H_C} = 2$ по време на действието на импулса τ . На фиг.2

$b(\tau)$ е показана с плътна линия за $d=2,5$, а с прекъсната линия - за $d=0,63$ при $a_M=2$. На практика се оказва, че тя е еднаква за магнити с правоъгълно сечение и различно отношение на страните. В този случай големината на R във формулата за g се приема равна на половината дължина на диагонала на напречното сечение.

На фиг.3 зависимостта $b(\tau)$ е показана в относителни единици за различна дълбочина на призматични магнити с квадратно и правоъгълно сечение при еднаква площ ($h_m = 2$; — - $p=1$, $g = 0,5$; - - - - $p=16$, $g = 2$).



Фиг.2. Изменение на индукцията при $\frac{H_{max}}{H_C} = 2$

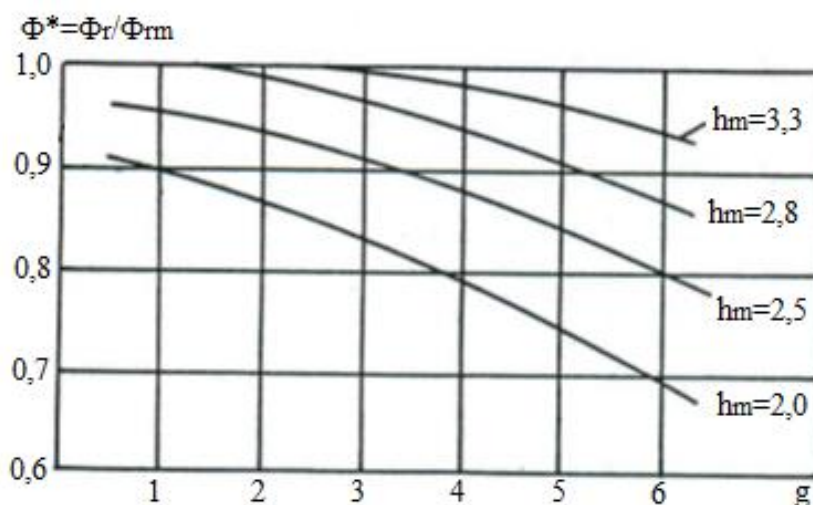


Фиг.3. Изменение на индукцията за различна дълбочина на призматични магнити

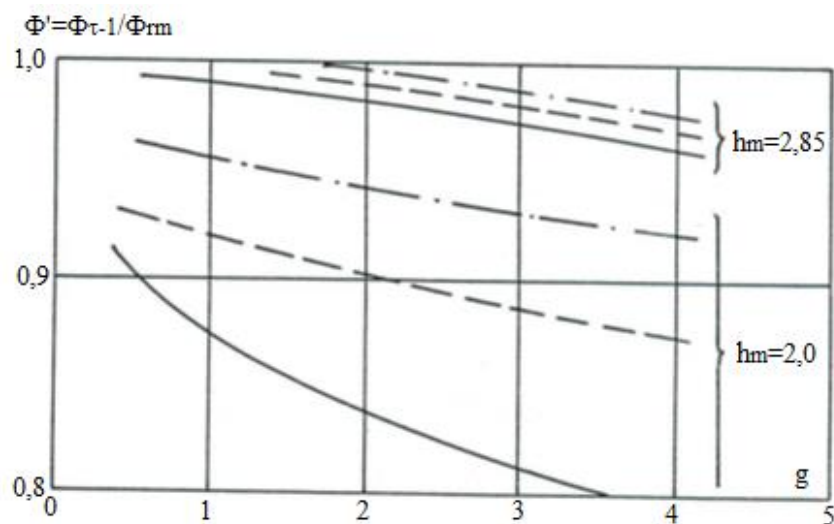
Влиянието на вихровите токове в магнити с квадратно сечение ($D/C = 1$) се оказва още по-силно спрямо магнити с правоъгълно сечение със същата площ и отношение на страните $D/C = 16$.

Изборът на параметри за намагнитващия импулс на цилиндричен и призматичен магнит от КОНИАЛ може да се осъществи по графиката на фиг.4. Тя показва зависимостта на отношението на остатъчния магнитен поток Φ_r към пределно възможния остатъчен поток $\Phi_{rm} = B_r S$.

Графиката, показваща зависимостта на магнитния поток от g в магнит с кръгло, правоъгълно и квадратно сечение в момента на завършване на импулса е показана на фиг.5. Показаните на фигурата криви имат следните означения: — - цилиндър; - - - - квадрат с $p=1$; — · — - правоъгълник с $p=16$.



Фиг.4. Зависимост $\frac{\Phi_r}{\Phi_{rm}}(g)$

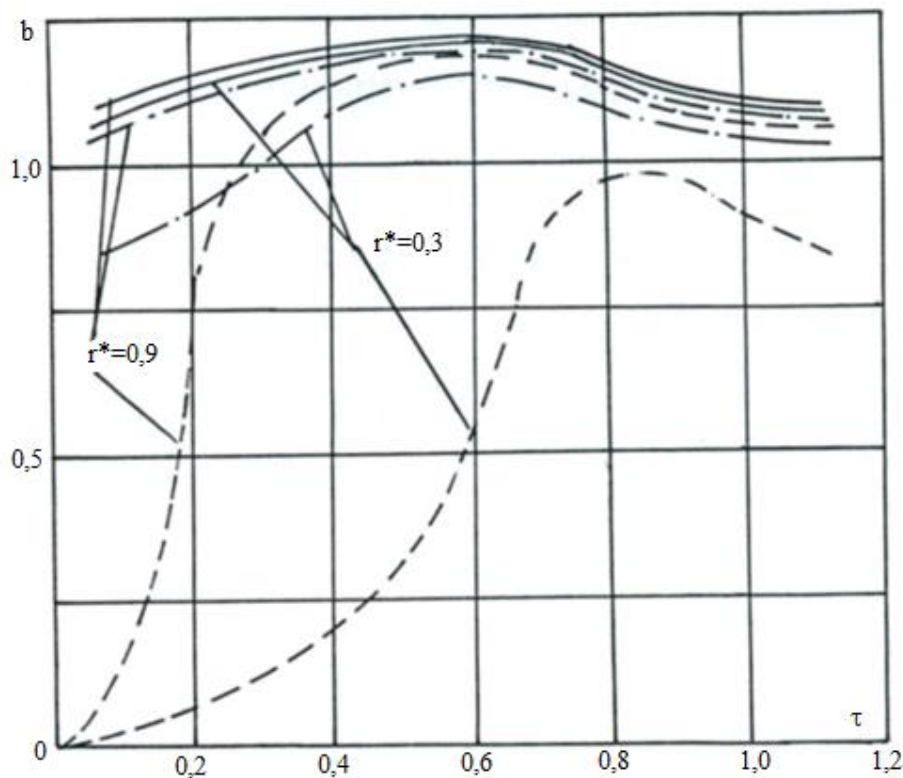


Фиг.5. Зависимост на магнитния поток от g в момента на завършване на импулса

Потокът в цилиндричния магнит (при еднакви условия на намагнитване) се оказва по-малък отколкото в призматичен. При това в магнита с правоъгълно сечение потокът е толкова по-голям, колкото е по-къс магнита.

Анализът на получените зависимости и графики показва, че намагнитването на материали от тип КОНИАЛ технически не е трудно да се осъществи при въздействие на серия намагнитващи импулси. Магнитната индукция, както се вижда от фиг.6, ще нараства във всички слоеве на магнита.

На фиг.6 за кривите, получени при различен брой импулси, са използвани следните означения: - - - - - 1-ви импулс; — · — 2-ри импулс; — - 3-ти импулс.



Фиг.6. Изменение на магнитната индукция при различен брой импулси

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът показва, че е целесъобразно използването на серия импулси при големи стойности на g , когато пълно намагнитване не се постига при въздействие с един импулс ($g > 0,4$). Подобряването на намагнитването се обяснява с отслабването на вихровите токове вследствие намаляването на магнитната проницаемост. След въздействие на третия импулс магнитният поток достига максимална стойност, затова използването на много импулси (повече от три) не е целесъобразно.

При намагнитване с три импулса може най-пълно да се използва енергията на постоянните магнити.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Покровский А., Г. Сергеев, И. Сотников и др., *Расчет процессов импульсного намагничивания постоянных магнитов из сплавов ЮНДК*, Электротехника, 6, стр. 49-53, 1974.
- [2] Сергеев Г., А. Покровский, *Расчет на ЭВМ режимов импульсного намагничивания восококоэрцитивных магнитов*, кн. *Методы и приборы автоматического нерезрещающего контроля*, Рига, Рижский политехнический институт, стр. 20-31, 1978.
- [3] Батыгин Ю., *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий*, 2-е изд., Харьков, МОСТ-Торнадо, 2003.
- [4] Цанев Ц., *Магнитно-технологични приспособления*, НТСЕБ, София, 2012.

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

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: гл. ас. д-р Борислав Бойчев

ЦИФРОВА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА МАГНИТНО-ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Иван Ангелов, Ангел Петлешков

Резюме: Представена е блокова схема на цифрова система управляваща работата на магнитно-технологични приспособления. Показани са примерни стратегии за управление при намагнитване и съответно при размагнитване на приспособлението. На тази основа е разработена схема на системата за управление с необходимите блокировки и управляващи органи.

Ключови думи: управление, магнитно-технологични приспособления.

DIGITAL CONTROL SYSTEM OF MAGNETIC TECHNOLOGICAL DEVICES

Ivan Angelov, Angel Petleshkov

Abstract: A block diagram of a digital system managing the operation of magnetic processing devices is presented. Exemplary management strategies for magnetization and demagnetization of the device are presented. On this basis, a control system with the necessary locks and control bodies has been developed.

Keywords: control, magnetic technological devices.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Магнитно-технологичните приспособления (МТП) намират приложение в различни области на промишлеността, където се борави с феромагнитни материали. Особено широко е тяхното приложение в машиностроенето, където основната част от изделията са изработени от стомана или чугун т.е. от материали с добре изразени феромагнитни свойства.

При използването на магнитно-технологични приспособления за фиксиране на детайли е необходимо да се управлява процеса на захващане и след това на освобождаване. В статията е представена разработена цифрова система за управление на намагнитване/размагнитване на магнитно-технологични приспособления

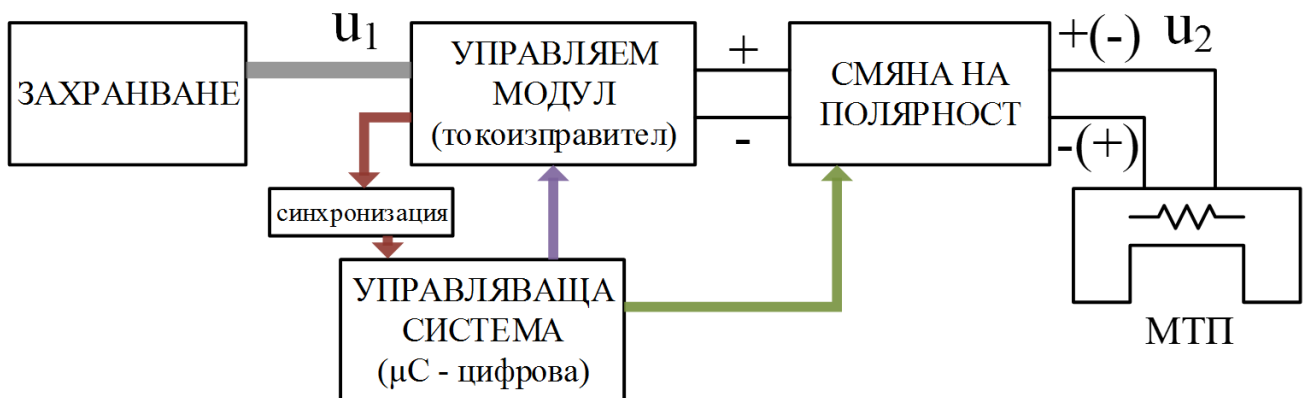
2. СХЕМИ НА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ

При разработване на управлението са поставени някои основни изисквания свързани с експлоатацията и връзката човек-машина:

- Да се захранва от стандартната силова мрежа;
- Да бъде сигурна и да издържа на условията на работа в производствени цехове;

- Да се настройва лесно;
- Да се управлява интуитивно;
- Да не позволява случайно подаване на въздействие от оператора.

За захранване се използва еднофазна променливотокова мрежа с промишлена честота и напрежение 230V. Основното управляващо ядро е наречено „УПРАВЛЯВАЩА СИСТЕМА“ и е изградено с микрокомпютър. Заложената програма се грижи за управление на другите модули, за връзката с оператора и за изпълнение на различни блокировки. Блокова схема на устройството е показана на фиг.1.

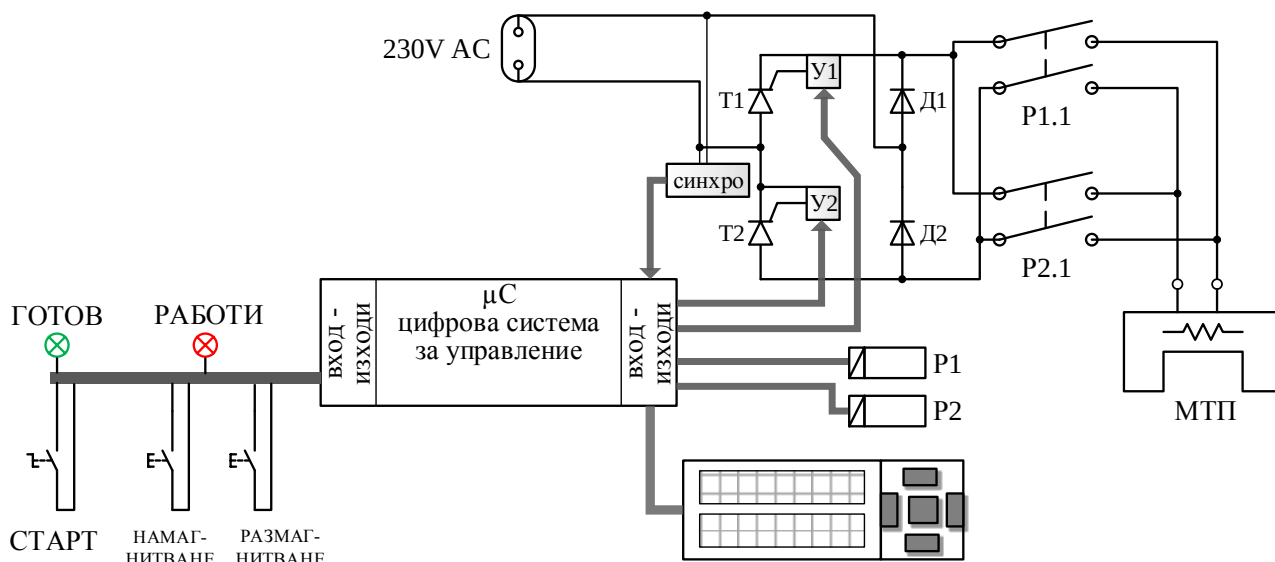


Фиг.1. Блокова схема

Външното захранване се подава на „УПРАВЛЯЕМ МОДУЛ“ който е еднофазен полууправляем тиристорен токоизправител. За превключване на режима в „захранване“ или „освобождаване“ е предвиден модул „СМЯНА НА ПОЛЯРНОСТ“. Моментите, в които напрежението преминава през нула, или начало на полупериод, се установява от модул „синхронизация“. Координацията на отпушване на управляемия токоизправител и управлението на останалите модули е задача на „УПРАВЛЯВАЩА СИСТЕМА“ изградена на основата на микрокомпютър с управляваща програма.

Електрическата схема, конструирана на базата на блоковата схема, е показана на фиг.2.

Основната част на управлението е микрокомпютърната цифрова система за управление. Тя със своите входове – изходи е свързана с останалите елементи на системата, както и с управляващите органи. Синхронизатора за начало на полупериодите на захранващото напрежение „синхро“ следи директно захранващата линия и подава към вход импулси при преминаване на синусоидата през нулева стойност. Полууправляемият токоизправител е реализиран с два диода $D1$ и $D2$ и два управляеми прибора – тиристори $T1$ и $T2$ съответно. Тиристорите се отпушват с изолирани от електронната система модули $U1$ и $U2$. При избраната схема двата диода са във веригата на товара и изпълняват и ролята на „обратен“ диод за силно индуктивния товар.



Фиг.2. Електрическа схема

Посоката на тока в изхода се сменя от две електромагнитни релета $P1$ и $P2$ чрез техните двойни нормално отворени силови контакти $P1.1$ и $P2.1$. Тук не са показани допълнителните помощни контакти с помощта на които цифровата система следи и контролира задействането на релетата.

Настройката на желаните параметри на изходното въздействие се извършва от пет бутонна клавиатура и двуредов знаково – цифров дисплей.

Процесът на захващане се инициира с натискане на бутон „НАМАГНИТВАНЕ“, при което управляващата програма подготвя системата с включване на реле $P1$ и минаване в готовност за изпълняване на настроената предварително стратегия за захващане. Готовността се показва със светване на зелен сигнал върху пулта за управление. Ако при тази ситуация, без да се отпусне $B1$ се натисне и бутоната $B2$ „СТАРТ“ се извършва захващане на детайла поставен върху магнито-технологичното приспособление. Процесът на работа се сигнализира с червен светлинен сигнал, като зеления сигнал за готовност изгасва. След края на процеса системата изключва релето $P1$, изгасва червения сигнал и управляващите бутони се отпускат. Детайлът е захванат на работната маса.

Процес на освобождаване се стартира по подобен начин. Натиска се бутон „РАЗМАГНИТВАНЕ“, при което се подава обратна полярност с включване на реле $P2$, и детайла се освобождава.

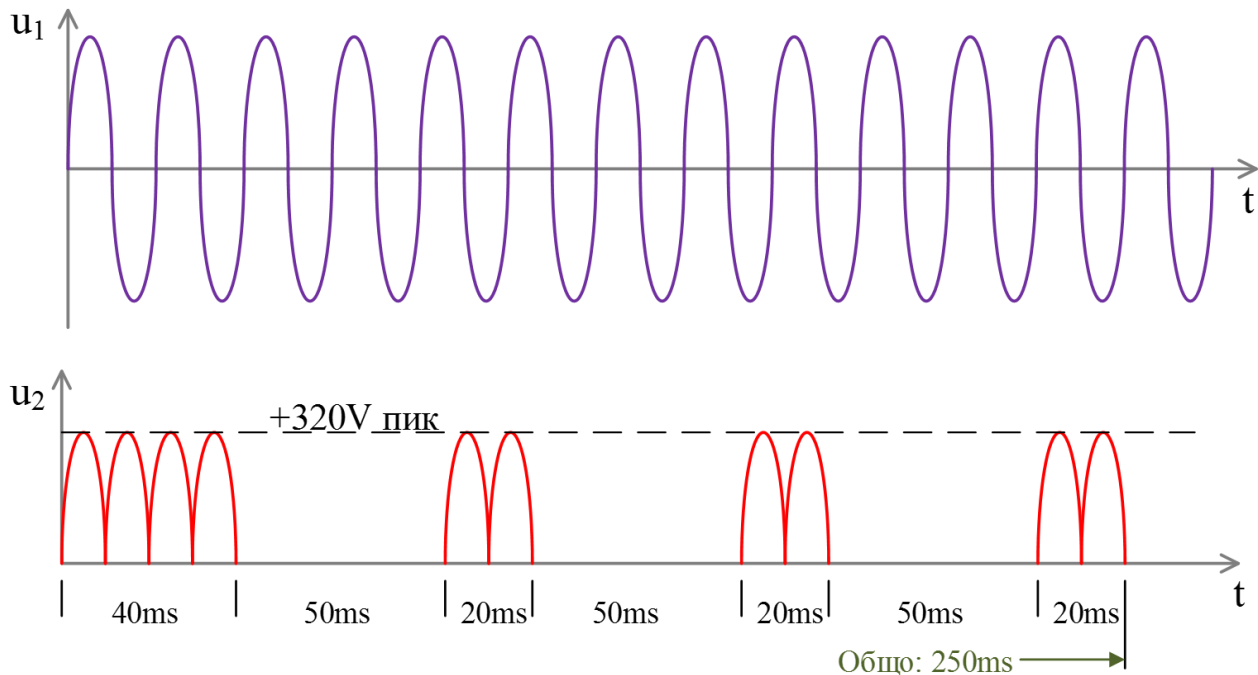
Работата на системата се стартира с два бутона за да се елиминира случайното натискане на бутон от оператора. При случайно натискане само на един бутон не се извършва никакво действие и няма опасност например да се освободи детайла по време на обработка.

3. СТРАТЕГИИ НА УПРАВЛЕНИЕ ПРИ НАМАГНИТВАНЕ И РАЗМАГНИТВАНЕ

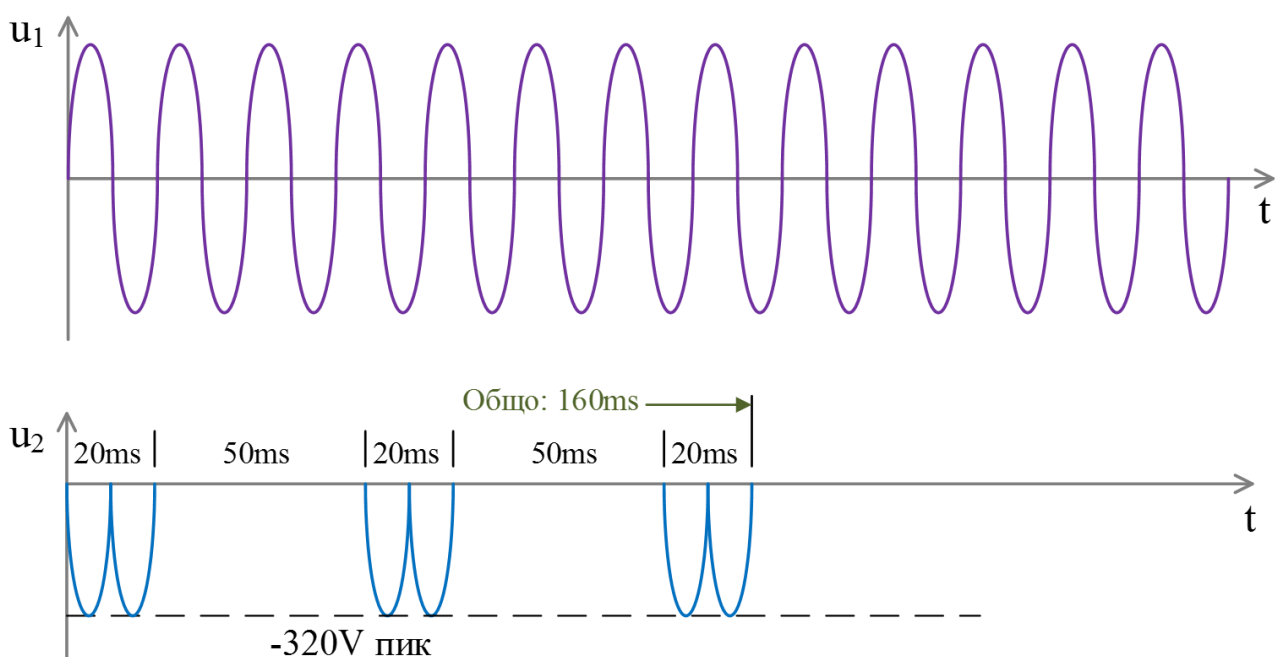
При управление на процесите на захващане и отпускане към МТП се подават минимум по два полупериода (изправени) от захранващото напрежение. От настройките на съответната стратегия може да се избира колко „импулса“ ще се

подават към изхода и паузата между тях. Така наречените „импулси“ може да са от един до шест, като всеки „импулс“ може да е формиран от една до три двойки изправени полупериоди. Паузата между „импулсите“ може да се избира от 10ms до 150ms.

Примерна стратегия за намагнитване на МТП (захващане на детайл) е показана на фиг.3. Избрани са четири импулса с паузи между тях от по 50ms. Първият импулс е двоен, а останалите три са единични. Общото време на въздействие е 250ms. Полярността на импулсите е положителна и се изпълнява командата „НАМАГНИТВАНЕ“ с направените предварително настройки.



Фиг.3. Изходен сигнал при процес на намагнитване



Фиг.4. Изходен сигнал при процес на размагнитване

За размагнитване на МТП (освобождаване на детайл) се стартира команда „РАЗМАГНИТВАНЕ“ с предварително зададени настройки. Примерна стратегия за размагнитване е показана на фиг.4. Тук импулсите са три единични с обратна (отрицателна) полярност. Паузата между импулсите е 50ms като продължителността на процеса е 160ms.

4. ИЗВОДИ

Разработената цифрова система за управление на магнитно технологични приспособления е с възможности за настройки на въздействията в широки граници. Може да се управляват разнообразни МТП, като се подбира подходяща стратегия за въздействие.

Захранването е от стандартна еднофазна мрежа ниско напрежение с промишлена честота. Не са необходими специални захранващи източници например.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ангелов И., И. Петров, *Приложение на микроконтролери за управление на тиристорни токоизправители*, V Конференция на Електротехнически факултет „ЕФ 2013“, 2-5 септември, 2013, Созопол, България, Годишник на ТУ-София, том 63, книга 6, София, 2013, стр. 377-382, ISSN1311-0829.

[2] Ангелов И., А. Петлешков, *Цифрова система за управление на магнитно-технологични приспособления*, X Конференция на Електротехнически факултет „БулЕФ 2018“, 11-14 септември 2018, Созопол, България.

Автори: Иван Ангелов, доц. д-р, катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: ivanang@tu-sofia.bg; Ангел Петлешков, ас., катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт“, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: apetl@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Николай Матанов

ОПРЕДЕЛЯНЕ КАПИТАЛОВИТЕ РАЗХОДИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА КОНДЕНЗАТОРНИ УРЕДБИ

Снежана Димитрова

Резюме: В доклада са представени капиталовите разходи за изграждане на комплектни кондензаторни уредби. За определяне на капиталовите разходи са използвани данни от водещи производители. Отчитайки всички съставни части на кондензаторните уредби, е направено изследване на зависимостта между необходимите капиталовите разходи за изграждане и мощността на кондензаторните батерии (КБ). Резултатите от това изследване могат да се използват при проектирането на ЕСС за оптимизиране разпределението на кондензаторните мощности.

Ключови думи: кондензаторни уредби, кондензаторни батерии, капиталови разходи.

DETERMINATION OF CAPITAL EXPENSES FOR CONSTRUCTION OF CAPACITOR BANKS

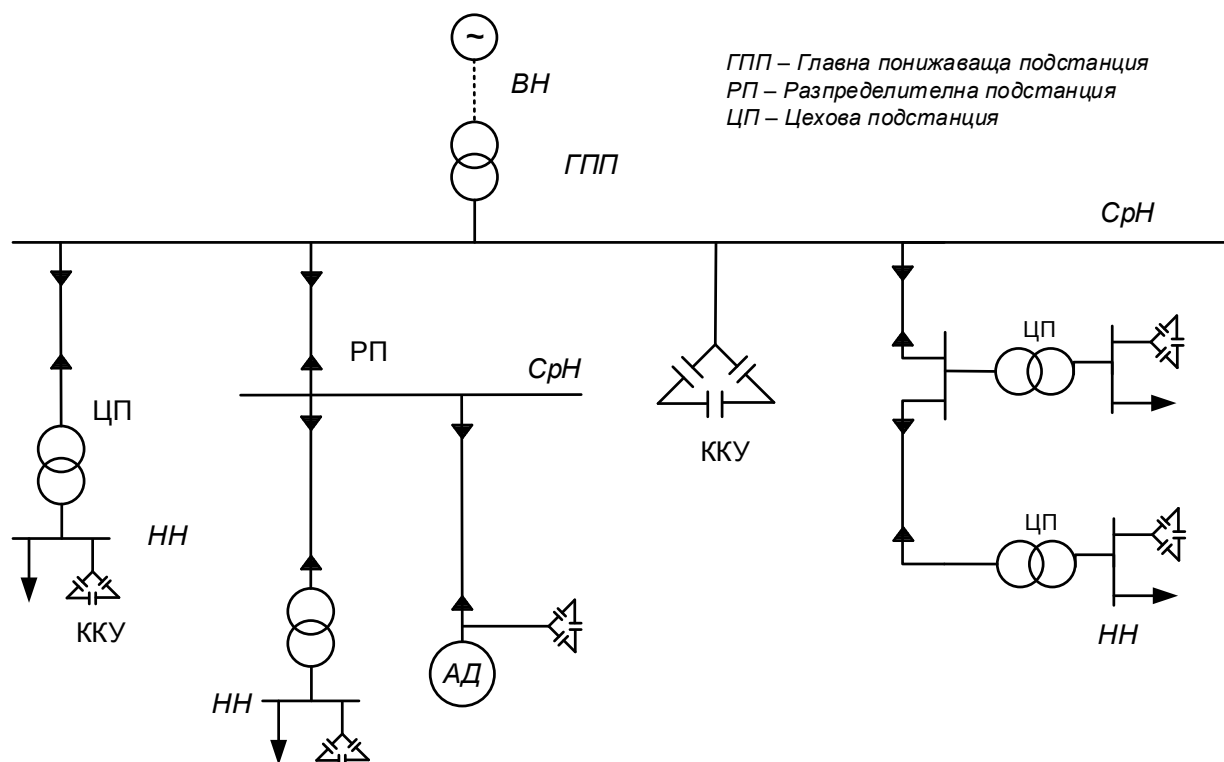
Snezhana Dimitrova

Abstract: This paper reviews the capital expenses for building complete capacitor bank systems. Price data is from leading manufacturers. Considering all of the capacitor banks components, a study for the dependence between the capital costs required for the construction and the capacitor units power has been made. The results from this study can be used when designing a power supply system in order to optimize the distribution of capacitive power.

Keywords: capacitor banks, capacitor units, capital expenses

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електроснабдителните системи на средните и големите предприятия имат товари на средно и ниско напрежение. Това определя използването на двуйерархична схема на електроснабдителната система (ЕСС), която включва главна разпределителна (понижаваща) подстанция, радиални и магистрални линии, разпределителни подстанции, цехови подстанции и разпределителни мрежи ниско напрежение - фиг.1.



Фиг.1. Принципна схема на електроснабдителна система

Нуждата и ползите от компенсирането на реактивните товари са добре известни на специалистите. При подобни ЕСС изследванията показват [1,2,3], че е целесъобразно компенсирането на реактивния товар да се осъществява с кондензаторни уредби за средно и/или ниско напрежение (фиг.1). В зависимост от местоположението на монтираните комплектни кондензаторни уредби (ККУ) в електроснабдителната система, компенсирането на реактивните товари може да се класифицира като: централизирано, местно и индивидуално (фиг.1). Всеки от изброените начини има своите предимства и недостатъците.

В етапа на проектиране, за оценка на стойността на проектните решения и при оптималното разпределение на необходимата компенсираща реактивна мощност е нужно да се познава зависимостта на капиталовите разходи от мощността на кондензаторните батерии за изграждането на комплектната кондензаторна уредба. Целта е да се определи тази зависимост при актуалните пазарни стойности на комплектните кондензаторните уредби за средно и ниско напрежение.

2. ВИДОВЕ КОМПЛЕКТНИ КОНДЕНЗАТОРНИ УРЕДБИ

При изчислението на необходимата кондензаторна мощност и тип на уредбата, се вземат в предвид напрежението на мрежата, колко бързо променлив е товарът, наличието на хармоници. В статията са проучени водещи фирми производители и дистрибутори, които предлагат комплектни кондензаторни уредби съобразени с изискванията на дадената електроснабдителна система/ мрежа [4,5,6,7,8,9]. Въз основа на това може да се направи класификация на комплектните кондензаторни уредби (ККУ) - фиг.2. Комплектните кондензаторни уредби

могат да се класифицират по различни критерии като: мястото им на присъединяване към електроснабдителната система на промишлено предприятие; според характера на товара (наличието на нелинейни товари), който налагат вземането на допълнителни мерки за защита на кондензаторните батерии; вида на монтажа; начина на охлаждане; начина на комутация.



Фиг.2. Класификация на комплектни кондензаторни уредби

Производителите на кондензаторни уредби предлагат няколко начина за компенсиране на реактивните товари. Това са комплектни кондензаторни уредби, които са съобразени с нуждите/особеностите/ на дадения обект. За комперсиране на реактивните товари в зависимост от мястото на поставяне на кондензаторните уредби (индивидуално, групово, централно компенсиране) според отношението $\frac{Q_c}{S_n}$, къ-

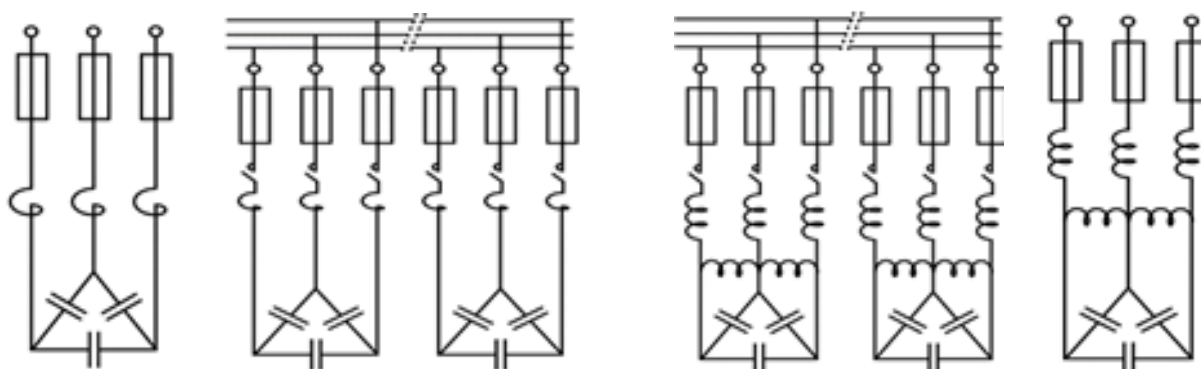
дето Q_c е мощността на кондензаторната уредба, а S_n е мощността на трансформатор. Някои товари (токоизправители, UPS-си, дъгови пещи и др.) „замърсяват“ електрическата мрежа с хармоници. За да се предпазят кондензаторите от претоварване е необходимо да се определи отношението $\frac{G_h}{S_n}$, където G_h е мощността на генератора на хармоничното замърсяване, а S_n е пълната мощност на трансформатора.

Според тези отношения или в зависимост от стойността на коефициента несиносоидалност на тока ($THD_I, \%$), фирмите монтират реактори към кондензаторните батерии. На фиг.4 са дадени типични схеми за комплектуване на КБ с реактори.



Фиг.3. ККУ за външен и вътрешен монтаж [6]

В зависимост от нивото на хармониците в мрежата се монтират два типа реактори – токоограничаващи и противорезонансни. Реакторите оскъпяват кондензаторните уредби, но повредата на батерии е по-неизгодно от финансова и техническа гледна точка, затова не се препоръчва спестяване на този разход.



а) токоограничаващи (inrush)

б) противорезонансни (detuning)

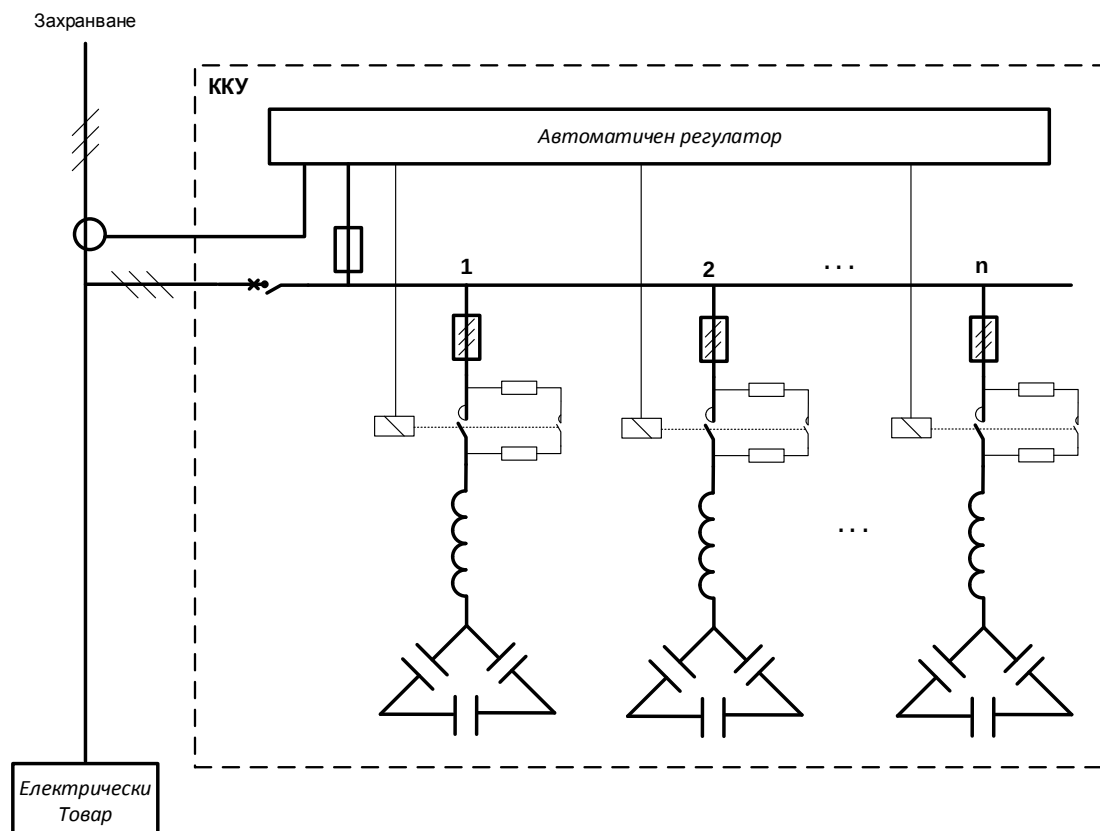
Фиг.4. Схеми на изпълнение на реакторите

При бързо променливи товари е възможно да се монтират ККУ с електронна комутация между различните степени на реактивна мощност, с което се елиминират преходните процеси при включване и изключване на кондензатори.

3.ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КАПИТАЛОВИТЕ РАЗХОДИ

При определяне капиталовите разходи за изграждането на комплектните кондензаторни уредби (ККУ) е необходимо да се знаят елементите на уредбата.

Основните съставни елементи на кондензаторните уредби са (фиг.5): кондензаторни батерии, метални шкафове, защитна и комутационна апаратура, измервателна апаратура и регулатор, монтажни проводници и шини, реактори.



Фиг.5. Типова еднолинейна схема на ККУ

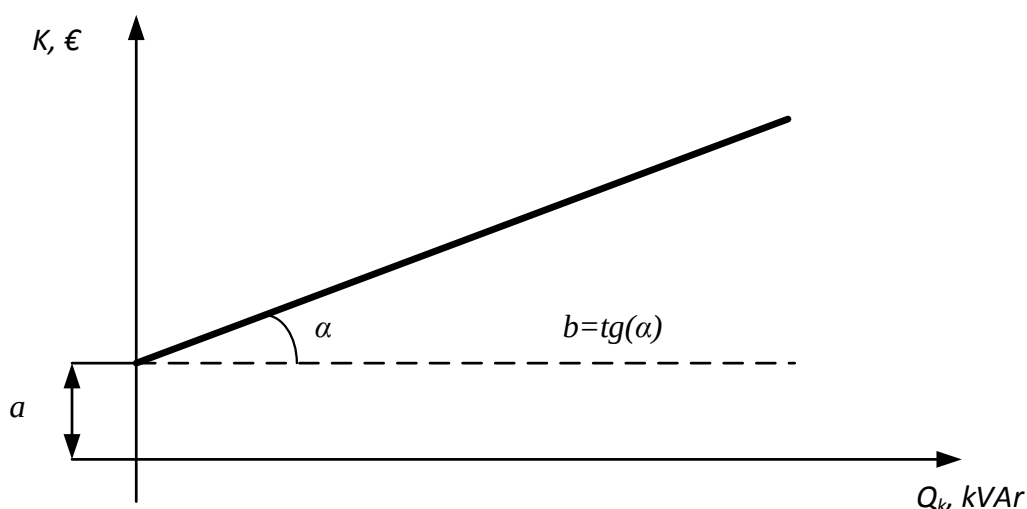
От предварително направени изследвания се установява, че при дадена схема на свързване на кондензаторната уредба към подстанциите капиталовите разходи - K са линейна функция на мощността на кондензаторните батерии [1,2]

$$K = a + b \cdot Q_k, \text{ €} \quad (1.1)$$

където:

Q_k е мощността на кондензаторната батерия инсталирана в шкафа, kvar;

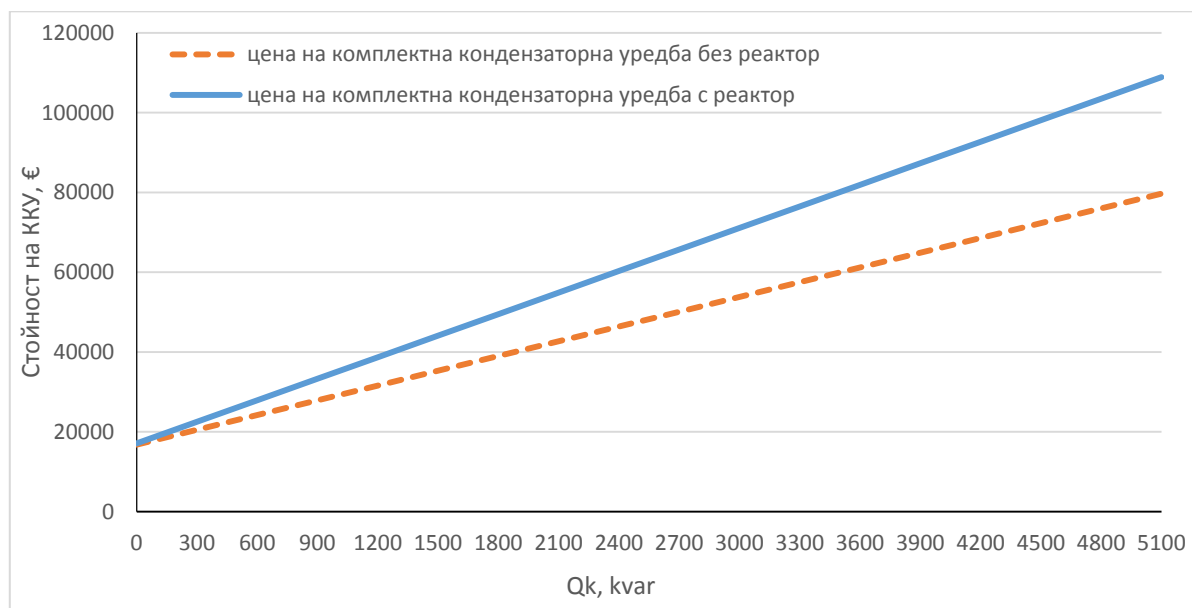
a , b – константи, които определят постоянната (независеща от Q_k) съставка – a , € и променливата (зависеща от Q_k) съставка - b на капиталните разходи, €/kvar.



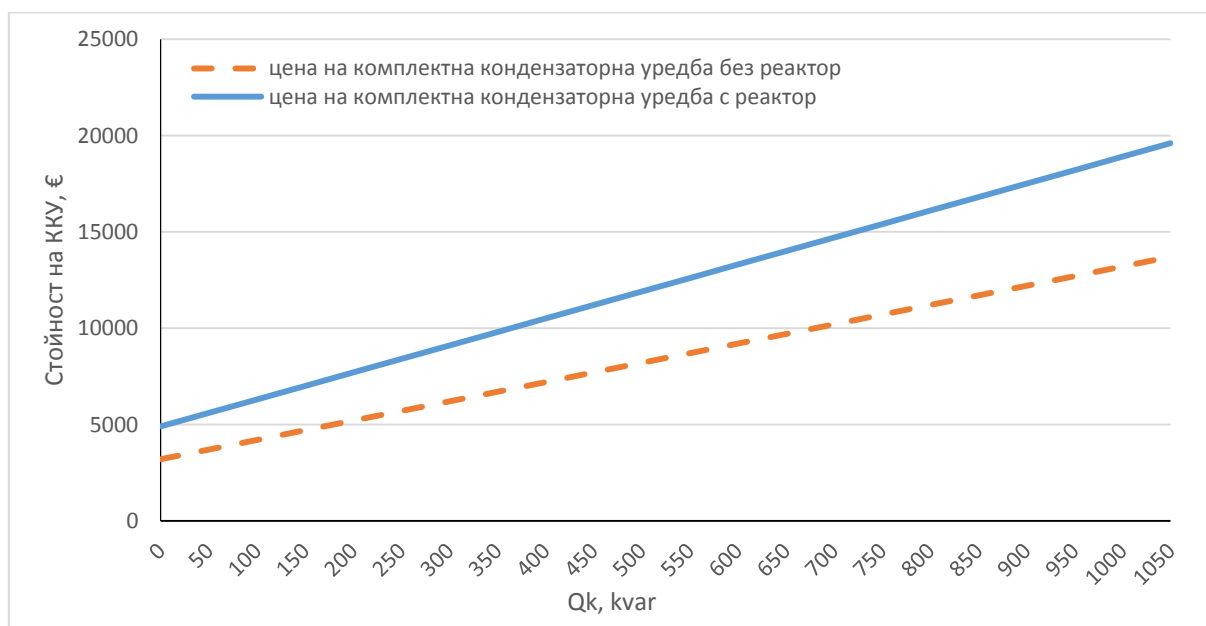
Фиг.6. Зависимост между капиталовите разходи за ККУ и мощността на КБ

Параметрите a и b се определят за конкретни схеми на свързване на КБ и различни напрежения (ниско и средно) и ще бъдат означават съответно a_n , a_v , b_n , b_v . За определяне на капиталовите разходи за изграждане на ККУ се използват данни от фирми производители [4,5,6,7,8,9].

От направеното проучване за цените на комплектните кондензаторни уредби за СН и НН, данните са обобщени в следните таблици според сегашните стойности. На фиг.7 и фиг.8 се виждат зависимостите по формула (1.1) за различни видове ККУ.



Фиг.7. Капиталовите разходи за изграждане на ККУ за СН



Фиг.8. Капиталовите разходи за изграждане на ККУ за НН

От използваните данни за построяването на зависимостта се получават следните стойности за a и b дадени в табл.1.

Таблица 1.
Стойности на коефициентите за функцията (1.1)

Коефициенти	НН		СН			
	400 V		6 kV		12 kV	
	с реактор	без реактор	с реактор	без реактор	с реактор	без реактор
a, €	4900	3200	7400	11 100	9300	13 900
b, €/kvar	14	10	40	18	50	22

4. ИЗВОДИ

В статията е представена функцията за определяне капиталовите разходи при изграждане на кондензатори уредби за компенсиране на реактивните товари в електроснабдителна система на стопански обекти. Изследвани са разходите за първоначално изграждане на кондензаторните уредби, в зависимост от изискванията и особеностите на дадения обект. Получените резултати могат да се използват от проектантите и инвеститори при остойностяване на инвестиционни проекти, като и от специалисти занимаващи се с оптимизация на режимите и схемите на електроснабдителните системи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Василев, Н. И., С. Т. Сидеров, *Електроснабдяване на промишлени предприятия*. С., Техника, 1991.
- [2] Willis H. Lee. *Power Distribution Planning Reference Book*. Marcel Dekker, 2004.
- [3] Short T. *Electric power distribution handbook*. CRC Press LLC. 2014.
- [4] www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/1501-varset/
- [5] www.schrack.bg/fileadmin/f/bg/1_Schrack_BG/Downloadcenter/presentations/Power_Compensation.pdf
- [6] <https://library.abb.com/share?q=reactive%20power%20compensation>
- [7] <https://www.kbr.de/en/products/components-for-reactive-current-compensation>
- [8] <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10164636>
- [9] <https://www.geenergyconsulting.com/practice-area/power-systems/reactive-power-adequacy>

Автор: Снежана Асенова Димитрова, ас. инж. докторант, катедра ЕСЕОЕТ, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: s.dimitrova@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Иван Ангелов

ЗАГУБИ В ЕЛЕКТРОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИТЕ МРЕЖИ С ПРИСЪЕДИНЕНИ ВЪЗОБНОВЯЕМИ ПРОИЗВОДИТЕЛИ

Бончо Димитров, Христо Попов, Рад Станев,
Никола Николов, Димо Стоилов

Резюме: В статията са разгледани въпросите за намаляване на загубите на енергия и за качеството на електроенергията в разпределителни мрежи с присъединени производители от възобновяеми източници.

Ключови думи: загуби на мощност и енергия, електроразпределителни мрежи, качество на електроенергията, възобновяеми производители.

LOSSES IN ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORKS WITH RENEWABLE PRODUCERS

Boncho Dimitrov, Hristo Popov, Rad Stanev,
Nikola Nikolov, Dimo Stoilov

Abstract: The article considers the issues of reducing energy losses and the electric power quality in distribution networks with connected producers from renewable sources.

Keywords: electric power and energy losses, electricity distribution networks, electric power quality, renewable producers.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В резултат на нарастващото потребление на електрическа енергия, изчерпването на изкопаемите горива и опасенията за състоянието на околната среда е от съществено значение да се обърне сериозно внимание на развитието на електропроизводството от възобновяеми източници - основно водни ресурси, вятър, слънчева енергия и биомаса. Тези технологии са вече усъвършенствани и широко използвани, поради достатъчната им наличност в природата на планетата.

Обикновено загубите на мощност и енергия в електроразпределителната мрежа са доста по-високи в сравнение с електропреносните мрежи. Това е така основно поради много по-голямата им териториална разпространеност и по-ниските напрежения на предаване. Една възможност за намаляване на тези загуби, т.е. за подобряване ефективността на мрежата е разположението на генериращи мощности в електроразпределителната мрежа. Освен за намаляване на загубите, правилното разпределение на генериращи мощности подобрява и профила на напрежение за мрежата. Обратно - неправилното разпределение/разположение

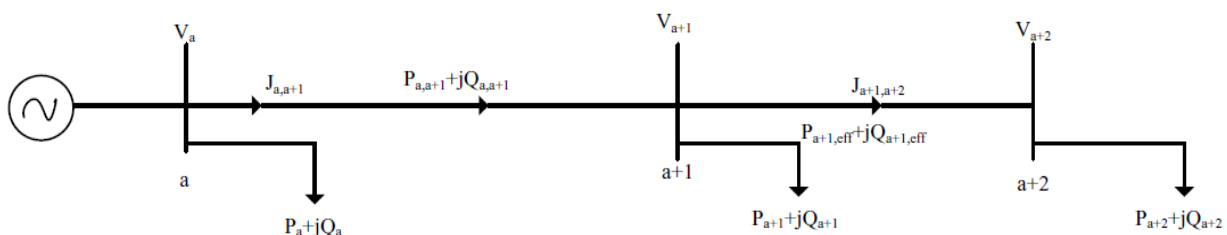
на производителите в разпределителната мрежа може да доведе до повишени загуби на мощност и енергия и до влошен профил на напреженията (недопустими отклонения в някои възли).

За решаване на задачата за оптималното разположение/разпределение на генериращи мощности в разпределителните мрежи с цел намаляване на загубите на мощност се използват различни методи: смесено целочислено линейно програмиране (MILP), динамично програмиране и подобрени аналитични методи (IA). Те са приложими в зависимост от определени предположения относно свойствата на целевата функция и ограниченията като непрекъснатост, диференцируемост и изпъкналост. Засега най-лесно решими са линейните оптимизационни модели. Задачата за определяне на оптималната мощност и място на присъединяване в разпределителната мрежа в действителност е дискретна и нелинейна. Затова методите за решаване на изпъкнали оптимизационни модели са трудно приложими и неефективни за получаване на решението на тази задача. Следователно е необходимо да се подберат и използват алгоритми за решаване на дискретни комбинаторни оптимизационни задачи, например евристични [1], генетични или съчетани евристично-генетични алгоритми [2], които да приемат загубите на мощност и енергия като основа на целевата функция. За съжаление времето за получаване (сходимост) на решението и необходимата оперативна памет при приложение на тези методи са значителни [3].

2. ПОДХОД НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Един от методите за оптимално разположение на генериращите мощности се основава на поведението на „кукувицата“ [4]. Прилаган е с основна цел за оптимално присъединяване на вятърни генератори, което да доведе до намаляване на загубите на активна мощност в електроразпределителната мрежа. Резултатите от приложението на метода към конкретна мрежа се сравняват с тези получени от други методи – така се извършва проверка.

Примерна магистрална схема на електроразпределителна мрежа е показана на фиг.1 - показани са потоците на мощност. Останалите режимни параметри на мрежата (напреженията във възлите $U_a, U_{a+1}, \dots$, токовете във възлите $I_a, I_{a+1}, \dots$, токовете в участъците $J_a, J_{a+1}, \dots$, и загубата на мощност P_{loss} – по участъци и общо) се изчисляват чрез пряк подход на разпределение на протичащия поток и се дават съответно чрез уравнения (1), (2), (3) и (4).



Фиг.1. Магистрална схема на електроразпределителна мрежа [4].

$$I_a = \left(\frac{P_a + jQ_a}{U_n} \right), A \quad (1)$$

$$I_{a,a+1} = I_{a+1} + I_{a+1,a+2}, A \quad (2)$$

$$V_{a+1} = V_a - I_{a,a+1}(R_{a,a+1} + jX_{a,a+1}), V \quad (3)$$

$$P_{loss,(a,a+1)} = \left(\frac{P_{a,a+1}^2 + Q_{a,a+1}^2}{|U_n|^2} \right) R_{a,a+1}, MW \quad (4)$$

Общата загуба на мощност се дава чрез израза:

$$P_{Totalloss} = \sum_{a=1}^n P_{loss,(a,a+1)}, MW \quad (5)$$

Целева функция при приложения подход е да се минимизират загубите на енергия в електроразпределителната мрежа чрез оптимално разпределение на генериращите мощности в мрежата :

$$\text{ЦФ} = \min(P_{Totalloss}), \quad (6)$$

При тази минимизация следва да са удовлетворени съответните ограничения във връзка с нормалната експлоатация на електроразпределителната мрежа, ограниченията по баланс на активните и реактивните мощности (уравнения 7 и 8) и ограничението за доустими напрежения във възлите (уравнение 9).

$$\sum_{a=2}^n P_{G,a} \leq \sum_{a=2}^n P_a + \sum_{a=1}^n P_{loss\ a,a+1} \quad (7)$$

$$\sum_{a=2}^n Q_{G,a} \leq \sum_{a=2}^n Q_a + \sum_{a=1}^n Q_{loss\ a,a+1} \quad (8)$$

$$U_{a,min} \leq |U_a| \leq U_{a,max} \quad (9)$$

Мощността, генерирана от разпределени източници (ние разглеждаме като пример ветрогенератори) зависи от вида и ресурсните данни на терена, като например скоростта и посоката на вятъра, метеорологични условия, надморска височина и др. Разбира се зависи и от конструкцията на използваната вятърна турбина. Моментната произвеждана електрическа мощност на вятърна турбина се определя чрез изразите (10).

$$P_w = \begin{cases} 0 & V_w < V_{cin} \text{ или } V_w > V_{cout} \\ P_{rated} \frac{V_w - V_{cin}}{V_N - V_{cin}} & V_{cin} \leq V_w \leq V_N \\ P_{rated} & V_N \leq V_w \leq V_{cout} \end{cases} \quad (10)$$

където, V_{cin} , V_{cout} и V_N са съответно скоростите на вятъра, при които турбината се включва (cut in), изключва (cut out) и номинална (nominal, rated) , а P_{rated} е номиналната мощност на вятърната турбина и може да се определи от уравнение (11) [5].

$$P_{rated} = 0.5 \rho A V_N^3 C_p, W \quad (11)$$

Недостатъците при използване на изкопаемите горива за целите на електропроизводството са принудили изследователите да търсят и усъвършенстват технологиите на новите източници.

Поради възобновяемия енергиен ресурс и силно усъвършенстваната и евтина технология, вятърната енергетика напоследък показва много бързо развитие в целия свят. Към нея е насочен интересът както на частни инвеститори, така и на правителствата на развитите страни, например Германия, Дания и много други [6].

Интегрирането на вятърната енергия в електроенергийните системи създава много нови предизвикателства пред, които са изправени операторите на електропредавателните и електроразпределителните мрежи. Както конвенционалните електроцентрали, така и ВЯЕЦ трябва да осигуряват необходимото качество на електроенергията, за да гарантират устойчивата и надеждна работа на електроенергийната система, където са присъединени. В разглежданата от нас постановка те трябва да не смущават работата на потребителите, присъединени към разпределителната мрежа.

Може да бъдат разгледани множество оперативни аспекти, които се отнасят до работата на вятърни електроцентрали. Тук се фокусираме върху качеството на електроенергията, която тези централи произвеждат. Това качество се определя от изкривяването на синусоидалната форма на сигнала, отклонението и колебанието на неговата честота и големината на ефективната стойност на напрежението. На качеството на електроенергията напоследък се обръща сериозно внимание, тъй като потреблението на електроенергия от устройства с нелинейни характеристики и неравномерно във времето натоварване се увеличава. Това води до силни изкривявания на токове и неравномерно натоварване на фазите.

Един от основните показатели за качество на електроенергията - изкривяването на синусоидалната форма на сигнала на напрежението и тока, се определя от количественото и качествено съдържание на хармоници. Стандартите за качество на електроенергията определят максимално допустимата граница на изкривяване на напрежението и тока при електрозахранване на потребители. Например стандарт IEEE 519-1992 и серия от стандарти IEC 61000, както и много насоки и препоръки свързани с тях, са определящи в това отношение. Индексите Total Harmonic Distortion (THD) и Total Demand Distortion (TDD) са използвани съответно за оценка на съдържанието на хармоници на напрежението и тока.

Нивото на тези и други индекси взети като общност определя качеството на услугата по електроснабдяване на потребителите, предоставяна от електроенергийната система.

Прилагат се няколко индекса за хармоничен анализ, като най-често използваните са общото хармонично изкривяване, съответно за напрежението (THD_V) и тока (THD_I) и общото хармонично изкривяване на натоварването (TDD). Математически формулировки за (THD) и за (TDD) са дадени съответно с уравнения (12), (13) и (14).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}, \quad (12)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}, \quad (13)$$

където V_1 и I_1 са ефективните стойности на първия хармоник, а V_h и I_h ефективните стойности на h -тия хармоник.

Общото хармонично изкривяване на натоварването (TDD) се определя от съотношението на ефективната стойността на сумата от отделните хармонични амплитуди спрямо максималния или номиналния ток на натоварване на потреблението I_L , както е показано в следния израз:

$$TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (14)$$

В стандарта IEEE-519 са дадени ограничения за нивото на допустимите хармоници на напрежението (табл.1) и допустимите хармоници на натоварването/тока (табл.2).

Таблица 1.

Допустими стойности на хармоничното изкривяване на напрежението (THD).

Допустимите стойности на хармонично изкривяване		
Ниво на напрежението	Изкривяване в индивидуален клон (THD)	Общо изкривяване на напрежението (THD)
До 70 kV	3 %	5 %
От 70 до 160 kV	1,5 %	2,5 %
Над 160 kV	1 %	1,5 %

Таблица 2.

Допустими стойности на хармониците на натоварване/ток (TDD).

Допустими стойности на хармонично изкривяване на натоварването/тока в мрежи от 120 V до 70 kV						
Хармоник с най-голяма стойност на тока I_L и максимална стойност на тока на к.с. I_{SC}						
	Индивидуални хармоници h					
I_{SC}/I_L	<11	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	TDD
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5 %
$20 < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8 %
$50 < 100$	10	4.5	4	1.5	0.7	12 %
$100 < 1000$	12	5.5	5	2	1	15 %
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20 %

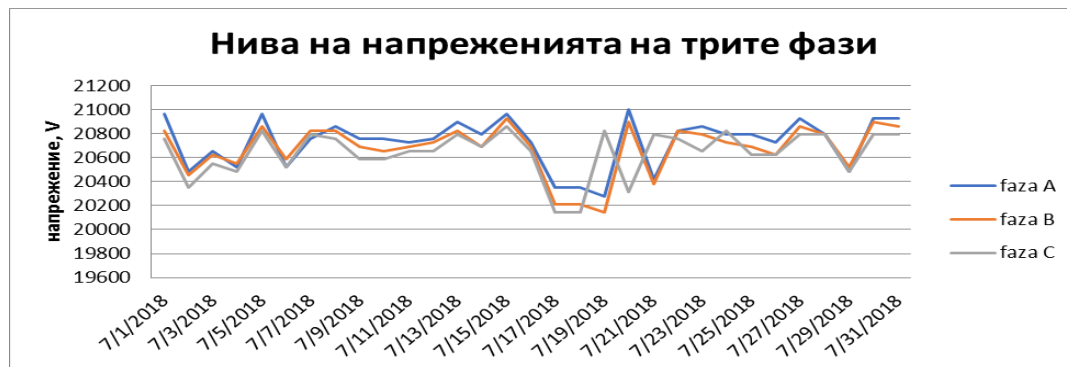
Пример за оценка на загубите на мощност и качеството на енергията в електропровод с присъединени вятърни генератори

Вятърният парк „Вега“ се намира в североизточната част на България и е непосредствена близост до крайбрежната ивица на Черно море. Инсталирана мощност на парка е общо 10 MW. Вятърните турбини са с асинхронен генератор с накъсо съединен ротор. Всеки генератор на вятърна турбина има собствен трансформатор 0.69/20kV в схема звезда-триъгълник. Неутралната точка на трансформатора е заземена, за да се намали третия хармоник на напрежението.

Тези генератори са свързани към разпределителна уредба 20 kV и чрез собствен електропровод „Вега“ 20 kV са присъединени към подстанция Каварна 20/110 kV. Чрез подстанцията електрическата мощност, генерирана от вятъра, се въвежда в електропредавателната мрежа при напрежение от 110 kV и 50 Hz.

За целите на изследването са използвани регистрирани измервания на напрежението и активната мощност от контролните електромери в подстанцията и търговските електромери на производителя (ВяЕЦ Вега).

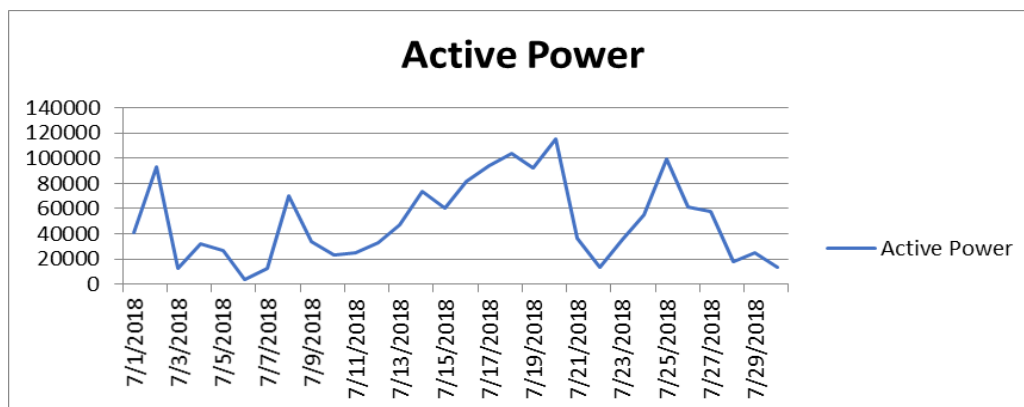
Тези величини са регистрирани за всеки час в период от един месец (07.2018). Формата и нивата на напреженията на трите фази, измерени чрез измервателната група, когато всички вятърни турбини работят, са показани на фиг.2.



Фиг.2. Нива на напреженията на трите фази

Измерването на напрежението се извършва на извода средно напрежение в подстанцията 20/110 kV с помощта на еднофазни измервателни трансформатори. През периода на измерване наблюдаваното изменение на напрежението на страна 20 kV не превишава границата на допустимото отклонение съгласно стандарта (IEEE Standard 519-1992, 1992). Както се вижда на фиг.2, макар и с леки пулсации големината на напрежението е почти постоянна - около 20,6 kV.

Реализираният производствен график на активната мощност на вятърния парк при работещи всички турбини е показан на фиг.3. Турбините са идентични и може да се предположи, че работят с един и същ въртящ момент на вала. Параметрите на мощността са измерени и регистрирани от търговския електромер на вятърния парк.



Фиг.3. Генерирана активна мощност от вятърния парк

Резултатите от измерването показват, че генерираната активна електроенергия е между 4000 и 120 000 kWh/ден. Промените в скоростта на вятъра водят до колебания на активната и реактивна мощност на вятърната турбина. Активната мощност на изхода на генератора зависи от скоростта на вятъра и от ефективността на системата за преобразуване на механичната в електрическа енергия (gear box). Реактивната мощност зависи от системите за компенсация, като за минимизиране на загубите следва да се цели предаване на минимална реактивна мощност през разпределителната мрежа.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията са разгледани въпросите за намаляване на загубите на енергия в присъединяващата разпределителна мрежа и за качеството на електроенергията, произведена от вятърните електроцентрали. Показан е математически модел, чрез който може да се направят сравнения и избор на подходящ възел за присъединяване на нови производствени мощности. Напрежението и активната мощност за съществуващ вятърен парк и разпределителен електропровод са анализирани и оценени въз основа на стандарта IEEE 519-1992. За конкретния пример отклоненията на напреженията са допустими. Когато денонощните абсолютни изменения на напреженията са високи, те може да причинят някои проблеми за потребителите. Авторският колектив ще продължи изследванията си в представените области.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Borghetti, Alberto. "A mixed-integer linear programming approach for the computation of the minimum-losses radial configuration of electrical distribution networks." *Power Systems, IEEE Transactions on* 27.3 (2012): 1264-1273.
- [2] López-Lezama, Jesús María, Javier Contreras, and Antonio Padilha-Feltrin. "Location and contract pricing of distributed generation using a genetic algorithm." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 36.1 (2012): 117-126.
- [3] Wang, Caisheng, and M. Hashem Nehrir. "Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems." *Power Systems, IEEE Transactions on* 19.4 (2004): 2068-2076.

- [4] Sureshkumar Sudabattula, Kowsalya M. "Optimal allocation of wind based distributed generators in distribution system using Cuckoo Search Algorithm." *Procedia Computer Science*, 92 (2016): 298-304.
- [5] Gilbert Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Wiley-IEEE Press, 2004.
- [6] Siegfried Heier, *Nutzung der Windenergie*, Fraunhofer IRB Verlag, 2012.

Автори: **Бончо Димитров**, инж. маг. докторант, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: bonchesto@abv.bg; **Христо Попов**, инж. маг. докторант, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: hristopopov66@yahoo.com; **Рад Станев**, доц. д-р, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: rstanev@tu-sofia.bg; **Никола Николов**, гл. ас. д-р, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: n_nikolov@tu-sofia.bg; **Димо Стоилов**, доц. д-р, катедра Електроенергетика, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail address: dstoilov@tu-sofia.bg.

Постъпила на 15.12.2018 г.

Рецензент: гл.ас. д-р Борислав Бойчев