



ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Том 60, книга 2, 2010 г. – Юбилеен
„65 години ТУ – София” и „60 год. Годишник”**

**Втора научна конференция
на Електротехническия факултет
Созопол, 1 – 3 октомври 2010 г.**



PROCEEDINGS OF THE TECHNICAL UNIVERSITY – SOFIA

**Volume 60, book 2, 2010 – Anniversary
“65 Years Technical University – Sofia” and “60 Years
Proceedings of the Technical University – Sofia”**

**Second Scientific Conference
of the Faculty of Electrical Engineering
Sozopol, October 1 – 3, 2010**

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

Главен редактор: проф. д-тн Ганчо Божилов

Членове: доц. д-р Васил Господинов
доц. д-р Петър Наков
доц. д-р Владимир Лазаров
проф. д-р Ангел Пачаманов
доц. д-р Георги Тодоров
гл. ас. Николай Матанов
гл. ас. Адриан Иванов
инж. Мая Петрунова

EDITOR'S BOARD

President: Prof. DSc Gantcho Bojilov

Members: Assoc. Prof. PhD Vasil Gospodinov
Assoc. Prof. PhD Petar Nakov
Assoc. Prof. PhD Vladimir Lazarov
Prof. PhD Angel Patchamanov
Assoc. Prof. PhD Georgi Todorov
Assist. Prof. Nikolaj Matanov
Assist. Prof. Adrian Ivanov
Eng. Maya Petrunova

С Ъ Д Ъ Р Ж А Н И Е

ОСВЕТЛЕНИЕ

1. Пачаманов, А., Ст. Петров. Енергийноефективни светлоразпределения от тип "Плосък лъч" за пътни тунели.....	9
2. Пачаманов, А., К. Костадинов, Ст. Петров. Светлодиоден осветител от тип "Плосък лъч" за пътни тунели	21
3. Василев, Н. Оптимизиране на светлоразпределението на осветителите за улично осветление	28
4. Кисьова, В. Сравнителен анализ на резултати от практически измервания на светлотехническите показатели за модел на работно помещение за ефективно използване на дневната светлина	35
5. Конов, Ц., Т. Кючуков. Развитие на рекламно-информационната светлинна среда	43
6. Басри, С., Р. Кючуков. WEB базирана система за енергийни одити на осветителни уредби	54
7. Петров, О., Р. Кючуков. Светлина в Университета – един поглед на светлинната среда в учебните зали	63
8. Матев, Д., В. Гюров, Р. Киров, С. Исак. Художествено и ефектно осветление на крепостната стена на Археологически резерват, гр. Хисаря	70
9. Хинов, Хр., Ст. Платиканов. Електронна пускорегулираща апаратура за натриеви лампи с високо налягане	79
10. Василев, Хр., Г. Ганчев, В. Георгиев. Охлаждане на светодиодиите с висока яркост и голяма мощност	84
11. Василев, Хр., Г. Ганчев, В. Георгиев, Ст. Стефанов, И. Цонев. Приложение на светодиодиите при осветление на бензиностанции	91
12. Велинов, Кр. Оценка на грешките при измерване на интензитета на светлината	100
13. Петринска, И., Х. Топфер. Оптимизация на консумацията на електрическа енергия за осветление в обществени сгради посредством генетичен алгоритъм	110
14. Иванов, З., И. Димитров. Разработване на осветител със светодиоди за пешеходни пътеки	121

15. Василев, Хр., В. Георгиев, И. Драганова, Ст. Спирова, П. Русев. Улична осветителна уредба с асиметрично излъчване по посока на движението	131
16. Василев, Хр., В. Георгиев, И. Драганова. Улична осветителна уредба с несиметрично излъчване срещу посоката на движение	137
17. Стефанов, Ст., Хр. Василев. Минимизиране на светлинния поток на улични осветители при нормиране по осветеност	144
18. Стефанов, Ст., Н. Бърдарски, Хр. Василев. Оптимизиране на светлоразпределението на осветители за пешеходни зони	153

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПРОЦЕСИ И РЕЖИМИ

19. Матов, П., И. Долапчиев. Приложения на мощни стабилизатори на ток и напрежение в лабораторията и практиката	161
20. Матов, П., Г. Георгиев. Импеданси на контактни мрежи при многопътни участъци	167
21. Стайков, Ст., И. Долапчиев. Взаимодействие на плосък спираловиден вихровотоков преобразувател с неферо-магнитна среда	177
22. Стайков, Ст., И. Долапчиев. Ходографи на плосък спираловиден вихровотоков преобразувател	182
23. Щерев, Г., П. Манчев. Измерване на частични разряди с PDS100 при изследване на силови трансформатори	189
24. Ангелов, И. Хардуерна реализация на импедансно реле за тягови мрежи 25kV	193
25. Ангелов, И. Алгоритъм на работа на импедансно реле за тягови мрежи 25kV	199
26. Соколов, Е. Аксиално поле на разсейване в крайната област на хидрогенератор	204
27. Ризов, П., Д. Сотиров, Ст. Баташки, Р. Спасов. Изследване на влиянието на р.т.к. върху магнитното поле в роторните полюси на синхронни хидрогенератори с МКЕ	216
28. Ризов, П., Д. Сотиров, Ст. Баташки, Р. Спасов. Изследване на хармоничния състав на е.д.н. в асинхронни генератори посредством МКЕ	225
29. Сотиров, Д., М. Михов, Р. Спасов. Числено определяне на температурата на лагерите на синхронен ветрогенератор	235
30. Михов, М., Д. Сотиров. Числено определяне на	

температурата на котвената намотка на синхронен ветрогенератор	245
31. Сотиров, Д., П. Ризов, Н. Стаматов. Числено определяне на механичните натоварвания на конструкцията на вертикален синхронен хидрогенератор	257
32. Сотиров, Д., Ст. Баташки, Д. Станев. Числено изследване на аксиалната съставка на полето на разсейване в зоната на крайните пакети на статорния магнитопровод на синхронни хидрогенератори	270
33. Панайотов, И., Д. Сотиров. Приложение на продукт ANSYS за решаване на задачи с МКЕ и приложението им в областта на въртящи се електрически машини	283
34. Сотиров, Д., И. Панайотов. Изследване на съдържанието на висши хармоници в кривата на е.д.н. на явнополусен синхронен генератор с ANSYS и решаване на смесена задача с ел. вериги и МКЕ	291
35. Костадинов, П., Ж. Даскалов, Ст. Гунински, К. Тодорова. Съвременни средства за търговско измерване на количества електрическа енергия в преносните и разпределителните мрежи високо и средно напрежение	299
36. Даскалов, Ж., Ст. Гунински, К. Тодорова. Обобщен израз на функцията на реакция на средата при вихровотоков контрол на плоски феромагнитни многослойни обекти.....	308
37. Гунински, Ст., В. Иванов, К. Тодорова. Изходен сигнал на трансформаторен електромагнитен преобразувател с отместени правоъгълни намотки при наличие на движение ...	317
38. Иванов, В., Ст. Гунински, К. Тодорова. Влияние на посоката на относителната скорост върху изходния сигнал на диференциален електромагнитен преобразувател с правоъгълни намотки	327
39. Рац, Е., Р. Рац, А. Петров. Електрозадвижване за транспортно средство със синхронен двигател с ориентация по статорното потокосцепление	335
40. Рац, Е., Р. Рац, А. Петров. Изследване на електромобил с автономно електрозахранване	342
41. Божилов Г., А. Иванов, М. Михов, Д. Пенев, Разделяне на механичните и вентилационните загуби на еднофазни колекторни двигатели за ръчни електроинструменти	351
42. Костов, И., Н. Серафимов, Особености при приложението на магниточувствителни елементи на базата на планарни диоди..	357

C O N T E N T S

1. Pachamanov, A. and St. Petrov. Energy efficient light distributions of “flat beam” luminaries for road tunnels	9
2. Pachamanov, A., K. Kostadinov and St. Petrov. “Flat beam” leds luminaries for road tunnels	21
3. Vassilev, N. Optimization of light distribution curves of luminaires for street lighting	28
4. Kisiova, V. Outcome by the practical measurement of the light-technical indicators at a working place with light control and conventional sun-protective blinds	35
5. Konov, C. and T. Kyuchukov. Development of the information lighting environment in the contemporary urban areas	43
6. Basri, S. and R. Kyuchukov. WEB based system for energy audits of lighting systems	54
7. Petrov, O. and R. Kyuchukov. Light in university – one view on lighting environment in educational halls	63
8. Matev, D., V. Gyurov, R. Kirov and S. Isaac. Architectural and artistic lighting of the fortress walls of the Archaeological Reserve, Hisar	70
9. Hinov, H. and St. Platikanov. Electronic ballast equipment for high-pressure sodium lamps	79
10. Vasilev, H., V. Georgiev and G. Ganchev. Cooling of high power leds	84
11. Vasilev, H., G. Ganchev, V. Georgiev, St. Stefanov and I. Tzonev. Application of led in gas station illumination	91
12. Velinov, K., Assessment of the errors in the measurement of light intensity	100
13. Petrinska, I. and H. Toepfer. Optimizing lighting energy savings in public buildings through genetic algorithm	110
14. Ivanov, Z. and I. Dimitrov. Development of luminaires with led's for walkway	121
15. Vasilev, H., V. Georgiev, I. Draganova, St. Spirova and P. Rusev. Road lighting system with asymmetric emission pointed towards the direction of traffic movement	131
16. Vasilev, H., V. Georgiev and I. Draganova. Road lighting system with asymmetric emission pointed against the direction of traffic movement	137

17. Stefanov, St. and H. Vasilev. Minimizing the lighting flux of luminaries for street lighting systems estimated by illuminance ... 144
18. Stefanov, St., N. Bardarski and H. Vasilev. Optimizing the lighting distribution of luminaire for pedestrian areas 153

INVESTIGATION AND ANALYSIS OF THE PROCESSES AND REGIMES

19. Matov, P. and I. Dolapchiev. Practical and laboratory applications of power current and voltage stabilizers 161
20. Matov, P. and G. Georgiev. Impedances of overhead contact lines in multitrack zones 167
21. Staykov, S. and I. Dolapchiev. Study on the interaction of flat spiral eddy current testing probe and nonferromagnetic medium ... 177
22. Staykov, S. and I. Dolapchiev. Impedance plane diagram of a flat spiral eddy current testing probe 182
23. Shterev, G. and P. Manchev. Measurement of partial discharges with PDS100 in investigation of power transformers 189
24. Angelov, I. Hardware implementation of impedance relay for traction networks 25kv 193
25. Angelov, I. Algorithm of work of the impedance relay for traction networks 25kv 199
26. Sokolov, E. Axial leakage field in the end – region of a hydrogenerator 204
27. Rizov, P., D. Sotirov, St. Batashki and R. Spasov. Research of the influence of the stator current reaction over the magnetic field in the rotor poles of synchronic hydro generators with FEM 216
28. Rizov, P., D. Sotirov, St. Batashki and R. Spasov. Research of the harmonious composition of induced voltage in asynchronous generators through FEM 225
29. Sotirov, D., M. Mihov and R. Spasov. Numerical determination of synchronous windgenerator`s bearing temperature 235
30. Mihov, M. and D. Sotirov. Numerical determination of armature winding of synchronous windgenerator`s temperature 245
31. Sotirov, D., P. Rizov and N. Stamatov. Numerical determination of the mechanical loads of the construction of a vertical synchronous hydro generator 257
32. Sotirov, D., St. Batashki and D. Stanev. Numerical analysis of the axial component field of diffraction in area of end packages on

magnetic stator of synchronous hydro generators	270
33. Panayotov, I. and D. Sotirov. Application of ANSYS software to solve problems with FEM and its application in field of rotating electrical machinery	283
34. Sotirov, D. and I. Panayotov. Studing of contents of higer harmonic in voltage shape with ANSYS software and solving a circuit-coupled FEM model	291
35. Kostadinov, P., J. Daskalov, St. Guninski and K. Todorova. Modern devices for measurement of the energy quantity in electrical transmission and distribution high and average voltage networks	299
36. Daskalov, J., St. Guninski and K. Todorova. A generalized analytical expression of the function of the response of the medium in eddy current testing of flat ferromagnetic multi-layer object	308
37. Guninski, St., V. Ivanov and K. Todorova. Output signal of transformer electromagnetic transducer with diagonal displaycmnt perpendicular windings at present of movement	317
38. Ivanov, V., St. Guninski and K. Todorova. Influence of direction of the relative speed on the output signal of differential electromagnetic transducer with rectangular coils	327
39. Ratz, E., R. Ratz and A. Petrov. stator flux vector control of permanent magnet synchronous motor for electrical vehicle	335
40. Ratz, E., R. Ratz and A. Petrov. Autonomously power supplied electrical vehicle investigation	342
41. Bojilov, G., A. Ivanov, M. Mihov, D. Penev, Dividing of the mechanical and ventilator losess of the single phase commutator motors for power tools	351
42. Kostov, I., N. Serafimov, Some features in application of the magneticsensitive sensors, based on the planar magneto – diodes	357

ЕНЕРГИЙНО ЕФЕКТИВНИ СВЕТОРАЗПРЕДЕЛЕНИЯ ОТ ТИП «ПЛОСЪК ЛЪЧ» ЗА ПЪТНИ ТУНЕЛИ

Ангел Пачаманов, Стоян Петров

Резюме. В статията са разгледани оптимизирани светлоразпределения на осветители от тип «плосък лъч», получени с математичен модел, минимизиращ светлинния поток в изчислителното поле при спазване на нормените показатели за осветителната уредба. Чрез промяна на ограниченията на модела е анализирано влиянието на типа оптична система върху енергийната ефективност на осветителната уредба при два вида пътни настилки (без и с изкуствени просветлители на асфалтобетона).

ENERGY EFFICIENT LIGHT DISTRIBUTIONS OF “FLAT BEAM” LUMINARIES FOR ROAD TUNNELS

Angel Pachamanov, Stoyan Petrov

Abstract. This paper presents results of the mathematical modeling of the intensity distribution of a lighting fitting with the “flat beam” technology for road tunnels. The objective is to minimize the lighting fitting's luminous flux while at the same time achieving the qualitative and quantitative norms for the considered type of lighting installation.

1. Въведение

Насрещното осветяване на платното при пътни тунели осигурява по-енергоефективни уредби спрямо класическото симетрично осветление (фиг. 1), тъй като максимално се използват особеностите на насочено-дифузното отражение на потока от пътното покритие и се реализира отрицателен контраст между обект и фон. Централното разположение на осветителите по тавана е по-ефективно от страничното (фиг. 2), поради по-големия коефициент на използване на потока на светлинните източници (установен светлинен поток върху платното, отнесен към потока на светлинните източници). Независимо от това, при тунели с висок трафик, страничното разположение се предпочита заради възможността ремонтни работи по осветлението да се извършват без спиране на движението. Заради ограниченията по заслепяване, основният поток при класическите осветителни уредби се излъчва до ъгъл $\gamma=76^\circ$ (фиг. 3), т.е. до разстояние $4 \cdot H$ (H – монтажна височина на осветителя). Това е причината, чрез осветители, изработени по класическа технология да не се подобрява съществено ефективността на уредбата.

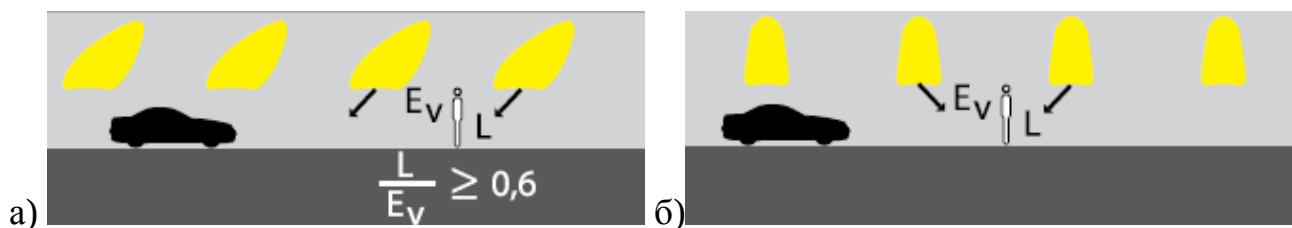
Нови възможности за повишаване на ефективността на тунелното осветление дава технологията «плосък лъч», при която осветителите се

Годишник на ТУ-София, т. 60, кн. 2, 2010

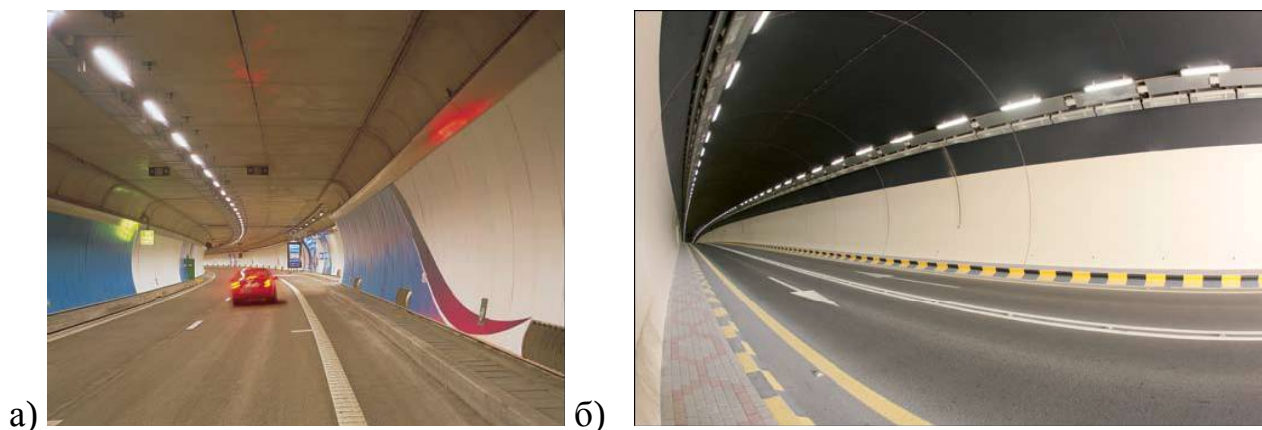
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 60, book 2, 2010

монтират странично на платното на височина $H=0,9-1,3$ м (фиг. 3) и са разположени под зрителната ос на водача (1,5 м). Така без опасност от заслепяване на водач на насрещно движещ се автомобил е възможно да се постигне излъчване на светлината до ъгъл $\gamma=88^\circ$ ($\text{tg}\gamma=28$). Тъй като ъгълът между падащия лъч и проекцията му върху платното е съизмерим с ъгъла на наблюдение на настилка ($\alpha=1^\circ$), огледалната компонента на отразения поток към наблюдателя е значителна и със значително по-малък светлинен поток се постига яркост на платното, съизмерима с тази при класическото насрещно осветление. Колкото по-концентрирано е излъчването на потока към платното, толкова по-близо до $28 \cdot H$ може да се стигне, съответно толкова по-ефективна е осветителната уредба.

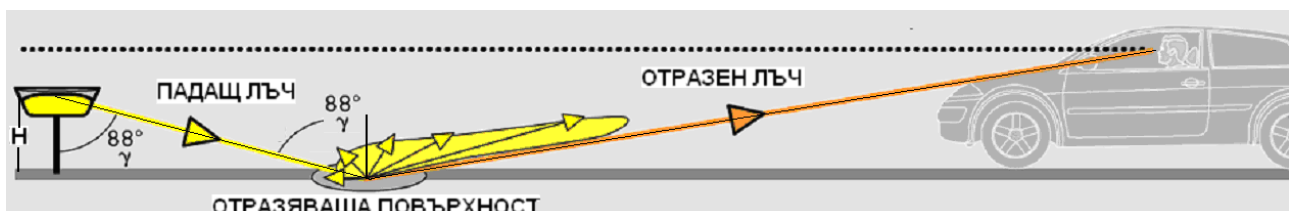
Технологията има и допълнително предимство - подобряват се условията за виждане на платното при задимен тунел, тъй като осветяването на платното е от ниско разположени осветители (фиг. 4).



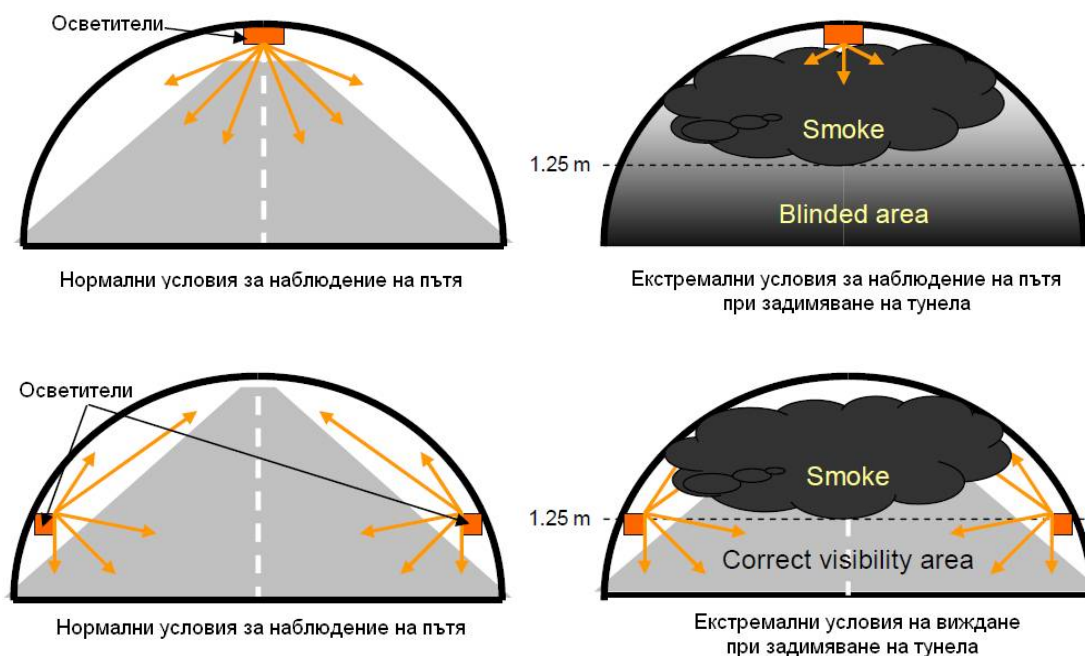
Фиг. 1. Насрещно (а) и симетрично (б) таванно осветление в пътен тунел. При (а) обектът е тъмен откъм водача, при което контрастът е негативен 00



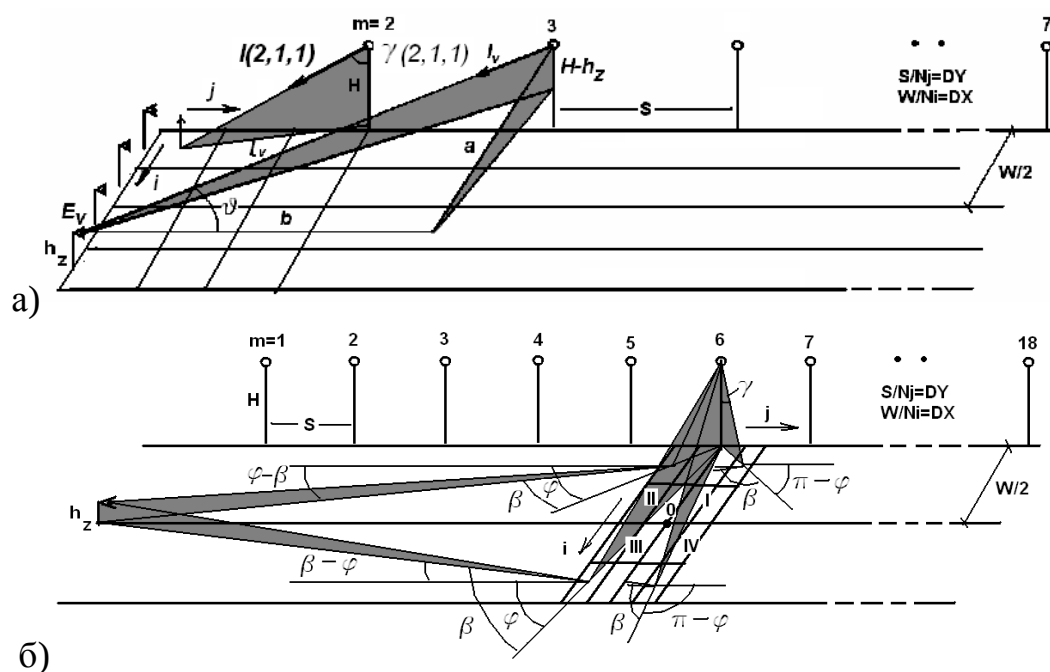
Фиг. 2. Централно и странично разположение на таванни осветители в пътен тунел 0



Фиг. 3. Индикатриса на отразения поток при технологията “плосък лъч” за осветяване на пътно платно 0



Фиг. 4. Допълнителни предимства на технологията “плосък лъч” при осветяване на пътен тунел с ниско разположени до платното осветители 0



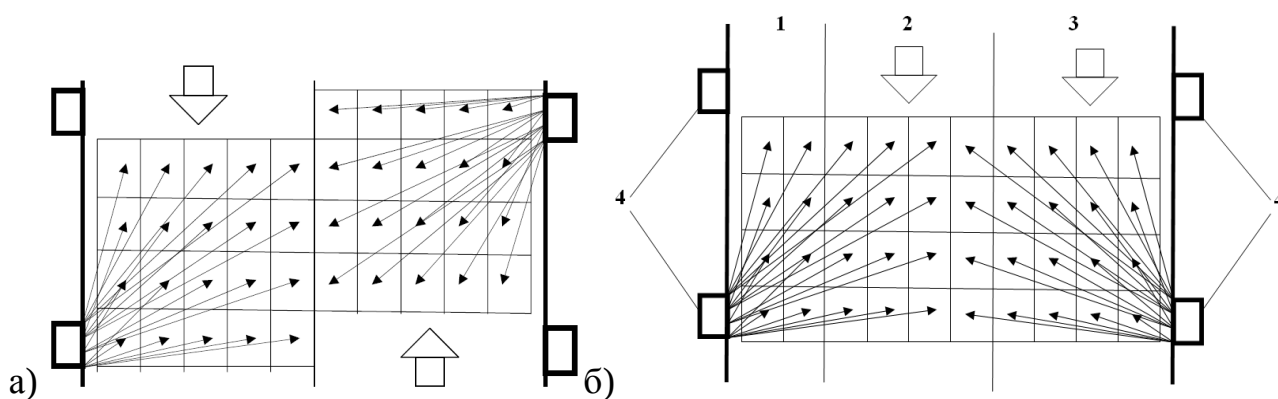
Фиг. 5. Постановки за изчисляване параметрите на математичния модел 0

2. Основна част

Теоретичните светлоразпределения на осветителите за пътни тунели са получени в резултат на решаване на оптимизационна задача, осигуряваща постигане на нормените показатели на осветителната уредба с минимален поток на светлинните източници 00. Постановките за изчисляване параметрите на разработените математични модели са показани на фиг. 5. Нормените показатели, на базата на които се проектира тунелно осветление са:

- средна яркост на платното: $L_{AV} = (1/n \sum^n (L_i)) > L_{NORM}$
- обща равномерност на яркостта: $U_0 = L_{MIN} / L_{AV} > U_{0\ NORM}$
- надлъжна равномерност на яркостта: $U_L = L_{MIN} / L_{MAX} > U_{L\ NORM}$
- показател на контраста на осветлението: $p = L_{AV} / E_{V01} > 0,6$
- показател на заслепяване на уредбата: $TI = 95 * L_{VOAL} / L_{AV}^{1,05} < 15$
- яркост на стените до 2 м над платното: $L_{WALL} = \rho \cdot E_{WALL} / \pi > L_{AV}$

Независимо от вида на тунела (с двупосочно или еднопосочно движение) светлоразпределението на осветителите се получава при условие, че всеки ред осветители осветява само прилежащото му платно (фиг. 6).



Фиг. 6. Насрещно осветление по системата “плосък лъч” при двупосочно и еднопосочно движение в тунел

Поради невъзможността отразеният поток от платното да осигури изцяло изискваната яркост на стените на височина до 2 m 0, осветителите за осветяване на платното трябва да излъчват светлинен поток и към стените (фиг.4). Така светлотехническата задача се решава двукратно – веднъж за пътното платно и втори път за стените, над нивото на осветителите. Втората част на задачата е по-лесно решима, поради което в настоящата статия се разглежда само получаване на оптимално светлоразпределение за осветяване на пътното платно. Последователността на работа е следната:

1. Изчислени са параметрите, описани в математичния модел при приетите геометрични, нормативни и технологични ограничения 0. В резултат се създава файл с данни file1.dat, който се ползва от file2.mod, описващ зависимостите между променливи и параметри на математичния модел по изискванията на езика AMPL (Applied Mathematical Programming Language) и софтуерния пакет CPLEX (optimization software package: simplex method+C programming language) 0;
2. Софтуерният пакет CPLEX генерира оптимално решение за търсеното светлоразпределение като набор от интензитети по елементарни участъци (при вариант без полиномно представяне на светлоразпределението за ъглите α и γ , заложен в file1.dat) или във вид на интензитети, описани с полином по степените на ъглите α и γ (при вариант с полиномно представяне на светлоразпределението);

3. Получените интензитети на светлината от всеки осветител до клетките на изчислителното поле (фиг.5), както и съответстващите им елементарни потоци са база за подходящо насочване на светодиодните модули (светодиод+оптична леща) на новопроектирания светодиоден осветител.

2.1. Изследване ефективността на оптимизирани светлоразпределения

В таблици 1 и 2 са показани обобщени резултати за оптимизирани светлоразпределения при три технологии за производство на осветители – с коефициент на усилване на потока $K_u=10$, съответстващ на класическа технология за производство на оптична система (с отражател); с $K_u=20$ – на технология, включваща отражател и рефрактор; с $K_u=30$ – за осветители, чиито светлоразпределения се реализират със светодиоди с оптични лещи (излъчването на потока е концентрирано в много малки пространствени ъгли). На фиг.7 резултатите от таблица 2 са представени графично.

Таблица 1. Необходим светлинен поток (lm) за постигане на яркост 100 cd/m^2 при поле $4,5 \times 8 \text{ m}$ за настилки тип R3 и R1, странично разположение на осветителите на височина 1.2 и 5.0 м и коефициенти на усилване $K_u=10, 20, 30$

Монтажна височина $H=1.2 \text{ m}$			Монтажна височина $H=5.0 \text{ m}$	
K_u	настилка R3	настилка R1	Настилка R3	настилка R1
10	18400	20200	25000	31000
20	9200	11000	14700	23100
30	6200	7300	10900	19100

Таблица 2. Показател на ефективност $(\text{lm/m}^2)/(\text{cd/m}^2)$ на светлоразпределения за страничен монтаж на осветителите и коефициенти на усилване $K_u=10, 20, 30$

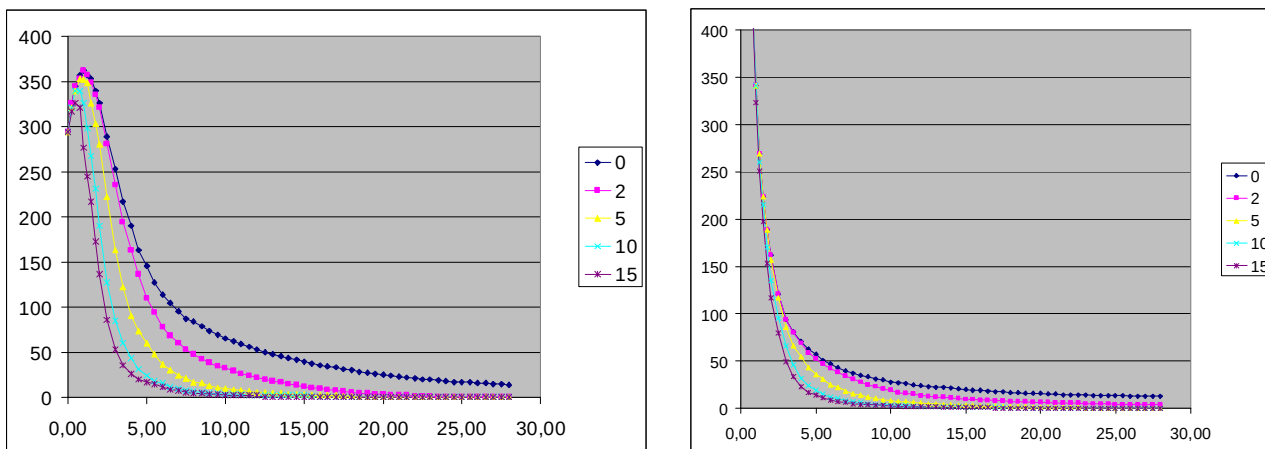
Монтажна височина $H=1.2 \text{ m}$			Монтажна височина $H=5.0 \text{ m}$	
K_u	настилка R3	настилка R1	Настилка R3	настилка R1
10	5,11	5,61	6,94	8,61
20	2,56	3,06	4,08	6,42
30	1,72	2,03	3,03	5,31

Често за различните зони на тунела се използват различни класове пътни настилки. Например, при симетрично излъчване на потока, поради високите изисквани нива на яркост за входната зона, в настилка от асфалтобетон се поставят изкуствени просветлители и тя от клас R3 се превръща в клас R1 (по-светла и почти дифузно отразяваща). Така високите нива на яркост се постигат с по-малка инсталирана мощност. Логично е оптималните светлоразпределения на осветителите за насречно осветление и в частност при технологията «плосък лъч» да се търсят за двата възможни вида пътни настилки.

По дефиниция яркостният фактор $q(\beta, \text{tg} \gamma) = L_{\text{НАСТ}}/E_{\text{ХОП}} \text{ [(cd/m}^2\text{)/lx]}$ представлява яркост на настилка при реализирана хоризонтална осветеност 1

коэффициент на усилване (k)	h=1.2, R3 (lm/m²)	h=1.2, R1 (lm/m²)	h=5.0, R3 (lm/m²)	h=5.0, R1 (lm/m²)
10	5.2	5.8	7.0	8.8
20	2.6	3.1	4.1	6.4
30	1.8	2.1	3.1	5.4

[illegible]



Фиг. 8. Редуцирани яркостни фактори $r(\beta, tg\gamma) = q(\beta, tg\gamma) \cdot \cos^3\gamma \cdot 10^4$ ($\beta=0,2,5,10,15^\circ$; $tg\gamma=0....28$) за пътни настилки клас RIII и RI при ъгъл на наблюдение $\alpha=1^\circ$

Получените резултати от изследването показват, че при насрещно осветление и в частност при технологията «Плосък лъч» «избелването» на настилка и превръщането ѝ от клас RIII в клас RI чрез използване на изкуствени просветлители не е оправдано, тъй като при почти дифузното отражение на потока от настилка клас RI предимствата на насрещното осветяване се губят. Затова по-долу изходна информация за конструиране на светодиодни осветители се дава само за настилки клас RIII.

2.2. Оптимални светлоразпределения от тип «плосък лъч» за пътен тунел, получени при отчитане на 4 поредни осветителя

Получените светлоразпределения са с полиномно представяне на търсените интензитети при настилка клас RIII, съгласно математичния модел от фиг. 5а. Светлотехническите и геометричните параметри на уредбата са:

Средна яркост на пътното платно, cd/m ²	$L_{AV}=15$
Надлъжна равномерност на яркостта	$U_L>0,6$
Обща равномерност на яркостта	$U_O>0,15$
Монтажна височина на осветителите, m	$H=1.2$
Ширина на изчислителното поле, m	$W=4.5$
Разстояние между осветителите, m	$S= 8$
Номер на последния осветител	$M_{last}= 5$
Номер на първия осветител	$M_{first}= 2$
Брой ивици на изчислителното поле	$N_i= 6$
Брой участъци в ивица	$N_j= 4$

Таблица 3. Интензитети в изчислително поле 4.5x8 м от осветители № 2, 3, 4, 5 за постигане на яркост 15 cd/m² при пътна настилка R3, ъгъл на наблюдение $\alpha=1^0$ и максимален коефициент на усилване на потока $K_y=30$ ($\Phi_{\text{сум}}=920,25 \text{ lm}$)

Интензитети от осветител №2				
i/j	1	2	3	4
1	1100	0	0	0
2	1673	0	662	1177
3	2252	533	0	1052
4	2909	1526	277	668
5	3698	2901	1805	0
6	4662	4643	4394	2775

Интензитети от осветител №3				
i/j	1	2	3	4
1	3016	2751	2390	1872
2	3685	3486	3174	2644
3	4137	3985	3718	3218
4	4421	4308	4099	3694
5	4580	4515	4391	4152
6	4662	4662	4662	4662

Продължение на таблица 3

Интензитети от осветител №4				
i/j	1	2	3	4
1	3603	3499	3371	3215
2	4045	3988	3914	3819
3	4354	4325	4287	4228
4	4548	4537	4516	4481
5	4645	4641	4632	4615
6	4662	4662	4662	4662

Интензитети от осветител №5				
i/j	1	2	3	4
1	3879	3823	3762	3688
2	4190	4163	4129	4092
3	4416	4405	4392	4376
4	4563	4562	4560	4555
5	4643	4644	4645	4646
6	4662	4662	4662	4662

Продължение на таблица 3

Общ поток от осветители №2+3+4+5 ($\Phi_{\text{сум}}=920,25 \text{ lm}$)				
i/j	1	2	3	4
1	7,86	3,18	4,39	6,08
2	10,88	3,86	35,28	305,04
3	13,27	10,13	6,23	139,51
4	15,23	18,75	13,49	52,13
5	16,88	26,95	38,53	10,32
6	18,29	33,63	61,62	68,73
Общо	82,40	96,50	159,54	581,81
920,25 lm	При 80,00	lm/W	11,50 W	теор. мощност

2.3. Оптимални светлоразпределения от тип «плосък лъч» за пътен тунел, получени при отчитане на 5 поредни осветителя

Получените светлоразпределения са с и без полиномно представяне на търсените интензитети при настилка клас RIII (математичен модел съгласно фиг.5б). Светлотехническите и геометричните параметри на уредбата са:

Средна яркост на пътното платно, cd/m ²	$L_{AV}=30$
Надлъжна равномерност на яркостта	$U_L>0,6$
Обща равномерност на яркостта	$U_O>0,2$
Монтажна височина на осветителите, m	$H=1.25$
Ширина на изчислителното поле, m	$W= 5$
Разстояние между осветителите, m	$S= 12$
Номер на последния осветител	$M_{last}= 9$
Номер на първия осветител	$M_{first}= 5$
Брой ивици на изчислителното поле	$N_i= 4$
Брой участъци в ивица	$N_j= 4$

Таблица 4. Интензитети в изчислително поле 5x12 м от осветители № 5, 6, 7, 8, 9 за постигане на яркост 30 cd/m² при пътна настилна R3, ъгъл на наблюдение $\alpha=1^0$ и максимален коефициент на усилване на потока $K_y=30$ (с полиномно представяне на интензитетите $\Phi_{\text{сум}}=784,93 \text{ lm}$)

Интензитети от осветител №5				
i/j	1	2	3	4
1	3789	3976	2508	786
2	2536	2911	1899	511
3	1668	2024	1338	249
4	1054	1318	851	0

Интензитети от осветител №6				
i/j	1	2	3	4
1	3319	3820	88	0
2	3976	2764	1290	0
3	3976	2004	402	223
4	3626	1542	1118	377

Продължение на таблица 4

Интензитети от осветител №7				
i/j	1	2	3	4
1	3976	3897	3772	3563
2	3642	3406	3078	2570
3	3320	2961	2487	1825
4	3010	2558	1999	1280

Интензитети от осветител №8				
i/j	1	2	3	4
1	3974	3935	3889	3835
2	3638	3539	3424	3283
3	3321	3171	2996	2788
4	3021	2827	2607	2346

Продължение на таблица 4

Интензитети от осветител №9				
i/j	1	2	3	4
1	3976	3955	3932	3906
2	3687	3635	3577	3511
3	3412	3332	3243	3143
4	3149	3046	2930	2798

Общ поток от осветители №5+6+7+8+9				
i/j	1	2	3	4
1	78,35	32,98	54,37	1,92
2	66,57	23,43	309,5	1,38
3	50,32	15,78	41,09	6,80
4	34,86	10,39	49,91	7,25

Общо 230,1 82,57 454,9 17,35
785lm

При 80 lm/W 9,81W мощност

Таблица 5. Интензитети в изчислително поле 5x12 м от осветители № 5, 6, 7, 8, 9 за постигане на яркост 30 cd/m² при пътна настилна R3, ъгъл на наблюдение

$\alpha=1^0$ и максимален коефициент на усилване на потока $K_y=30$ (без полиномно представяне на интензитетите: $\Phi_{\text{сум}}= 622,94 \text{ lm}$)

Интензитети от осветител №5				
i/j	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

Интензитети от осветител №6				
i/j	1	2	3	4
1	2728	3156	61	1488
2	3156	0	0	0
3	0	0	1618	3156
4	0	0	3156	3156

Продължение на таблица 5

Интензитети от осветител №7				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	149
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	0

Интензитети от осветител №8				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	3156
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Продължение на таблица 5

Интензитети от осветител №9				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	3156
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Общ поток от осветители №5+6+7+8+9 ($\Phi_{\text{сум}}=622,94 \text{ lm}$)				
i/j	1	2	3	4
1	31,43	14,24	34,66	67,63
2	33,41	1,78	1,28	0,35
3	2,55	1,76	152,8	84,31
4	2,48	1,72	135,8	56,76

Общо 69,86 19,50 324,5 209,1
623lm

При 80,00 lm/W 7,79W мощност

При проектирането на светодиодни осветители представената тук информация за интензитетите на светлината е необходимо да се «обърне» - сега всички разгледани осветители «облъчват» общо изчислително поле (междустълбието между осветители 1-2, съответно 5-6), а в действителност светодиодните «прожектори» на новопроектирания осветител ще облъчват четири или пет междустълбия по посока на приближаващия се автомобил. Излъчване на разсеян поток по посока на наблюдателя е недопустимо, от гледна точка спазване на изискванията за заслепяване.

Подходящото насочване на светодиодните модули е въпрос на инженерен усет, но може да се осъществи и чрез формулиране и решаване на оптимизационна задача «търсене на прободи на прожектори с различна

мощност и светлоразпределение, така че резултатните светлинни потоци по участъци от пътното платно максимално да се доближават до зададените».

След изработване на светлодиодните осветители и тяхното фотометриране, реалните светлоразпределения се залагат в програма за светлотехнически изчисления на тунелни осветителни уредби. Получените светлотехническите показатели (средна яркост, надлъжна и обща равномерност на яркостта, показател на заслепяване) за конкретните геометрични параметри на осветителната уредба ще позволи да се оцени степента на удовлетворяване на заложените в математичния модел ограничения.

3. Заключение

Получените теоретични светлоразпределения във вид на интензитети на светлината по посока на елементарните участъци от пътното платно, както и съответстващите им светлинни потоци, позволяват светлодиодни осветители да се проектират по технология, вариант на класически метод за проектиране на прожекторни осветителни уредби 0. За целта е необходим набор от «елементарни прожектори» с различни ъгли на разсейване и мощност на излъчване, както и програма за светлотехнически изчисления 0. Следва определяне на прободите (съответно ъглите за насочване) на “елементарните прожектори” и разработване на задание за изработване на площадки за монтаж на светлодиодните модули. Технологията на изработка на осветителя трябва да осигури точно спазване на получените в процеса на проектиране ъгли на насочване, а конструкцията му - ефективно охлаждане на светлодиодните модули.

Благодарности

Направените изследвания са финансирани със средства от Министерството на образованието младежта и науката, Фонд “Научни изследвания”, договор № МУ-ФС-07 “Оптимизиране по разход на енергия на осветителни уредби за улици и пътни тунели”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] CIE N° 88:2004 (2nd edition). Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses.
- [2]http://www.schreder.com/documents/_Dossier/PDF/English/200702081100/2014_TUNNEL_EN_V5Fin.pdf Schréder – Tunnellighting, Expertsolutions.
- [3]Jacques Lecocq, Jean-Paul Rami. Flat beam: a new concept of road lighting based on luminance and visibility, LUX EUROPA 2005, pp.481-484.
- [4] Rami Jean-Paul1, Lecocq Jacques, Leibig Joachim, Manto David. “Flat beam” Luminaires Adapted to Tunnel Road Lighting Using LEDS and Fluorescent Tubes

Sources. 11th European Lighting Conference Lux Europa'2009, 9-11 September 2009 - Istanbul, pp. 1165-1170.

[5] Pachamanov, A., D. Pachamanova. Optimization of the Light Distribution of Luminaries for Tunnel and Street Lighting, Engineering Optimization, 40 (1), January 2008, pp. 47-65 (Taylor & Francis, United Kingdom, <http://www.tandf.co.uk/journals/titles/0305215x.asp>).

[6] Angel Pachamanov, Stoyan Petrov, Vesselina Rahneva. Impact of Diffuse-Reflected Luminous Flux on Wall Luminance in Road Tunnels. Twelfth International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2008 October 16-18, Sofia, Bulgaria, pp. 378-382.

[7] Пачаманов, А., Д. Пачаманова, Ст. Петров. Оптимизиране на светлоразпределението на тунелни осветители от тип "Плосък лъч", Известия на ТУ-София, том 58/2008, с.186-196.

[8] <http://www.ampl.com/DOWNLOADS/cplex80.html>. AMPL student edition of the new version 8.0 of CPLEX.

[9] Пачаманов, А. Енергоспестяване и осветителна техника (енергоефективно осветление). Издателство "Авангард-Прима". София, 2007 (272 стр., ISBN 978-954-323-251-2).

[10] Пачаманов А., Д. Пачаманова. Метод за проектиране на осветители за насрещно осветление. Заявка за полезен модел № 001366/25.09.2007.

[11] Gudum J., A Obro. Computer-Program for Computation of Sport Lighting Installations. The Danish Illuminating Engineering Laboratory, Report No.6, 1973.

Автори: д-р инж. Ангел Пачаманов – професор, маг.инж. Стоян Петров – докторант на самостоятелна подготовка – кат. "Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт"

СВЕТЛОДИОДЕН ОСВЕТИТЕЛ ОТ ТИП «ПЛОСЪК ЛЪЧ» ЗА ПЪТНИ ТУНЕЛИ

Ангел Пачаманов, Красимир Костадинов, Стоян Петров

Резюме. В статията е описан метод за реализиране на теоретично получено светлоразпределение при проектиране на светлодиоден осветител от тип «плосък лъч» за пътни тунели. Светлоразпределението е получено в резултат на решаване на оптимизационна задача “постигане на зададени количествени и качествени показатели на тунелната осветителна уредба с минимален светлинен поток”. Методът е приложен за разработване на осветител, състоящ се от светлодиоди и оптични леци, осигуряващи съответстващо на решението на оптимизационната задача разпределение на интензитетите.

“FLAT BEAM” LEDs LUMINARIES FOR ROAD TUNNELS

Angel Pachamanov, Krasimir Kostadinov, Stoyan Petrov

Abstract. This paper presents results of the physical modeling of the intensity distribution of a lighting fitting with the “flat beam” technology for road tunnels. The requisite intensity distribution of the lighting fittings is received as a result of solving an optimization problem according to the criteria “receiving qualitative and quantitative indices for lighting system’s with minimal luminous flux”. The feasible intensity distribution of the luminary is achieved through a program for sport lighting computation when for luminaries are used LEDs with optical lenses. The angle of optical lens is chosen so that the distribution of the luminous flux over the road surface to correspond to a maximum degree to the preliminary assigned.

1. Въведение

Изборът на осветителна уредба за пътен тунел се определя от технически, естетически и икономически съображения. Техническите съображения са свързани с удовлетворяване на изискваните от нормативните документи показатели. За да бъде уредбата икономически целесъобразна тези показатели се удовлетворяват на границата на изискваните стойности.

Разпределението на яркостта $L_{НАСТ}$ по пътното платно се контролира чрез общата L_{MIN}/L_{AV} и надлъжната равномерност L_{MIN}/L_{MAX} , където L_{AV} е средна аритметична стойност от яркостта на подучастъци в изчислителното поле между два осветителя. Яркостта на подучастък от пътното платно е:

$$L_{НАСТ} = E_{ХОР} * q(\beta, \gamma), \quad (1)$$

a)

6)

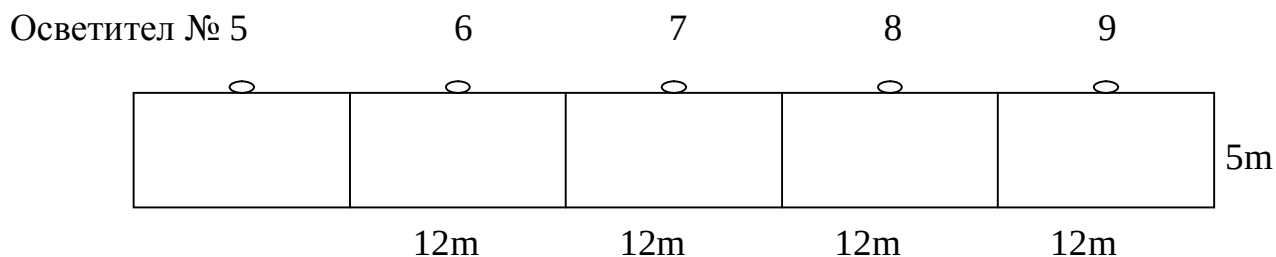
22

2. Изложение

В статията е показан метод за проектиране на светодиодни осветители от тип «плосък лъч» за пътни тунели по теоретично светлоразпределение, получено чрез решаване на оптимизационна задача “постигане на зададени количествени и качествени показатели на тунелна осветителна уредба с минимален светлинен поток” [3]. Параметрите на математичния модел са изчислени съгласно постановката от фиг.2. Полученото светлоразпределение е оптимално за стандартна пътна настилка клас RIII и следните светлотехнически и геометрични параметри на осветителната уредба:

Средна яркост на пътното платно, cd/m^2	$L_{AV}=30$
Надлъжна равномерност на яркостта	$U_L>0,6$
Обща равномерност на яркостта	$U_O>0,2$
Монтажна височина на осветителите, m	$H=1.25$
Ширина на изчислителното поле, m	$W= 5$
Разстояние между осветителите, m	$S= 12$
Номер на последния осветител	$M_{last}= 9$
Номер на първия осветител	$M_{first}= 5$
Брой ивици на изчислителното поле	$N_i= 4$
Брой участъци в ивица	$N_j= 4$

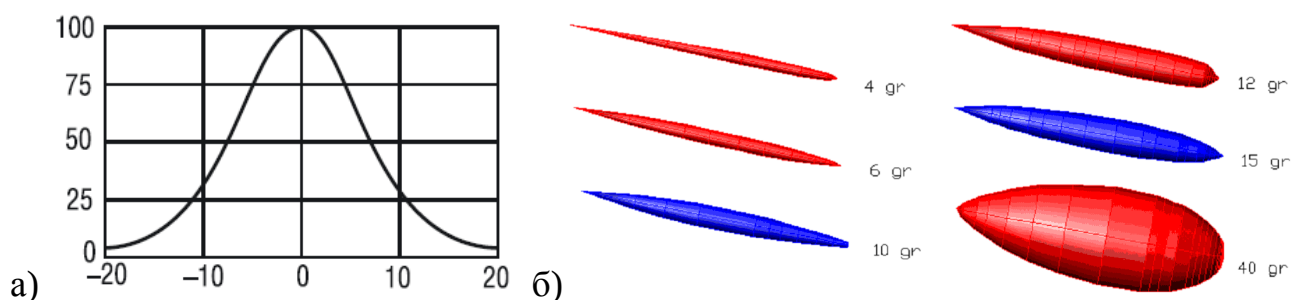
Оптимизационната задача дава като решение необходимите интензитети за постигане на средна яркост 30 cd/m^2 в изчислително поле от 16 елементарни участъка към осветител №6 (фиг. 2). В случая са отчетени пет последователни осветителя /от 5 до 9/. Осветител №5 участва с нулеви стойности на интензитетите, затова не е отчетен. Тъй като целта е да се моделира светлоразпределение на един осветител, по обратен път са определени интензитетите, които осветител №9 трябва да осигури в разширено поле, включващо четири изчислителни полета по 12 м пред него (фиг. 3).



Фиг. 3. “Обърната” схема - четири 5x12 м полета, „облъчвани” от осветител №9

Необходимите интензитети за всяка от 4x16-те клетки на разширеното до 48 м поле са дадени в табл. 1 [4]. За „облъчване” на разширеното поле с необходимите светлинни потоци се използват светодиодни модули, всеки от които осигурява необходимите интензитети по подучастъци на полето. Всеки модул се състои от светодиод и фокусираща леща, монтирани на алуминиево-полимерна подложка с форма на „шестостен”. За реализацията на конкретния осветител са използвани лещи с ъгли на разсейване 4° , 6° , 10° , 12° , 25° и 40°

(при ъгъл на разсейване 40° 50% от $I_{\max}$ е при $\pm 20^\circ$). Каталожните данни на модулите светодиод-оптична леща са дадени в правоъгълни координати, при това кривата на интензитетите е в относителни единици (фиг. 4а). Абсолютната стойност на максималния интензитет се получава като се приложи методът на зоналните потоци, при известна номинална стойност на излъчения от светодиода светлинен поток. За модула светодиод-оптична леща обикновено се дава т.н. «ефективност» в относителни единици, която съответства на к.п.д. на класическите прожектори - от 0.5 до 0.7, в зависимост от концентрацията на потока. Фотометричните тела на интензитетите на светлината на използваните модули са показани на фиг. 4б.



Фиг. 4. Светлоразпределения на модул с леща 12° в правоъгълни координати (а) и на модули 4° , 6° , 10° , 12° , 25° , 40° в полярни координати (б)

Таблица 1. Интензитети в 4 полета 5×12 м от осветител №9 с $\Phi_{\text{сум}}=623$ lm

Интензитети от осв.№9 за поле №9				
i/j	1	2	3	4
1	2728	3156	61	1488
2	3156	0	0	0
3	0	0	1618	3156
4	0	0	3156	3156

Интензитети от осв.№9 за поле №8				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	149
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	0

Продължение на таблица 1

Интензитети от осв.№9 за поле №7				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	3156
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Интензитети от осв.№9 за поле №6				
i/j	1	2	3	4
1	3156	3156	3156	3156
2	3156	3156	3156	3156
3	3156	3156	3156	3156
4	3156	3156	3156	3156

Продължение на таблица 1

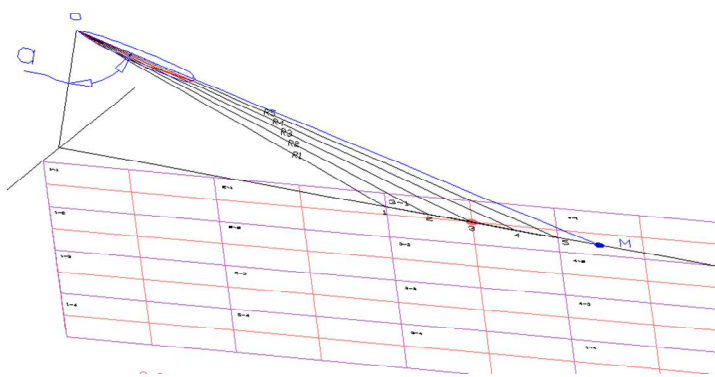
Общ поток от осветители № 6+7+8+9 в поле №6 ($\Phi_{\text{сум}}=622,94$ lm)				
i/j	1	2	3	4
1	31,43	14,24	34,66	67,63
2	33,41	1,78	1,28	0,35
3	2,55	1,76	152,8	84,31
4	2,48	1,72	135,8	56,76
Общо	69,86	19,50	324,5	209,1
623 lm	При 80,00	lm/W	7,79W	мощност

За конкретния случай представянето на светлоразпределението на използваните «прожектори» е в полярни координати за 1000 lm поток на светлоизточника, тъй като изчисленията се извършват с програма за спортно прожекторно осветление, изискваща този тип входни данни (програмата позволява едновременна работа с 9 типа светлоразпределения на прожектори).

Определянето на броя на «прожекторите», ъгъла на разсейване и мястото на всеки пробод може да се получи с решаване на оптимизационна задача «постигане на минимална разлика между зададени и реализирани потоци по елементарни участъци в разширеното поле», като спазването на количествените и качествените показатели на уредбата е «осигурено» от ограничителните условия за получаване на оптималното светлоразпределение.

На този етап методът се илюстрира с решение, при което броят и ъглите на разсейване на „прожекторите” се определя по интуитивен път, така че разширеното поле плътно да се “насити” с “елипси”, осигуряващи необходимия поток по подучастъци на разширеното поле. Конкретното насочване се свързва с определяне на мястото на пробода - необходимите интензитети формират “зададена” крива, която трябва да “припокрива” най-близката по форма крива от разполагаемия набор “прожектори”. Избира се този “прожектор”, с чиято крива и светлинен поток най-близко се получават изискваните интензитети за полетата, попадащи в елипсата на разглеждания “прожектор”.

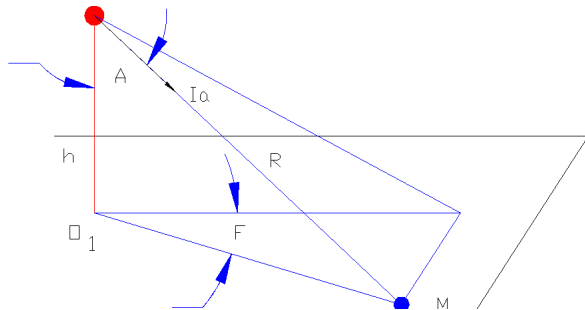
Например, нека разгледаме показаните на фиг. 5 площови елементи 3-1. За точки 1, 2, 3, 4 и 5, лежащи на пресечницата на равнината на полето и равнината на падащия лъч, се нанасят „зададените” интензитети. Мястото на пробода се получава от налагането на двете криви – на зададените интензитети и на най-близкия по светлоразпределение “прожектор”. Тъй като този “прожектор” има принос и за потоците в по-отдалечените полета, това се отчита чрез използване на програма за прожекторно осветление [5]. Така изчислителното поле се запълва с потока на избраните “прожектори” в посока от мястото на монтажа към отдалечените участъци на полето.



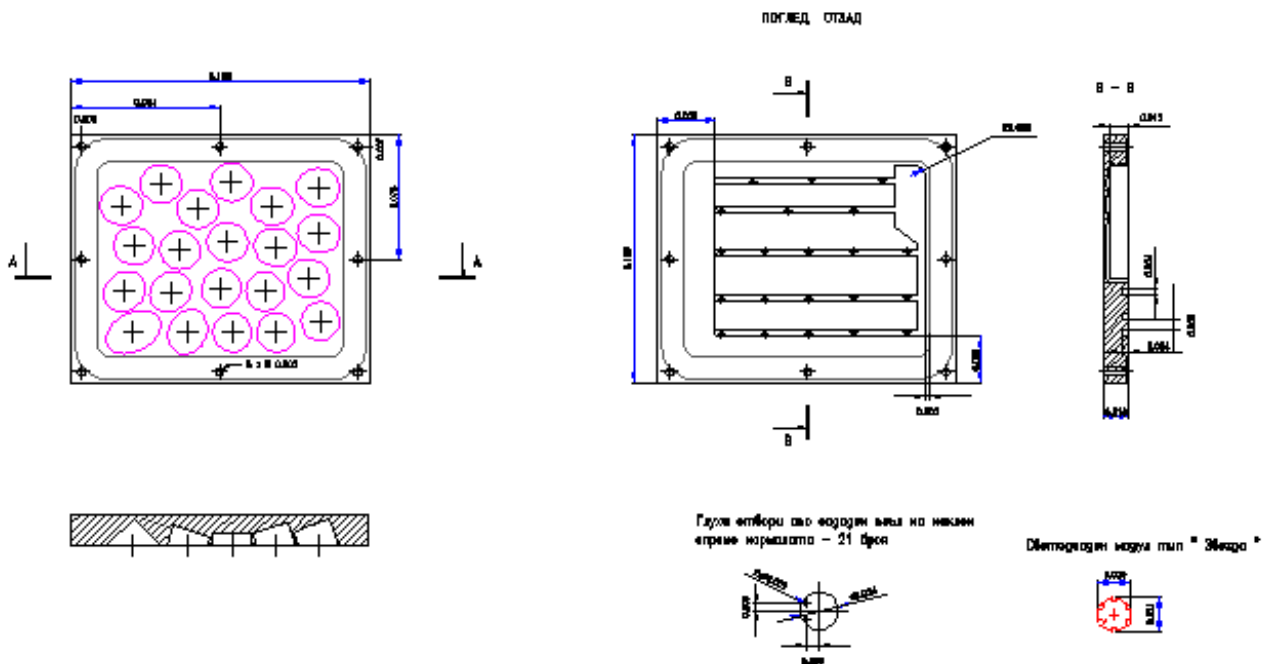
Фиг. 5. Определяне мястото на пробода на конкретен “прожектор” по избрана СРК

Насочването на всеки “прожектор” спрямо изчислителното поле се изразява чрез ъглите α и φ (фиг. 6), които са необходими за подготовка на подложките, върху които ще се закрепват светодиодните модули. Възможни са поне два варианта за изработка на площадки, върху които ще се монтират светодиодните модули: 1/ призми с достатъчен брой стени, на които се поставят “прожекторите” с близки ъгли φ ; 2/ върху правоъгълна плочка с

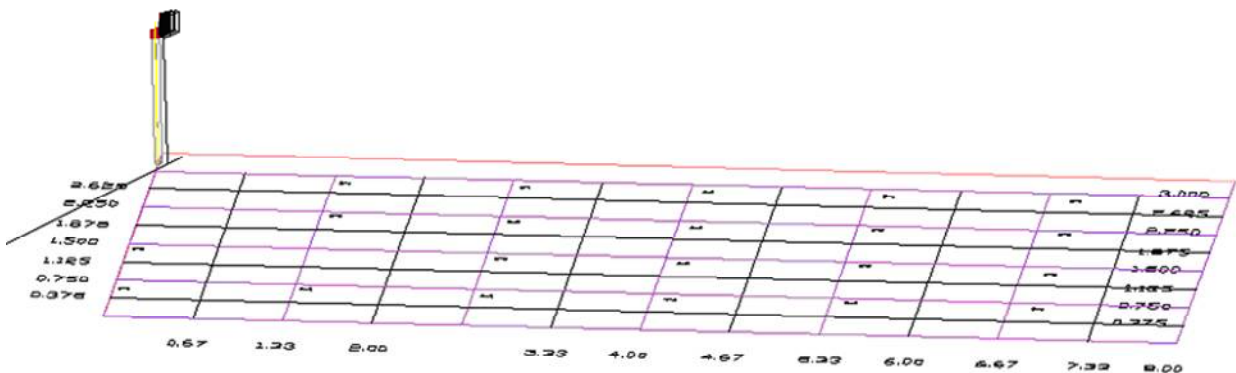
дебелина около 20 мм се фрезуват глухи отвори, чиито оси са насочени към предварително определения пробод в изчислителното поле (фиг. 7). Такава конструкция на оптичната система дава възможност за опростено обслужване и при необходимост безпроблемна смяна на модули, наложена от изтичане на ресурса на материала на оптичните лещи или на самите светодиоди.



Фиг. 6. Ъгли за насочване на модулите



Фиг. 7. Плочка с дебелина 20 мм с фрезувани глухи отвори за закрепване на светодиодните модули



Фиг. 8. Общ вид на разработения осветител

3. Заключение

Разгледаният метод за проектиране на осветители със светодиодни модули с оптични лещи прави възможно реализирането на всяко теоретично получено светлоразпределение, резултат от решаване на оптимизационна задача с конкретни ограничения на математичния модел. По конкретни геометрични параметри на осветителната уредба и отражателни характеристики на пътното покритие могат да бъдат разработени оптимални по разход на енергия осветители, чието проектиране с класически методи и конвенционални източници на светлина е почти невъзможно.

Благодарности

Разработката е финансирана със средства от Министерството на образованието, младежта и науката, Фонд “Научни изследвания”, договор № МУ-ФС-07/2007 “Оптимизиране по разход на енергия на осветителни уредби за улици и пътни тунели”

ЛИТЕРАТУРА

- [1] CIE N° 88:2004 (2nd edition). Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses
- [2] Jacques Lecocq, Jean-Paul Rami. Flat beam: a new concept of road lighting based on luminance and visibility, LUX EUROPA 2005, pp.481-484
- [3] Пачаманов, А., Д. Пачаманова, Ст. Петров. Оптимизиране на светлоразпределението на тунелни осветители от тип “Плосък лъч”, Известия на ТУ-София, том 58/2008 , с.186-196
- [4] Пачаманов, А., Ст. Петров. Енергийноефективни светлоразпределения от тип «плосък лъч» за пътни тунели. II Научна конференция ЕФ’2010, Созопол, 1 – 3 октомври 2010 г.
- [5] Пачаманов, А., Д. Пачаманова. Метод за проектиране на осветители за насрещно осветление. Заявка за полезен модел № 001366/25.09.2007 г.

Автори: д-р инж. Ангел Пачаманов – професор, маг.инж. Стоян Петров – докторант на самостоятелна подготовка – кат. “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, маг.инж. Красимир Костадинов, НИС при ТУ–София

ОПТИМИЗИРАНЕ НА СВЕТОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ОСВЕТИТЕЛИТЕ ЗА УЛИЧНО ОСВЕТЛЕНИЕ

Николай Василев

Резюме. В доклада се анализира решението на две задачи за определяне на оптималното светлоразпределение на осветителите за улично осветление: а) когато са зададени светлотехническият клас и геометричните параметри на осветителната уредба и вида на асфалтовата настилка и се „минимизира“ светлинният поток, насочен към уличното платно. Дискутира се валидността на оптималните решения при промяна на зададените параметри; б) нова осветителна уредба, когато са зададени само светлотехническият клас на осветителната уредба, ширината на уличното платно и вида на асфалтовата настилка. Предлага се най-подходящото решение да се определя чрез минимизиране на приведените сегашни разходи-Present value (PV). За светлотехнически класове ME3, ME4 и ME5 се установява подходящ критерий за оптималност „максимално разстояние между осветителите“.

OPTIMIZATION OF LIGHT DISTRIBUTION CURVES OF LUMINAIRES FOR STREET LIGHTING

Nikolay Vassilev

Abstract. In the paper two tasks for optimization of light distributions curves of street lighting luminaires are analyzed : a) for a given lighting class, geometric parameters of street lighting and reflection class of road surfaces is “ the luminous flux directed to the road surface minimized”. It is discussed the validity of the optimum solutions by variation of given parameters; b) new street lighting, when are given only the lighting class of street lighting, the width of the road and the reflection class of road surface. It is proposed to choose the most suitable solution by means of minimizing of Present Value of street lighting equipment. For street lighting equipment with lighting class ME3, ME4 and ME5 suitable criteria for optimization it is established “maximum distance between luminaires”.

1. Увод

Уличното осветление е сериозен консуматор на електрическа енергия – 12 % от цялата потребена в страната електроенергия. Много големи са също инвестициите за изграждане на уличното осветление на огромната по своята дължина уличната мрежа на всички наши селища. Поради това повишаване на

Годишник на ТУ-София, т. 60, кн. 2, 2010

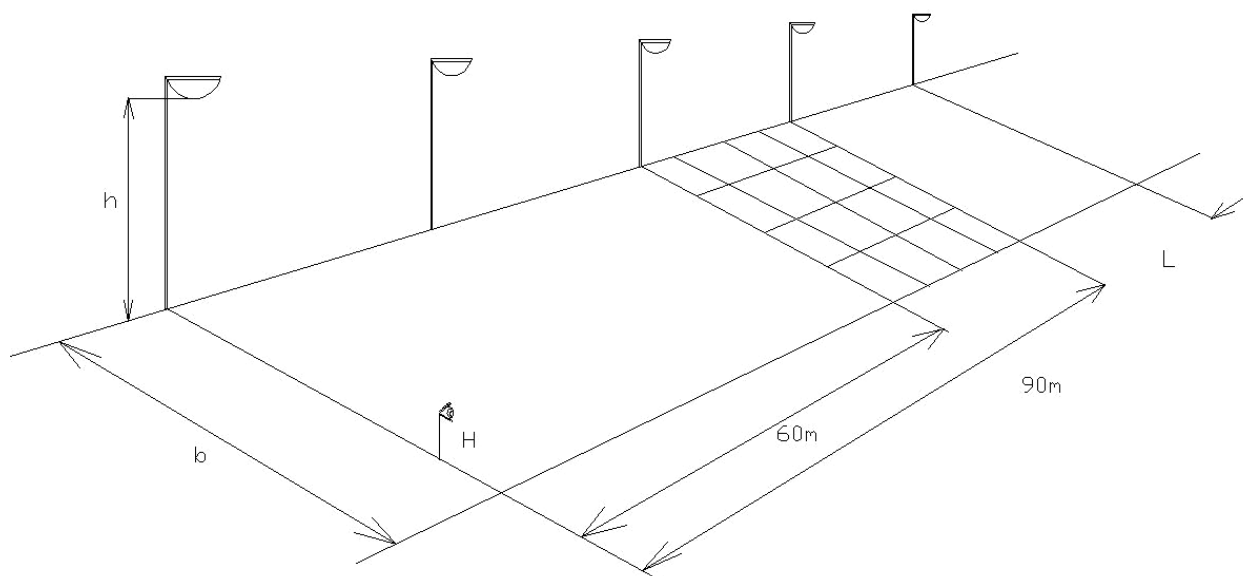
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 60, book 2, 2010

ефективността на уличното осветление е актуална и значима технико-икономическа задача. Важен етап от нейното решаване е оптимизиране на светлоразпределението на уличните осветители. С това се обяснява подчертания интерес на редица български светлотехници към тази задача в продължение на повече от 40 години [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] .

2. Изложение

Тази оптимизационна задача следва да се решава за две различни изходни условия:

2.1. Реконструкция на съществуващи осветителни уредби, когато се подменят само наличните осветители. Това означава , че се запазва геометрията на осветителната уредба – разположение, височина на окачване и разстояние между осветителите (фиг.1).



Фиг. 1

При тази постановка оптимизационната задача обикновено се формулира по следния начин : „ **Да се намери такова светлоразпределение на осветителя, при което с минимален светлинен поток се осъществяват нормените светлотехнически изисквания за съответния светлотехнически клас МЕ** ” :

- средна нормена яркост $L_{\text{ср}} \geq L_{\text{норм}}$ (1)
- обща равномерност на осветлението $L_{\text{мин}} / L_{\text{ср}} \geq g_0$ (2)
- надлъжна равномерност на осветлението $L'_{\text{мин}} / L'_{\text{макс}} \geq g_l$ (3)
- степен на заслепяване $TI \leq TI_{\text{доп}}$ (4)

Оптимизиране по минимален светлинен поток практически означава минимизиране на мощността на осветителя. Следователно консумацията на електроенергия на осветителната уредба ще бъде минимална.

Публикуваните в литературата оптимизационни методи са принципно подобни. Оптимизационният процес обикновено се провежда в следната последователност:

- Светлоразпределителните криви на осветителите се представят с математични изрази: **линейни полиноми, степенни полиноми, полиноми на Лежандър, Фуриева апроксимация, показателна функция, сплайн функции.**
- Целевата функция, която се минимизира, е насоченият светлинен поток върху уличното платно между два съседни осветители

$$\Phi = \min \quad (5)$$

при съблюдаване на гореспоменатите ограничителни условия (1),(2),(3),(4).

- Светлоразпределителните криви се задават в листови равнини, надлъжни по оста на уличното платно или в меридиални равнини през оптичния център на осветителя.
- Коефициентът на усилване на интензитета на светлината на осветителя се приема обикновено от 6 до 8 в зависимост от избраната оптична система на осветителя.
- За да се постигне плавно изменение на светлоразпределителните криви се въвеждат допълнителни ограничителни условия.
- Оптимизационната задача се решава с различни математични средства. Успешно се използва модифициран симплекс метод, когато светлоразпределителните криви са представени с линейни полиноми, тъй като ограничителните условия (1), (2) и (3) са също линейни зависимости. Изключение е условието за ограничаване на заслепяването (4), което е апроксимирано с достатъчна точност с линейна зависимост. В последните публикации оптимизационната задача се решава със средствата на MATLAB.

Решението на оптимизационната задача не е еднозначно. Формата на светлоразпределителните криви зависи от избрания математичен израз, с който те се представят, от въведените ограничения, от положението на равнините, в които се определя светлоразпределението, от използваните изчислителни методи .

Какви констатации и оценки могат да се направят относно достиженията и проблемите свързани с оптимизиране на светлоразпределението на уличните осветители ?

а. Предложените методи имат **значим научен принос** и определено практическо значение за конструиране на ефективни осветителни тела и за осветителните уредби.

б. Досега у нас не са конструирани улични осветители с оптимално светлоразпределение. Не са публикувани, с много малки изключения,

конкретни оптимизирани светлоразпределителни криви. А това е „свидетелството“ за реалния ефект на оптимизирането.

в. Оптималните светлоразпределителни криви се определят за конкретна височина на окачване и разстояние между осветителите и геометрия на улицата. Необходимо е да се изследва “валидността” на оптималната крива при увеличаване или намаляване на височината на окачване и разстоянието между осветителите, а също на широчината на уличното платно.

г. Необходимо е да се изследва валидността на установената за даден светлотехнически клас оптимална светлоразпределителна крива, напр. за ME4, и за съседните светлотехнически класове ME3 и ME5. Същото важи и за възможните четири класа на отражателните характеристики на пътните настилки R1, R2, R3, R4.

д. Регламентираните нормени яркости за улично осветление са в диапазон $0,35 \div 2,0 \text{ cd/m}^2$, т.е. в зоната на мезопичното зрение. Спектралната чувствителност на човешкото око при фотопично и мезопично зрение е различна. Светлинният поток на светлинните източници сега се изчислява съгласно спектралната чувствителност за фотопично зрение $v(\lambda)$. Според новите изследвания този поток следва да се редуцира в условията на мезопичното зрение.

е. Особено е съществено това да се съобрази, когато се оптимизира светлоразпределението на уличните осветители по видимост. Необходимо е също да се коригират формулите за изчисляване на заслепяване и яркостен дискомфорт в зоната на мезопичното зрение.

ж. Не се дава оценка на възможността за реализиране на получените оптимални криви.

2.2. Проектиране на нови улични осветителни уредби

При оптимизиране на светлоразпределението на улични осветители за нови осветителни уредби следва да се отчетат големите начални инвестиции за осветители, носещи стълбове, електроснабдителна система и строително-монтажни работи. В таблица 1 са дадени част от резултатите от едно изследване на разходите за начални инвестиции, консумирана електроенергия, обслужване и ремонт на улични осветителни уредби. За осветителни уредби със светлотехнически клас ME3, ME4, ME5 началните инвестиции възлизат на 50 – 60% от общите разходи, докато разходите за електроенергия са 20-40%. При светлотехнически класове ME1 и ME2 относителният дял на тези два вида разходи са приблизително еднакви.

Следователно критерият за оптимизиране на светлоразпределението на уличните осветители трябва да бъдат минимални общи разходи, т.е. чрез

минимизиране на TAV (6), PV (7) или FC (8) да се определят оптималните светлоразпределителни криви.

Технико-икономическата оценка трябва да включва общите разходи на осветителната уредба, които се определят по един от следните методи:

- общи годишни разходи TAV

$$TAV = I + AF.(E + OP) \quad (6)$$

- настоящи разходи, Present value – PV

$$PV = I + AF.(E + OP) \quad (7)$$

- бъдещи разходи (разходи за целия амортизационен период)

$$FC = I_{\text{л}} + E_{\text{л}} + (Л+П)_{\text{л}} \quad (8)$$

където I са началните инвестиции E – разходи за електроенергия;

O и P – разходи за обслужване и ремонт;

AF - анюитетен фактор;

$I_{\text{л}}$ – олихвени първоначални инвестиции за n години;

$E_{\text{л}}$ – олихвени разходи за електроенергия за $(n-1)$ години;

$(Л+П)_{\text{л}}$ – олихвени разходи за смяна на светлинни източници и почистване и ремонт на осветители и стълбове за $(n-1)$ години, като се отчита периода на групова замяна на лампите.

Очевидно критерият за оптималност в случая трябва да бъдат минимални разходи определени по формули (6), (7) или (8). Това обаче сериозно затруднява оптимизационната задача и досега не ни е известен публикуван метод за нейното решение.

Целевата функция в случая не е така “благоприятна” за оптимизиране, както в предходната задача, където се минимизира светлинният поток, който директно се представя чрез търсените светлоразпределителни криви.

Задачата допълнително се усложнява, защото светлотехническите показатели на осветителната уредба и цената на стълбовете зависят от тяхната височина h :

$$K = a + bh + ch^2 \quad (9)$$

В литературата не е публикуван метод за решаване на тази оптимизационна задача.

В таблица 1 са представени резултати от многовариантно проектиране за определен светлотехнически клас и геометрия на улицата, като е съобразена зависимостта на цената на стълбовете от тяхната височина.

3. Изводи

Следва да се отбележи установената зависимост между общите разходи за изграждане на уличната осветителна уредба и разстоянието между

осветителите (табл.1). С увеличаване на разстоянието между осветителите се намаляват разходите за изграждане на осветителната уредба, т.е. като мярка за ефективност може да се използва максималното разстояние между осветителите :

$$L = \max \quad (10)$$

Критерият е подходящ за сравнения на вариантни решения с еднакво разположение на осветителите (едноредно или двуредно насрещно или двуредно шахматно). Поради затруднения с математично представяне на функционалната обвързаност на величините, от които зависи разстоянието между осветителите, засега не разполагаме с математичен метод за неговото определяне.

Таблица 1

№	Разходи	ME5 b = 2x3,75m едностранно разположение				ME4 b = 2x3,75m едностранно разположение				ME3 b = 3x3,75m двустранно разположение			
		euro	%	h, m	L, m	euro	%	h, m	L, m	euro	%	h, m	L, m
1	ОБЩО	41 668	100			41 951	100			80 534	100		
	Инвестиции	26 334	62,2	6	26	25 760	61,4	7	28,5	46 806	58,1	10	34
	Енергия	9 110	21,8			10 552	25,2			24 228	30,1		
	Обслужване	6 224	16,0			5 639	13,4			9 500	11,8		
2	ОБЩО	40 572	100			39 455	100			71 995	100		
	Инвестиции	25 641	62,2	6	27	24 189	61,3	7	30	41 756	58,0	10	38
	Енергия	8 870	21,8			9 949	25,2			21 722	30,2		
	Обслужване	6 060	16,0			5 317	13,5			8 517	11,8		
3	ОБЩО	29 940	100			32 437	100			62 354	100		
	Инвестиции	18 375	60,5	7	39	18 480	57,0	8	41	35 604	57,1	10	43
	Енергия	7 537	25,1			10 026	30,9			19 216	30,8		
	Обслужване	4 028	14,4			3 931	12,1			7 534	12,1		
4	ОБЩО	28 695	100			31 085	100			55 861	100		
	Инвестиции	17 592	60,4	7	41	17 710	57,0	8	42	32 600	58,4	10	49
	Енергия	7 236	25,2			9 608	30			16 709	29,9		
	Обслужване	3 867	14,4			3 767	12,1			6 552	11,7		
5	ОБЩО	24 633	100			28 394	100			58 119	100		
	Инвестиции	14 166	56,7	9	53	13 986	49,3	10	55,5	29 304	50,4	10,5	53
	Енергия	7 519	30,5			11 508	40,5			23 015	39,6		
	Обслужване	2 948	12,8			2 900	10,2			5 800	10,0		
6	ОБЩО	23 707	100			26 039	100			55 128	100		
	Инвестиции	13 821	57,5	10	57	13 232	50,8	11	59	27 914	50,6	10,5	57
	Енергия	7 101	29,9			10 229	39,3			21 737	39,4		
	Обслужване	2 784	12,6			2 578	9,9			5 478	10,0		

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Василев, Н. И. Представяне на светлоразпределителните криви на осветителните арматури чрез тригонометрични редове на Фурие, Годишник на МЕИ, София, 1963, том XIII, кн. 2.
- [2] Василев, Н. И. Някои въпроси на теорията, проектирането и експлоатацията на външни осветителни уредби, докторска дисертация, 1970 г.
- [3] Василев, Х. Н., М. Монеv. Метод за оптимизиране на светлоразпределителната кривана осветители за транспортни магистрали, Транспорт и кибернетика, 1976.
- [4] Платиканов, С. К. Оптимизиране на светлоразпределението на осветители за улично осветление, докторска дисертация, 1979 г.
- [5] Василев, Х. Н. Оптимизиране на параметрите на улични осветителни уредби, хабилизационен труд, 2007 г., София.
- [6] Монеv, Т. М. Повишаване на ефективността на улични осветители, докторска дисертация, 1985г.
- [7] Василев, Н. И., М. Т. Монеv, Иванчев, Митеv, Янев, Оптимизиране на светлоразпределението на улични осветители.
- [8] Пачаманов, А. С. Енергоспестяване и осветителна техника, София, 2007 г.
- [9] Pachamanov, A., D. Pachamanova, Optimisation of the Light Distribution of Luminaires for Tunnel and Street Lighting, Engineering Optimisation, 40 (1), January 2008, pp. 47-65.
- [10] Стефанов, С. Б., Оптимизиране светлоразпределението на улични осветителни тела, докторска дисертация, 2010г., София.
- [11] Велинов, К. Л., Х. Н. Василев. Влияние на геометричните параметри и нормативните ограничения върху оптималното светлоразпределение на уличните осветители, Национална конференция „Осветление 2007г.“, Варна.
- [12] Василев, Н. И., Б. Г. Тошев, Правилно ли оценяваме ефективността на уличните осветителни уредби, сп. Енергетика, 2010г., София.
- [12] Василев, Н. И. , Ц. Пейчева, Оптимална височина на окачване на улични осветители, XI национална конференция по осветление, 2001, Варна.

Автор: д-р инж. Николай Василев – професор в катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИ ОТ ПРАКТИЧЕСКИ ИЗМЕРВАНИЯ НА СВЕЛОТЕХНИЧЕСКИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗА МОДЕЛ НА РАБОТНО ПОМЕЩЕНИЕ ЗА ЕФЕКТИВНО ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДНЕВНАТА СВЕТЛИНА

Вилиана Кисьова

***Резюме.** Сравнителен анализ на получените резултати от практически измервания на светлотехническите показатели, извършени за модел на работно помещение с цел повишаване на енергийната ефективност на осветителната уредба, чрез използване на дневната светлина. Получените резултати са от измервания за различни изложения на остъклената част на модела – изток, запад и юг, както и за различни видове остъклявания – конвенционален стъклопакет, конвенционален стъклопакет в комбинация със стандартни алуминиеви щори, разположени извън него от вътрешната страна на модела и двоен стъклопакет с вградени в него стационарни слънцenasочващи елементи. Оценка на използваните видове остъклявания.*

OUTCOME BY THE PRACTICAL MEASUREMENT OF THE LIGHT-TECHNICAL INDICATORS AT A WORKING PLACE WITH LIGHT CONTROL AND CONVENTIONAL SUN-PROTECTIVE BLINDS

Viliana Kisiova

***Abstract.** Comparative analysis of the results in the usage of the different types of blinds. Evaluation in the usage of different types of blinds. Pros and cons by the light control and the conventional sun-protective blinds.*

1. Увод

С влизането в сила на наредбата за икономия на енергия (EnEV) в Германия от 1-ви октомври 2009г. се обръща все по-голямо внимание на предимствата на естественото осветление при оценяване на енергийната ефективност на сградата, като цяло. За постигане на това от съществено значение е намаляването до минимум на разхода за ел. енергия за изкуствено осветление, отопление и климатизация.

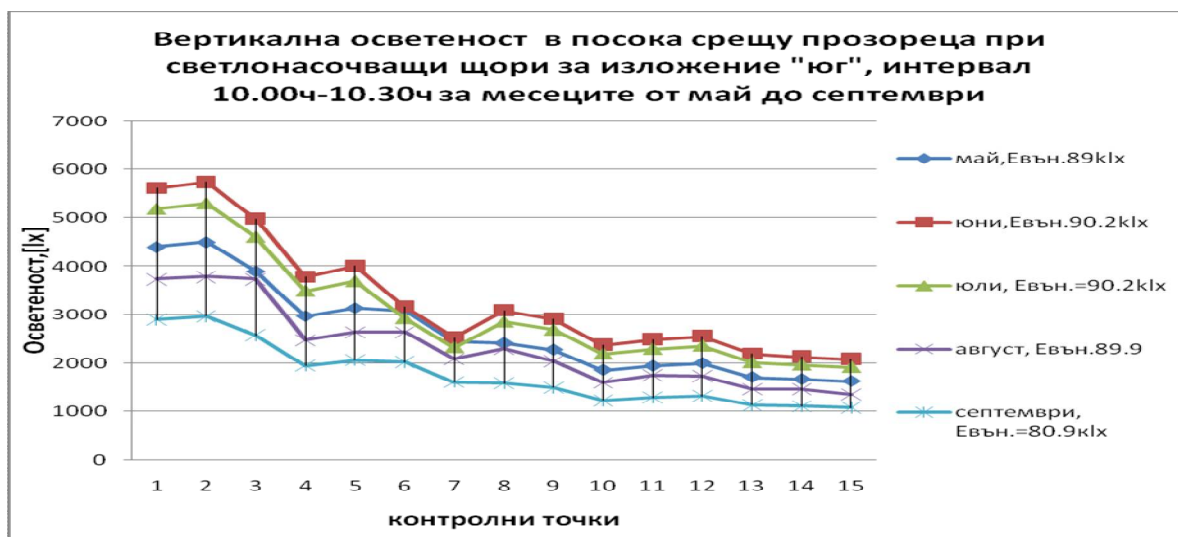
В предвид на това, че дневната светлина е много динамична и зависи от редица фактори, основните от които са: височина на слънцето, наличие или липса на облаци и час от денонощието, изследванията са направени за посоките

– изток, запад и юг. За север не са правени изследвания, т.к. за тази посока през остъкляването преминава само дифузна компонента и те се припокриват до голяма степен с изследванията в сутрешните часове за западно изложение и със следобедните часове за източно изложение.

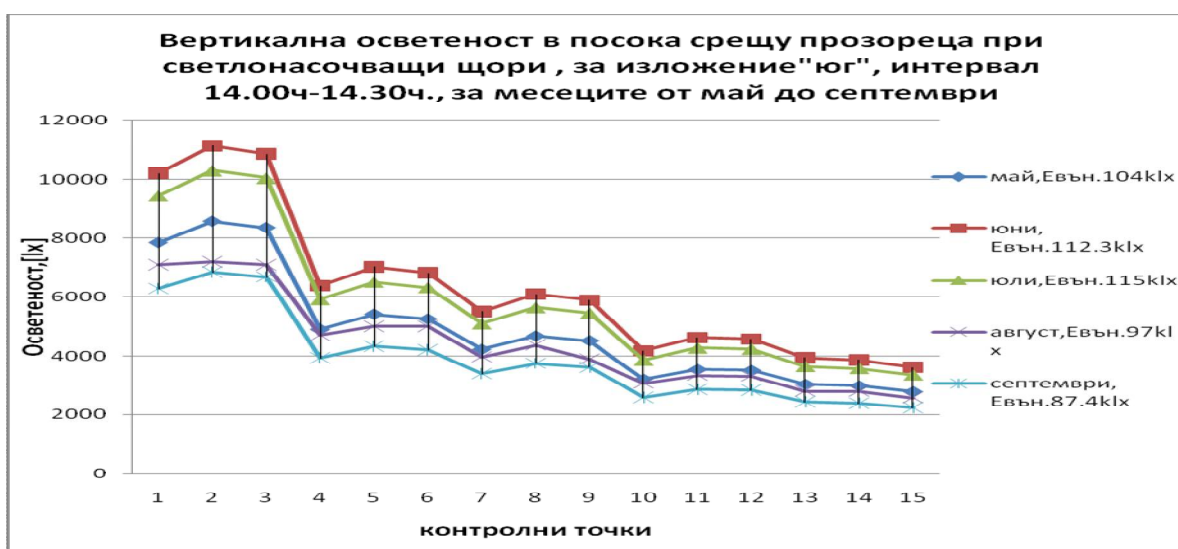
2. Експеримент

Подробно е извършено измерване за отчитане на изменението на вертикалната осветеност за всяка контролна точка на височина $h=0.23\text{м}$. за трите основни посоки, съответстващи на възможностите за ориентация на работни места в помещението и с цел да се получат резултати за влиянието на коефициента на отражение на вътрешните ограждащи повърхности. В настоящият доклад ще бъдат представени само част от получените резултати поради големият и размер. На фиг. 1 и фиг. 2 е показано сравнително равномерното изменение на измерените стойности за вертикалната осветеност в дълбочина на модела, за различен период от денонощието и за различна височина на слънцето, т.е. различен месец при южно изложение. Ясно се вижда, че при използването на слънцenasочващите щори се постигат много по ниски осветености в зоната на остъкляването, в сравнение със случаите в които се използва само двоен стъклопакет - фиг. 3 и фиг. 4 или двоен стъклопакет с конвенционални щори, разположени от вътрешната страна на помещението, съответно фиг. 5 и фиг. 6. Измерените високи стойности на вертикална осветеност до прозорците фиг. 3, фиг. 4, фиг. 5 и фиг. 6 са предпоставка и за висока яркост следователно за наличие на дискомфорт и висок коефициент на заслепяване. От фиг. 1 и фиг. 2 също може да се види, че и при равни или по-високи стойности на външната осветеност, например на фиг. 1. Евън,юни = 90.2klx и Евън,юли = 90.2klx и на фиг. 2 Евън,юни = 112.3klx и Евън,юли = 115klx , измерените стойности на вертикалната осветеност вътре са по-ниски. Това се обяснява с предимството на използваните тримерни слънцenasочващи щори да отразяват изцяло директната компонента на дневна светлина при височинен ъгъл на слънцето между 30° и 60° спрямо хоризонта. Осветеността реализира в този случай се обуславя изцяло от дифузна компонента, което осигурява и защита от нежелано заслепяване, яркостен дискомфорт, повишаване на температурата в помещението и голяма неравномерност на осветеността в дълбочина на модела.

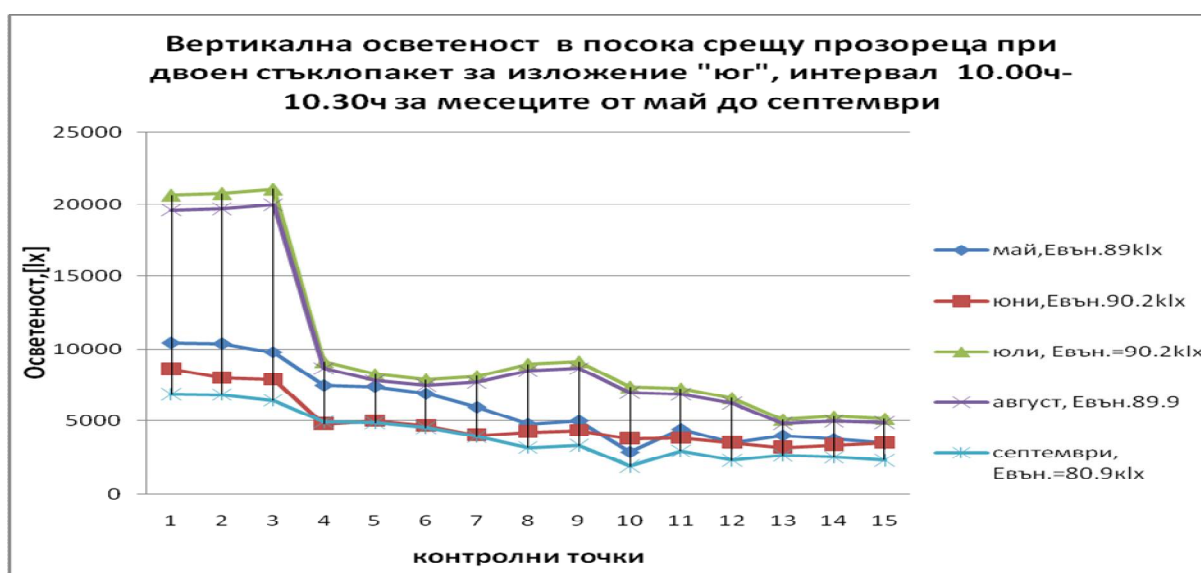
На фиг. 7, фиг. 8 и фиг. 9 са показани измерените стойности за вертикалната осветеност при източно изложение, а на фиг. 10, фиг. 11 и фиг. 12 при западно изложение. От фиг. 8 и фиг. 9 отново се вижда по-голямата неравномерност в дълбочина на помещението, докато при слънцenasочващите щори това липсва, независимо от факта дали е налице директна компонента върху остъкляването или само дифузна.



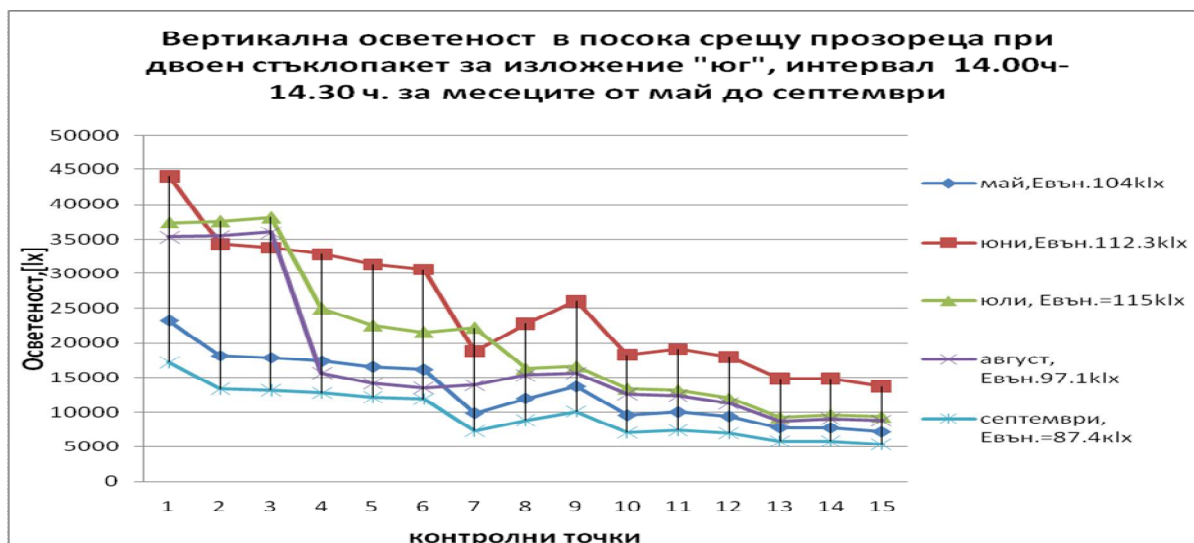
Фиг. 1



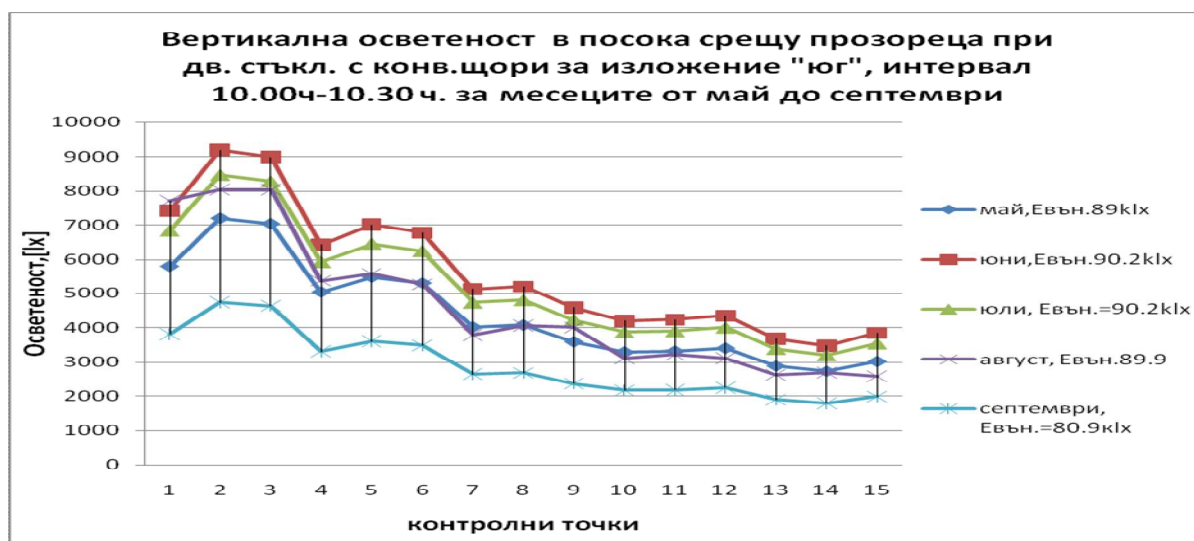
Фиг. 2



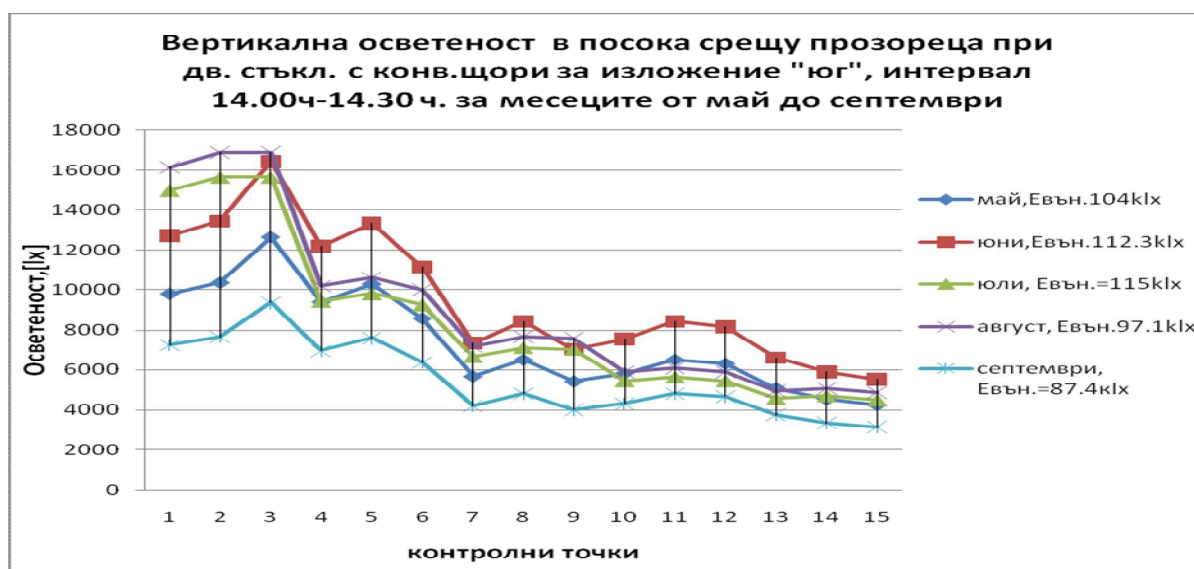
Фиг. 3



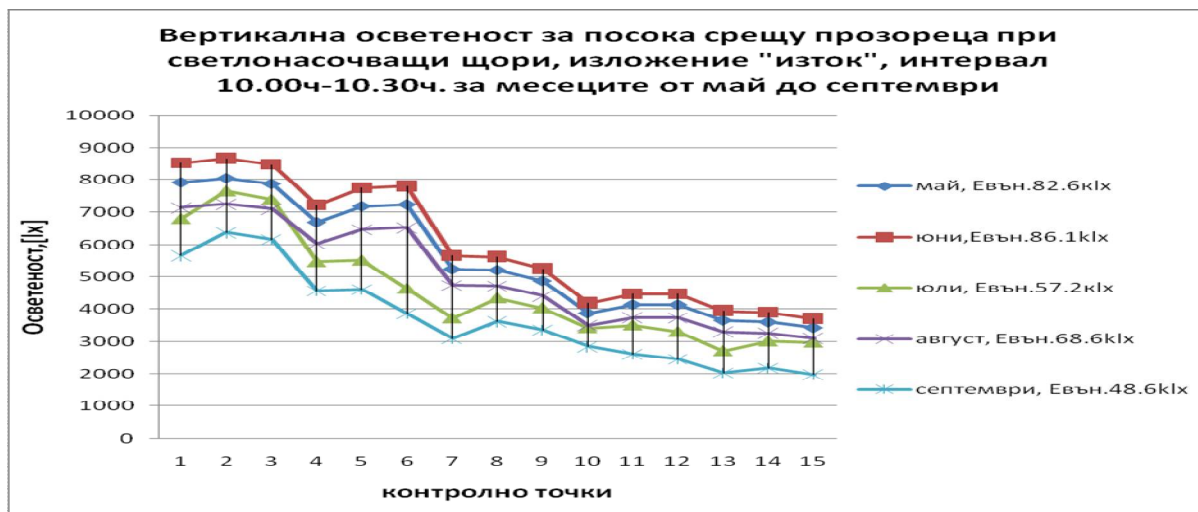
Фиг. 4



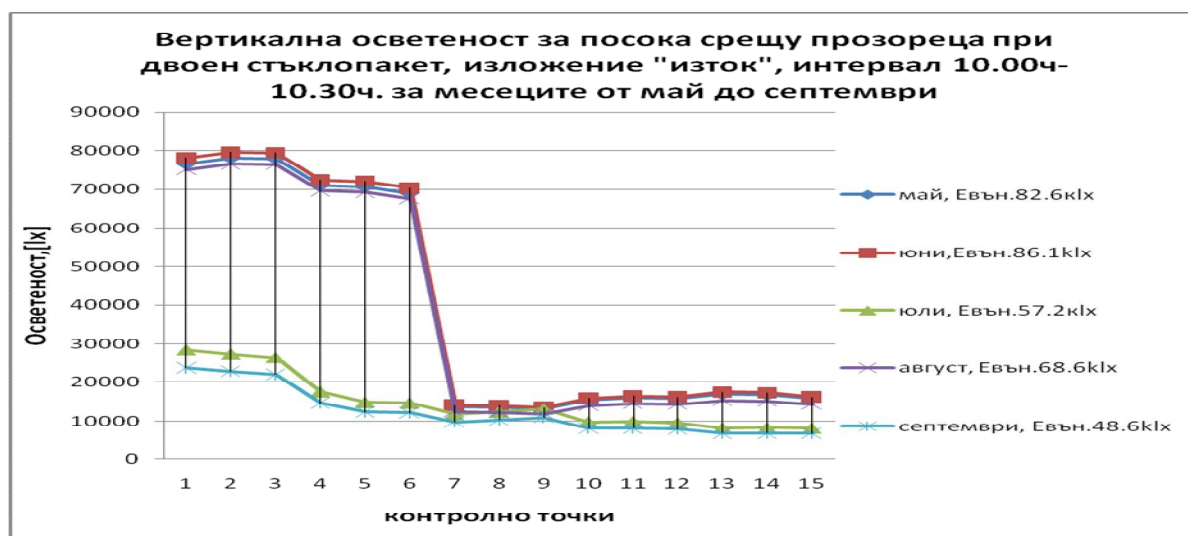
Фиг. 5



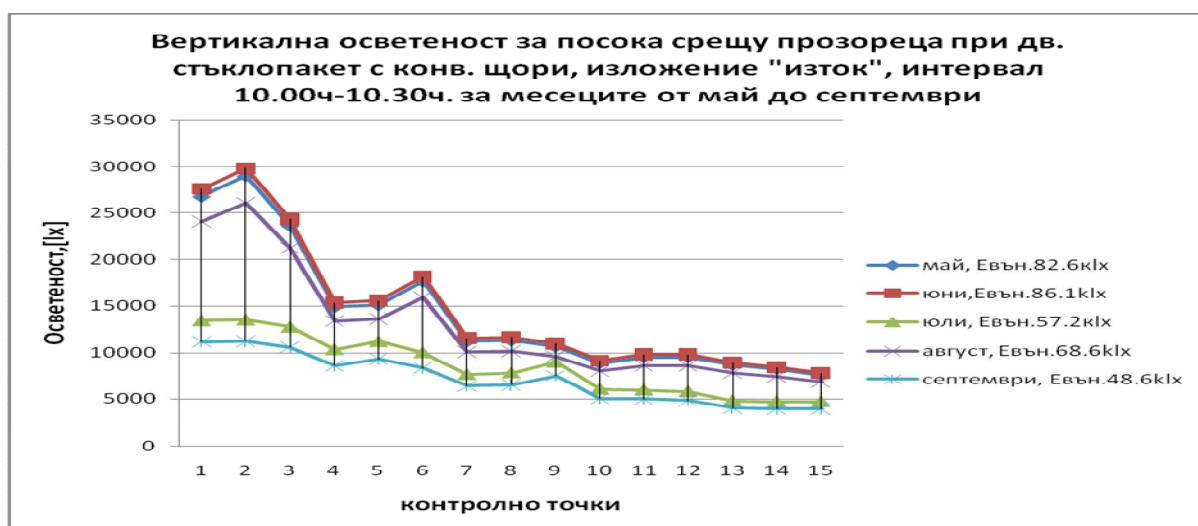
Фиг. 6



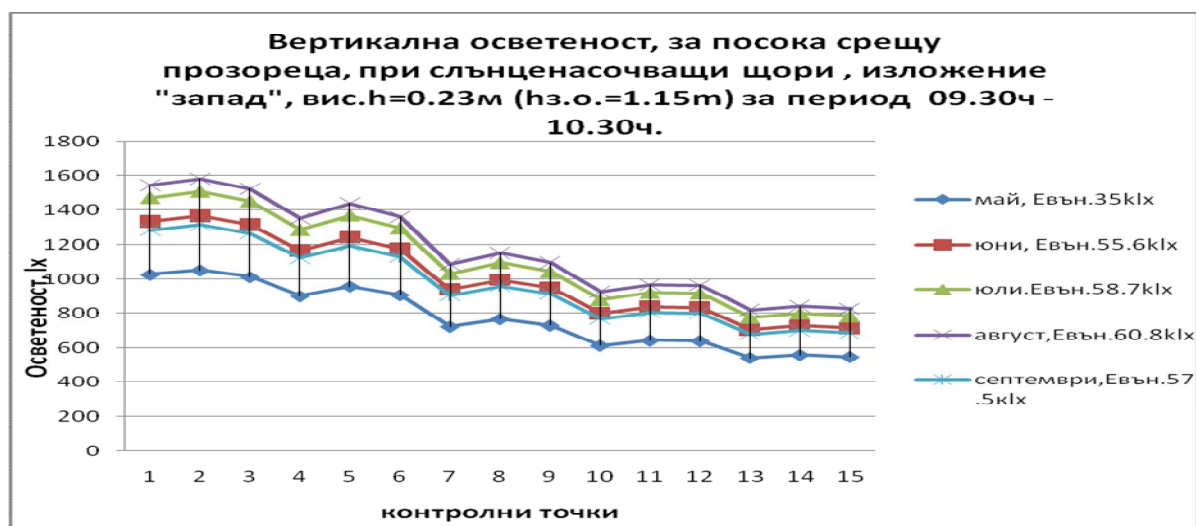
Фиг. 7



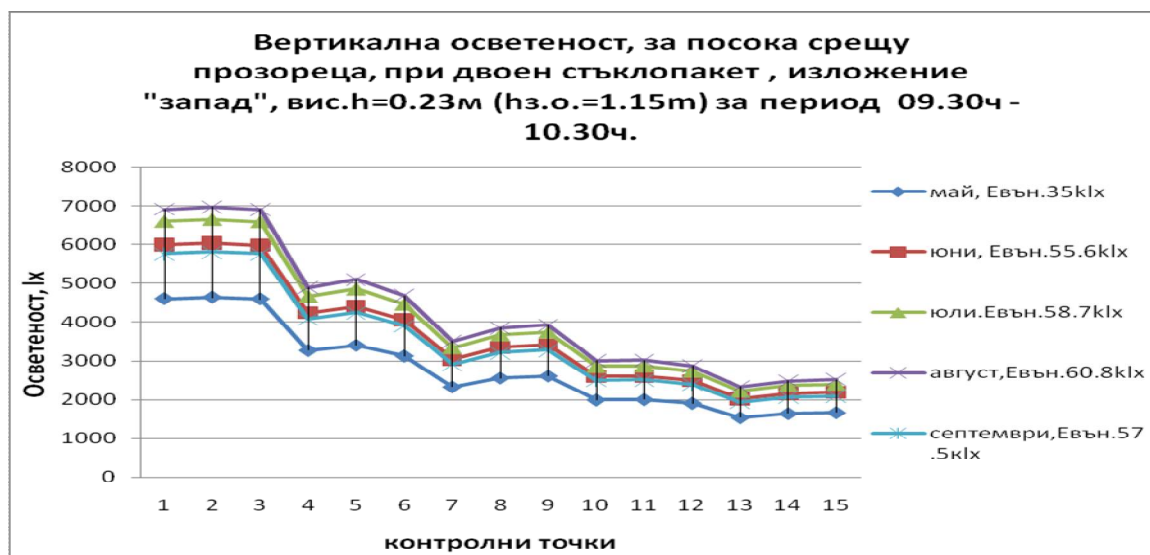
Фиг. 8



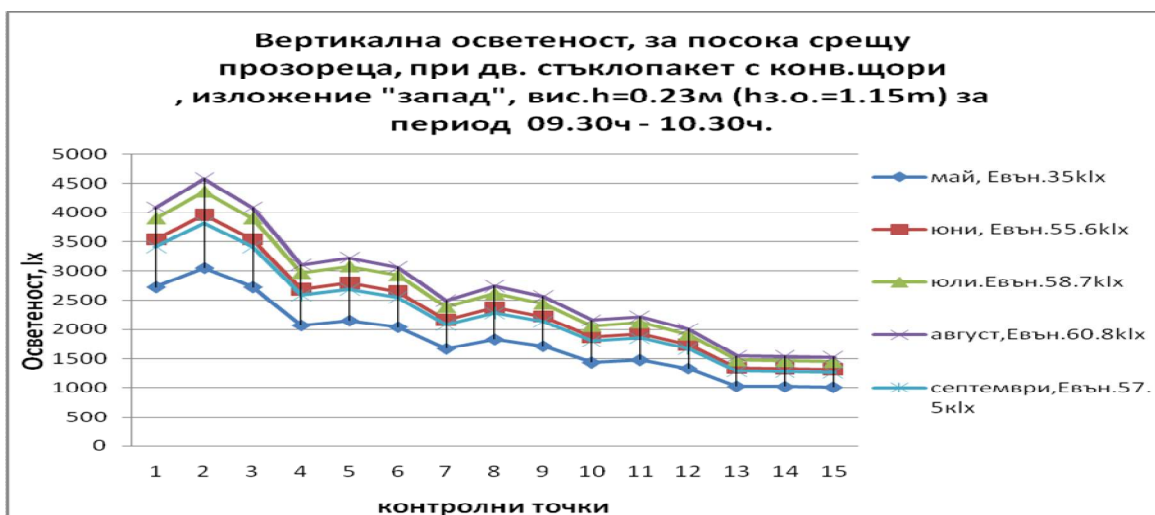
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12

Не на последно място, като се отчете и факта, че използваните слънцenasочващи щори са херметически изолирани от въздействието на околната среда, т.е не се нуждаят от допълнителни разходи за почистване , освен стандартните такива за почистване на всеки стъклопакет. Използваните примерни слънцenasочващо щори , могат да се използват и за покривно остъкляване, чрез завъртане на профилите на 90` или 180`в зависимост от ориентацията и от наклона на покривната конструкция.

3. Заключение

Оценка на използваните видове остъклявания.

Параметри	Слънцenasочващи щори	Двоен стъклопакет	Дв.стъклопакет с конв.щори
Височинен ъгъл на слънцето	- $\gamma \geq 60^\circ$ отразява напълно дир. компонента - $\gamma \geq 30^\circ$ насочва към тавана дир.компонента	Няма насочване	Няма насочване
Осветеност в зоната на остъкляването	Ниска	Много висока	Висока
Яркост в зоната на остъкляването	Ниска	Много висока	Висока
Визуален контакт	Има	Няма	Няма
Температура в помещението	Няма повишаване	Има повишаване	Има повишаване
Допълн.разходи за почистване	Няма	Няма	Има

Всичко изложено до момента подкрепя твърдението, че слънцenasочващите щори са приложими за географската ширина на България и гарантират повишаване на енергийната ефективност на ОУ, при непрекъснат визуален контакт с външната среда.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Directive 2002/91/CE of the European Parliament and of the Council on energy performance of buildings, December 2002.
- [2] VDI RICHTLINIEN 6011 – Optimierung von Tageslichtnutzung und kuenstlicher Beleuchtung, Grundlagen, August 2002.
- [3] DIN 5034 – Tageslicht in Innenraumen, Februar, 1983.
- [4] Бартенбах, К. Свет и здоровье, „Светотехника”, 2009, бр. 2.
- [5] Dipl. Ing. R. Baer, Dr. H. Billy, Dr. Ing. U. Carraro, Prof. Dr. Ing. D. Gall, Dipl. Ing. R. Schnor, Beleuchtungstechnik, Huss-Medien GmbH, Berlin, 2006.
- [6] Tageslicht und Kunstlicht, Licht.Forum 53.
- [7] Dipl. Ing. B. Tralau, Massnahmen zur Unterstuetzung der Qualitaetsbewertung von Beleuchtungsanlagen, Ilmenau, 2008.
- [8] Zwick, P., Celle, Beleuchtungsplanung unter Beruecksichtigung der DIN V 18599 und Enegrieeinsparverordnung (EnEV), Ilmenau, 2008.
- [9] Prof. Dr. Ing. A. Maas, Leiter des Fachgebiets Bauphysik im Fachbereich Architektur Stadtplanung, Landschaftsplanung der universitaet Kassel, Tageslicht und energieeffizienz, 2008.
- [10] Prof. H. Kaase, Dr. Ing. S. Aydinli, Dipl.-Ing.S.Gramm, Eine solide Datenbasis fuer Forschung, Technische Universitaet, Berlin, 2010.
- [11] Tageslicht 1/2010.

Автор: маг. инж. В. Кисьова- ф. „Лихт” ЕООД

РАЗВИТИЕ НА РЕКЛАМНО-ИНФОРМАЦИОННАТА СВЕТЛИННА СРЕДА В СЪВРЕМЕННИЯ ГРАД

Цветомир Конов, Теодор Кючуков

Резюме. Визуалната комуникация е една от формите на обществените комуникации, при която протича обмен на визуална информация и в този смисъл тя е преднамерен, съзнателно предприет акт. Рекламното и информационното осветление представляват съвременни средства за реализирането на визуалнокомуникационния процес. Светлината има физиологично и психологично въздействие върху човека – тя въздейства конкретно върху неговото поведение и настроение. Това предопределя първостепенното място на светлината в съвременната градска среда.

DEVELOPMENT OF THE INFORMATION LIGHTING ENVIRONMENT IN THE CONTEMPORARY URBAN AREAS

Cvetomir Konov, Teodor Kyuchukov

Abstract. In general, visual communication is one of the forms of public communication where exchange of visual information occurs. It is deliberate, intentional act undertaken. Light has physiological and psychological effect on human's behavior and mood. Thus advertising and information lighting is a powerful tool of the visual-communicational process. This determines the prime role of the light in the present urban environment.

1. Увод

В ретроспективен план, рекламното дело е присъствало още от древността. Доказателства за това свидетелстват разкопките на античния римски град Помпей, където ясно се открояват огромни фасади на сгради, под формата на рекламни пана, където са се предлагали характерните за този период продукти и услуги. По-късно, по време на средновековието, рекламните табели са се осветявали с факли. В края на XIX век, едва след появата на електрическата крушка на Томас Едисон, се създават условия за реализирането на първата светлинна реклама (с 2500 нажежаеми лампи), създадена в столицата на Германия – Берлин [1]. През периода 1910-1925 г. осезаемо влизат в употреба газосветещите тръбни светлинни източници, като до 1939 г. разнообразието от светлини с различен цвят надхвърля 30 вида. Днес рекламното и информационното осветление се реализира посредством широк спектър от съвременни светлинни източници и специални светлотехнически уредби.

2. Изложение

Задачите, които се поставят пред рекламното и информационното осветление са изключително разнообразни. Една от тях, която се е запазила от древността до наши дни е рекламирането на определени стоки, услуги и дейности. Не са редки случаите, когато архитектурно-художественото осветление изпълнява определени рекламни функции. Например една подходящо осветена фасада на търговски център има определено рекламно въздействие. В това число влиза и обозначаването на местонахождението на обществени и държавни институции, болници, аптеки, фирми, магазини, хотели, ресторанти и др. Информационно осветление е необходимо при управлението на градския обществен транспорт, при поставянето на сигнални-предупредителни светлини, сведения за транспортните връзки, метеорологични условия, полицейски и общински разпоредби, културни, спортни и развлекателни мероприятия, валутни сведения и др. Очевидно съвременното рекламно-информационно осветление е важно условие и предпоставка за активна дейност и през тъмните часове на денонощието, като създава спокойна атмосфера и увереност на гражданите.

В зависимост от вида, изпълнението и пространственото измерение, рекламно-информационните светлинни системи се класифицират съгласно блоковите схеми на фиг. 1.



Фиг. 1. Класификация на рекламно-информационни светлинни системи

I. ДВУИЗМЕРНИ (ФРОНТАЛНИ) ФОРМИ И КОМПОЗИЦИИ

1.1. Светлинни надписи, фигури и композиции

В същността си светлинните фирмени знаци се делят на три основни групи: логотипи, в които присъства само името на фирмата или само символа, или комбинация от двете. Най-често срещани са композициите, в които присъстват двата основни елемента: наименованието на организацията и символа. От своя страна символите могат да бъдат дефинирани като:

- § *геометрични форми*, към които спадат всички основни или производни на тях геометрични фигури;
- § *културните форми*, които представляват съвкупност от всички онези фигури, носещи пряка асоциация с обектите, които човека познава в реалния свят;
- § *абстрактните фигури*, които, въпреки че са непознати и странни за наблюдателя, носят в себе си силно въздействие и сами по себе си могат да бъдат лесно запомнени;
- § *комбинация от трите основни групи графични символи*, като е възможно взаимодействие между геометрична и културна форма, абстрактна и културна форма, геометрична и абстрактна форма.

Светлинните надписи, фигури и композиции са най-разпространените фронтални светлинни реклами в градската среда. В процеса на проектиране на светлинната реклама някои от изискванията към графичните дизайнери е логотипът да бъде ясен, четлив, характерен и лесно запомнящ се. Светлинното изпълнение се постига чрез балансиране на контраста между графичните елементи (букви, фигури, символи и др.). От своя страна контрастът може да бъде яркостен, цетови и комбиниран. С прилагането на комбинирания контраст се реализира синергично взаимодействие между яркост и цвят. Конкретно чрез яркостния контраст, постигнат с тъмни обекти на светъл фон или светли обекти на тъмен фон се формира силуетно („контражурно”) осветление.

Надписите се изписват линейно чрез газосветеци тръби, светловодещи фазерни оптични системи, светлодиодни (LED) кабели и ленти и други, разположени на предварително изградени носещи конструкции. Видът на буквено-цифровия шрифт се избира според цялостния замисъл на графичната композиция и светлинното оформление. Често се срещат решения с декоративни шрифтове, с единствената цел те да бъдат атрактивни и оригинални. Много често обаче тяхната четимост е затруднена и затова се прибягва към семейството на безсеровите шрифтове като “Кабел”, “Гротеск”, “Блок” и техните курсивни форми. Чистата и ясна форма на графемите е важно условие за лесното и бързо разпознаване и разчитане на светлинната реклама. Тук стои и въпросът за практическата употреба на ***кирилските и латинските шрифтове*** и използването на специализиран софтуер в областта на графичния дизайн и визуалните комуникации. Най-често допусканата грешка е безразсъдното деформиране на формата на графемите - признак за графична неграмотност [2,3]. Освен това следва да се налага българският национален стил и култура чрез изписването и светлинното представяне на българските

търговски марки на кирилица. Добър пример за това е Италия, където световно наложеният английският език е потънал в забвение и доминиращата част от търговските марки се изграждат през призмата на италианския национален стил и култура.

След избора на език на изписване на наименованието, подходящ шрифт, и изграждането на семантично ориентиран фирмен знак, следва да се изгради етапно цялата композиция.

Етапи на изграждане на композицията на светлинното средство:

А. Пропорциониране. Пропорционирането на художествено-естетичните форми и композиции е важен творчески акт при двумерното формообразуване [4]. Осъществяването му е свързано с прилагане на специфични знания и умения, свързани с пропорцията и по специално с ролята на светлината: а) предпоставки и условия за избор на подходящи пропорции на светлинно изявените елементи; б) генериране на единен светлинен пропорционален строй; в) прилагане на похвати за хармонично светлинно изграждане на композиции, с помощта на хармонични редове от числа.

Б. Мащабиране. Мащабирането на цялата композиция при оразмеряването на светлинните логотипи включва адаптиране на светлинната реклама към мястото, което ще заеме – колкото е по-високо разположена, толкова по-голяма тя трябва да бъде. Мащабът и пропорцията притежават органична връзка помежду си и това трябва да се има предвид, когато се решават подобни проблеми.

В. Цветово изграждане. Цветовото изграждане на светлинната композиция трябва да бъде съобразено, както с дейността на рекламираната организация, така и с колорита на символите на нейните преки конкуренти. Изборът на добре подбрани цветове често спомагат за открояването и лесното идентифициране на рекламираната организация в и без това пъстрата градската среда. Не трябва да се пропуска и психологичното въздействие на цветовете и асоциациите, които интуитивно възникват в съзнанието на наблюдателите [5]. Уеднаквяването на използваните цветове за тематично близките обекти несъмнено допринася за по-бързата ориентация на наблюдателите и по-високата надеждност на светлинно-информационната среда. Адекватното и психологически мотивирано съчетаване на хроматичните и ахроматичните цветове позволява реализирането на широка гама от брандове с добре изявена маркова идентичност. Съвременните светлинни системи, базирани основно на газосветещи тръби, светловодещи фазерни оптични системи, светодиодни кабели и ленти позволяват постигането на впечатляващи дизайн решения (конкретно при светодиодните системи могат да се реализират практически неограничен брой цветови нюанси).

Г. Динамично въздействие на светлината (по яркост и цветност във времето)

- непроменливо активно въздействие – без промяна на яркостта и цвета във времето;
- динамично въздействие:

§ динамично – непрекъснато изменение на яркостта във времето;

- § динамично – непрекъснато изменение на цвета във времето;
- § динамично – програмирано включване и изключване във времето;
- § динамично – програмирано изменение на цвета във времето;
- § динамично – в синхрон със силата и височината на звука;
- § динамично – импулсно включване и изключване;
- § комбинации

Светлинната динамика трябва да се съобразява с психо-физиологичните особености на човешкото възприятие - индивидът е склонен да фокусира вниманието си към пулсиращите светлинни източници, но до голяма степен те натоварват зрителния орган и затова светлинната пулсация трябва да бъде внимателно дозирана.

Д. Стратегическо местоположение и ориентация. Позиционирането на светлинната реклама трябва да осигури условия за добра видимост от възможно най-голям брой хора. Следва да се установят стратегическите точки на наблюдение на рекламния обект, обхвата на зрителното поле на наблюдателя, особеностите на централното и периферното зрение. “Апетитни” места за позиционирането на рекламните обекти са високите сгради (с видимостта от голямо разстояние), зони с интензивно движение като търговски улици, обособени пространства около театри, кина, учебни заведения, спортни зали и стадиони, административни сгради, главни спирки на обществения транспорт, автобусни и ж.п. гари, аерогари. В тази връзка рекламните панели, разположени в непосредствена близост до транспортните магистрали и артерии, също имат съществено рекламно влияние, но те често отвличат вниманието на водачите на моторни превозни средства - предпоставка за пътнотранспортни произшествия. В някои страни от Европейския съюз рекламите по пътищата са забранени със закон, но в България все още не са взети тези мерки.

Е. Ограничаване на светлинното замърсяване. Светлинните рекламни средства, особено тези с голяма яркост и динамика излъчват и разпиляват неконтролиран светлинен поток в тъмното пространство – възниква т. нар. светлинна емисия. В резултат на това се получава светлинно сияние – разсеяната изкуствена светлина в небосвода. Наред със светлинното замърсяване на околната среда, вредно е и замърсяването на обществената среда от разпиляната, неправилно насочена външна нахлуваща светлина, възприемана като неприятна, дразнеща, досадна, дискомфортна, натрапчива, смущаваща светлина. Тя не е насочена към небосвода, а е навлизаща през прозорците на жилищните и друг тип сгради, попадаща на работните места, осветяваща дворовете и други обекти, които са частна собственост. Такава е и натрапчиво въздействащата ярка светлина на външните осветителни уредби при поглед в посока към открити площи.

1.2. Светлинни фирмени табели, информационни табла, рекламни пана

Доминираща част от рекламно-информационното осветление заемат фирмените табели, рекламните пана и информационните табели и табла. В общ вид този тип светлинна реклама представлява кутия с произволна форма, чиято фронтална стена пропуска светлина. Светещите панели са от полупрозрачно матово стъкло или плексиглас и върху тях се разполагат (рисуват или залепят)

букви, фигури, композиции, картини, осветени отвътре от равномерно разположени светлинни източници. За да се постигне по-голям контраст на светлинното изображение в някои случаи се прибегва към поставянето на тъмни фигури на светъл фон или обратно – светли фигури на тъмен фон. Това спомага за по-добрата четимост на изображението от по-голямо разстояние. И тук проектирането на светлинните надписи е съпътствано с решаването на определен ред от визуалнокомуникационни, естетически, технически, проектни и експлоатационни, териториалноустройствени задачи:

- § графичен дизайн на търговската марка (логотипа);
- § изграждане на дневната и нощната визия на светлинния рекламен обект;
- § избор на местоположение и ориентация на рекламния обект, в т.ч. съгласуване със собствениците на сградата и с общинските органи;
- § инвестиционно електротехническо проектиране;
- § експлоатация и поддръжка (обслужване) на светлинния рекламен обект.

За постигане на равномерност на осветлението на рекламното табло се прилагат осветителни тела, монтирани на конзоли, на определено разстояние от осветяваната повърхност. Препоръчва се използването на осветителни тела от прожекторен тип с халогенни нажежаеми лампи, метал-халогенни лампи или със светодиоди. На фиг.2 е представена систематизационна таблица със светещи рекламно-информационни решения.

ВЪНШНО БАЗИРАНИ СВЕТЛИННИ РЕКЛАМНО- ИНФОРМАЦИОННИ РЕШЕНИЯ				
ВЪТРЕШНО БАЗИРАНИ СВЕТЛИННИ РЕКЛАМНО- ИНФОРМАЦИОННИ РЕШЕНИЯ				
СВЕТЛИННИ ТАБЕЛКИ				
СВЕТЕЩИ БУКВИ				
СВЕТЕЩИ ЛОГОТИПИ				
СВЕТЕЩИ КАНТОВЕ				

Фиг. 2. Систематизационна таблица на светещи надписи

1.3. Светещи електролуминесцентни ленти и повърхности

Светещото фолио е кондензаторен електролуминесцентен светлинен източник (трислоен - два електрода и фосфорен слой между тях). Рекламното послание се оформя на винилитово самозалепящо се фолио, което се поставя над конструктивните слоеве. Цветът на светлината на фосфора може да бъде синя, зелена или бяла. Дебелината на светещото фолио е съпоставима с тази на лист хартия, като може да се оформи като двустранно светеща лента с дебелина на обикновен картон. Яркостта на фолиото осигурява добра видимост от голямо разстояние, при смрачаване и при наличието на валеж, мъгла или дим. Светещото фолио излъчва собствена светлина, но не може да се приложи за осветяване на предмети или пространства. Светещото фолио се включва към електрическата мрежа с електронно електрозахранващо устройство (драйвер) с малки размери (кибритена кутийка), което може да бъде монтирано на подходящо място на значително разстояние от фолиото (50-60 m). Има светлинен добив 10-15lm/W. Светещото фолио може да се използва във влажна среда, устойчиво е на влага, вибрации и удари и е вандалоустойчиво, пожаробезопасно и не изисква специално обслужване [1].

Предвид описаните качества електролуминесцентните ленти и повърхности са особено подходящи за реализиране на светлинни рекламно-информационни решения, залепени на външните стени на автобуси, трамваи, тролейбуси. Светещото фолио намира приложение за светлинно оформление и в салоните на транспортните средства, помещения, като контурно осветление на щандове, витрини, светлинно маркиране на тунели и др.

1.4. Медиятектура, телевизионни стени и светлинни прожекции

Едно от предизвикателствата в архитектурата на XXI век е интегрирането на медийни технологии във фасадата на сградите по начин, по който да се установи „органична” симбиоза между медийните панели и архитектурата[6]. Изграждането на концептуалния дизайн на медийна фасада е индивидуален процес, уникален за всеки проект, изискващ не само адаптиране на медийния дисплей към размерите на определена фасада, а осигуряване на естетически съгласувана взаимовръзка между отделните елементи. Това дава началото на т.нар. „медиятектура” – прозрачна фасада, която осигурява хармоничен синтез между архитектурата и медиите.

Появата на медийните фронтални картини и изображения върху монументалните фасади създава емоционална връзка между наблюдателите и архитектурата. Добавянето на тази динамика във визията на фасадата дава нова естетическа стойност на архитектурата. В много случаи тази нова тенденция конкурира тежките конструкции на познатите до този момент фирмени табели и информационни табла и много вероятно тя ще доминира в близко бъдеще. Практически осъществяването на медиятектурата става посредством светлодиодните технологии LED и OLED (*Organic Light Emitting Diode*), които откриват широки възможности за реализиране на рекламно-информационни решения на телевизионни стени и прожекции с висока визуалнокомуникационна ефективност и с естетическо въздействие. От съществено значение е разстоянието между светлодиодите, т.е. каква

резолюция (ниска или висока) на изображението е възможно да се постигне. Например, ниска резолюция може да се използва за показване на анимирана графика излъчвана от голяма фасада, като така ще увеличи своите комуникативни възможности. От гледна точка на по-малко разходи, висока резолюция е по-вероятно да бъде използвана при по-малки повърхности. Такива медийни фасади са особено функционални, когато потребителят на дадена сграда желае да комуникира с околния свят и да представи дейността на своята компания. Съществуват четири категории медийни фасади, базирани на цифрови технологии:

§ Интерактивни (interactive) медийни фасади. Възможността за взаимодействие с околния свят е една от съществените характеристики на цифровите медии. Присъствието на потребители и посетители въздейства върху работата на медийния дисплей и върху възприемането и идентификацията на медийната фасада и на представяното информационно съдържание. Възможностите за диалогово (игрово) взаимодействие и участие в дизайна превръща медийната фасада в интегриран компонент в градската среда. Интерактивната медийна фасада привлича вниманието, както на активните участници, така и на пасивните наблюдатели. Възможностите за взаимодействие се разширяват с нов интерфейс: мобилни телефони, преносими компютри и други мобилни устройства. В комбинация с медийната фасада, разпознаването на камера или интерфейс директно върху фасадата създава тотално ново вълнуващо пространствено измерение.

§ Автоматични (auto-active) медийни фасади. Дигитални изображения, видеоматериали, анимиран текст и графика се представят автоматично на медиен екран. Цифровият материал се управлява чрез специален модул за управление и контрол съобразно индивидуалните изисквания на клиента. Автоматичният медиен монументален дисплей е подходящ за представянето на визуална информация за обществено значими събития, фирмени рекламни презентации и др. Система за автоматично управление осигурява повторение, комбиниране и промяна в последователността на наличните визуални изображения.

§ Реактивни (reactive) медийни фасади. Чрез цифровата медия на медийните фасади се представя директна картина на събитията в град или околността му. С помощта на камери, сензори и съвременни софтуерни технологии, външните параметри се регистрират в реално време и се изобразяват върху медийните фасади. Така медийната фасада реагира на промените на външните фактори: състояние на времето; светлинните условия; звуци в околното пространство; транспортен трафик; други фактори. Ето защо медийната фасада се превръща в „пропусклива мембрана“. Външните фактори оказват влияние върху „кожата“ на сградата, като по този начин се „абсорбира“ от нея и се отразява. За разлика от класическите филми, които имат определено начало и край, реактивно-медийното съдържание не е времево ограничено, а се генерира наново всяка секунда. Качеството на реактивно-медийното съдържание, представено на медийната фасада се определя от влиянието на външните фактори, както и от подходяща „хореография“ на генерираните

изображения в дълъг период от време. Затова реактивно медийното съдържание е добра основна концепция на медийните фасади.

§ Комбинирана (integrated) медийна фасада. Интегрирането на автоматичната програма с тази на интерактивната или реактивната медийна фасада позволява разширяване на възможностите на всяка от тях и увеличаване на ефективността на светлинното рекламно въздействие.

II. ТРИИЗМЕРНИ ФОРМИ И КОМПОЗИЦИИ

Триизмерните светещи рекламни и информационни обемни конструкции са неизменна част от съвременния градски ландшафт. Те притежават особено очарование, което се изразява в разнообразни оригинални триизмерни форми и композиции.

Традиционно конструктивното изпълнение на светещо табло е осветено отвътре. Едната или в някои случаи и двете големи челни стени на паралелепипеда (кутията) са матирани и пропускат светлината, докато страничните тесни стени са непрозрачни. Върху матираната светеща повърхност може да се показват статични или динамични пана (плакати), под формата на текстова информация, цветни картини, фигури, знаци и др. При външно разполагане, монтажната конструкция се оразмерява на максималното ветрово натоварване. Страничните стени са обикновено метални или пластмасови, като вътрешната им повърхност се оцветява обикновено в бяло за по-добро отражение на светлината или се покрива с огледалноотразяващо фасетно фолио.

Освен самостоятелно, светещите табла се срещат и като интегрална част на други обекти, като напр. главните спирки на градския транспорт. Спирките на обществения градски транспорт са изключително подходящо място за рекламно-информационно осветление, защото чакайки, пътниците насочват своето внимание към двустранно светещите рекламни пана. В тези места пътничкопотокът е сравнително голям и следователно информацията разположена на светещите табла се разпространява бързо и ефективно. Светещите табла са утвърден атрибут, присъстващи и на вестникарските будки, като обикновено съдържат рекламни послания от издателите на продаваните вестници и списания.

Освен едностранно и двустранно светещи табла напоследък се срещат оригинални рекламни принтони с разнообразни обемни форми, като от всички страни повърхността им е светеща. Вътре в светещата кутия са разположени светлинните източници. Това обикновено са тръбни луминесцентни лампи или светлодиодни матрици. Светещата повърхност трябва да бъде дифузно пропускаща, с равномерна яркост, като не трябва да личат и прозират светещите елементи.

В подлезите на големите градове, а също в редица заведения се срещат „плоски” принтони със светеща повърхност - плоскост от специален акрилглас. При осветяването на ръба на плоскостта, изкуствената светлина се разстила по дължината на цялата плоскост и тя свети равномерно. За тези принтони е целесъобразно използването на тръбни луминесцентни лампи със собствен вътрешен рефлектор за насочено излъчване на целия светлинен поток;

светодиоди, които са с малки размери и удобно се закрепват по ръба на светещата повърхност. Подобно техническо решение се прилага и за изработване на светещите панели на аварийни осветителни тела за евакуация - от двете повърхности на светещата плоскост са залепени фолия с нанесени знаци, указващи аварийните изходи.

Витринното осветление също допринася за атрактивния облик на градската среда. То служи за визуализация на изделия без директен достъп до тях. Витрините освен в търговската мрежа се срещат и в музеи, училища, ресторанти, производствени помещения, обществени сгради и др. В зависимост от мястото, което заемат витрините биват: а) външни (с визуален достъп отвън); б) вътрешни (с визуален достъп отвътре; имат рекламно, информационно или декоративно предназначение); в) комбинирани (с визуален достъп отвън и отвътре). Според начина на осветяване и наблюдение биват едностранни и двустранни. Във витринното осветление се прилага: а) общо осветление; б) ключово осветление, създаващо акценти към определени изделия; в) комбинирано – комбинация от общо и ключово. Използват се тръбни или компактни луминесцентни лампи, светодиоди, фиброоптика, газосветещи тръби, халогенни нажежаеми лампи и др. Осветителните тела за общо осветление трябва да бъдат с директно или предимно директно светлоразпределение, а тези за ключовото осветление – със силно концентрирано светлоразпределение. При избора на светлинен източник се съобразява допустимостта на инфрачервено и ултравиолетово лъчение, както и необходимостта от точно възприемане на цветовете. Светещите елементи трябва да са невидими от наблюдателите.

На свой ред медиятекстурата също може да бъде разгледана като пример за триизмерна светлинна реклама. Това може да бъде постигнато като светлинно се „облече” частично или напълно определена сграда.

Освен статични светлинни реклами съществуват и техни мобилни еквиваленти. В наши дни се наблюдават мобилни превозни средства, които имат не малка роля в рекламната дейност. Те представляват комбинация от каросерия на средно тежкотоварен автомобил, в задната част на който е поставена светлинна прозрачна стъклена кутия, подобна на описаните по-горе примери. В този случай отново се използват луминесцентни лампи, разположени в страничните рамки на конструкцията, които осветяват рекламните пана. Като допълнителен елемент е присъствието на рекламни лица в тези прозрачни кутии, които активно рекламират определен продукт или услуга директно на пътното платно. Не малко са и случаите, в които превозните средства са осветени отвън - такъв пример са рекламните камиони на фирмата, произвеждаща безалкохолни напитки “Кока Кола”. Срещат се и отделни ремаркета имащи същия облик и изпълнение.

3. Заключение

Рекламно-информационната светлинна среда е интегрална част от модерния градски облик. Тя е претърпяла развитие, както като светлинна

елементна база и конструктивно изпълнение, така и като композиционни похвати, функционални възможности и ефективност на въздействие.

По-важните резултати от настоящата работа са:

1. Предложена е класификация на рекламно-информационните светлинни системи – двуизмерни и триизмерни форми и композиции.
2. Разработени са препоръки за етапността при изграждането на рекламните и информационни светлинни решения, както и особености на тяхната техническа реализация.
3. Дефинирани са основните характеристики на водещите рекламно-информационни светлинни средства: фирмени табели, информационни табла, рекламни пана, светещи електролуминесцентни ленти и повърхности, светещи обемни конструкции, медийни фасади, рекламни превозни средства.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Василев, Н., И. Василева. Архитектурно, художествено и рекламно осветление. София, ABC Техника, 2007
- [2] Молнар, В. Изпитания” за кирилицата в съвремението. Научни трудове. Екология и опазване на околната среда. Промислен дизайн. Том 41, серия 1.3. Русенски университет „Ангел Кънчев”, 2004
- [3] Йончев, В., Олга Йончева. Древен и съвременен български шрифт. Български художник, София, 1982
- [4] Орлов, Н. Пропорциониране на форми, изделия и композиции с помощта на естетически критерии. Giugiaro и Ние. Промислен дизайн 2. Катедра „Промислен дизайн”, Русенски университет „Ангел Кънчев”, 1996
- [5] Кючуков, Р., Т. Кючуков. Системен светлинен дизайн на монументални обекти. Русенски университет «Ангел Кънчев», 2009
- [6] Types of Media Content Display Design. Ag4 media facade GmbH. Cologne, Germany, 2006. <http://www.medienfassade.com>

Автори: доц. инж.-дизайнер Цветомир Конов, маг. инж. дизайнер Теодор Кючуков - Русенски университет “Ангел Кънчев”, кат. “Промислен дизайн”

WEB БАЗИРАНА СИСТЕМА ЗА ЕНЕРГИЙНИ ОДИТИ НА ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ

Садетин Басри, Радослав Кючуков

***Резюме.** Енергийният одит е необходимо изискване за всяка по-голяма действаща фирма, независимо от дейността и. В настоящия доклад се предлага WEB базирана система за нуждите на практическото изпълнение на енергийните одити на осветителни уредби.*

WEB BASED SYSTEM FOR ENERGY AUDITS OF LIGHTING SYSTEMS

Sadetin Basri, Radoslav Kyuchukov

***Abstract.** Energy audit is a necessary requirement for any larger operating company regardless of its activity. This report offers a WEB based system for the needs of practical implementation of energy audits of lighting systems.*

1. Въведение

При извършване на енергийни одити на осветителни уредби, обективната оценка на използваемостта на изкуственото осветление е необходимо да бъде извършена за конкретно помещение с конкретна критична осветеност, за конкретен район на България, за конкретен режим на работното време, за конкретна система на заплащане на електрическата енергия (тарифни зони, зададен денонощен часов график, ценообразуване).

Енергийно-икономическите показатели на изкуственото осветление, използвани при енергийните одити на осветителни уредби трябва да бъдат в денонощен, месечен и годишен разрез. Също така е необходимо да бъдат съобразени с разположението на съответния географски пункт, критичната естествена осветеност на съответното помещение и тарифната система за електрическата енергия.

2. Цел и задачи

Целта на настоящата работа е разработване на WEB базирана система за нуждите на практическото изпълнение на енергийните одити на осветителни уредби.

За постигането на целта се решават следните задачи:

1. Определяне модела на изменение на дневното естествено осветление;
2. Построяване на усреднени месечни криви на изменение на дневното естествено осветление;

3. Определяне на енергийно-икономическите показатели на изкуственото осветление;
4. Разработване на WEB базирана система за енергийни одити на осветителни уредби (енергиен светлинен калкулатор).

3. Изложение

При определянето на модела на изменение на дневното естествено осветление се изхожда се от факта, че хоризонталната външна естествена осветеност на открита площ при еднакви условия на наблюдение не зависи от географския пункт на наблюдение, а е еднозначна функция на: височината на Слънцето; облачността (вид дни по обща облачност; вид облаци; плътност на облачната покривка); отражателната характеристика на терена (с и без снежна покривка) и прозрачността на въздуха.

За определянето на модела на изменение на дневното естествено осветление са използвани следните бази от данни:

1. База от данни за височината на Слънцето за 15-то число от всички месеци от годината за 27 географски пункта на територията на България.

2. База от данни за дневната естествена осветеност на открита площ в зависимост от:

- Ø височината на Слънцето;
- Ø видът дни по обща облачност (ясен, облачен, мрачен);
- Ø видът облаци по международната класификация;
- Ø плътността на облачната покривка в балове по международната скала;
- Ø отражателната характеристика на терена (с или без снежна покривка);
- Ø състояние на слънчевия диск (скрит зад облаци или открит);

3. База от данни, съдържаща стойности на вероятността за поява (тегла) на следните характерни показатели за всеки географски пункт [1] (съгласно метеорологичната статистика):

- Ø вероятност за слънчево грееене;
- Ø вероятност за степен на плътност на облачната покривка;
- Ø вероятност за поява на определен вид облак;
- Ø вероятност за поява на определен вид ден;
- Ø вероятност за наличие на снежна покривка;

Височината на Слънцето за всеки географски пункт в България са пресметнати съгласно местното слънчево време. Всички останали пресмятания, свързани със задаване на началото и края на работното време, тарифните зони за заплащане на електрическата енергия, въвеждането на лятно часово време, се задават по скалата на поясното време (източноевропейско време).

Моделът на изменение на дневното естествено осветление през часовете от денонощието е представено, чрез усреднени месечни криви на изменение на дневната естествена осветеност. Усреднените криви са построени за среднестатистическите условия на дневното естествено осветление в съответния район за 15-то число на всеки месец от годината. По усреднените

месечни криви се определят моментите на включване и изключване на изкуственото осветление [2, 3].

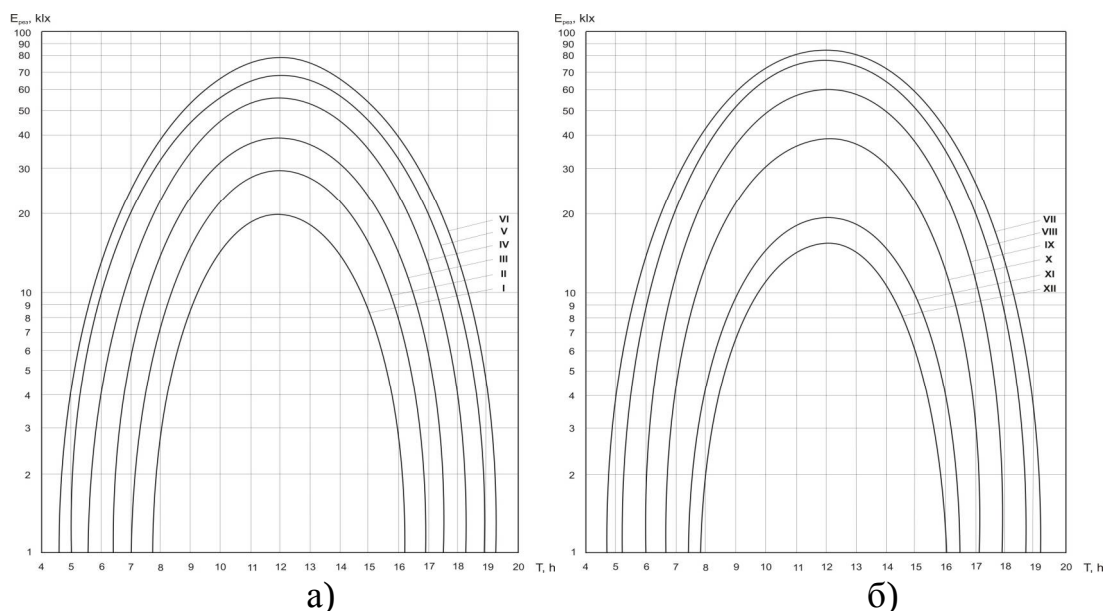
Използвайки горепосочените бази от данни са построени усреднените месечни криви на изменение на дневната естествена осветеност.

Методът за построяване на усреднени месечни криви на изменение на дневната естествена осветеност е базиран на следните операции:

1. Определяне на резултантната дневна естествена осветеност $E_{рез}$, klx върху хоризонтална повърхност;
2. Построяване на усреднени месечни криви на изменение на резултантната дневна естествена осветеност върху хоризонтална повърхност във функция от височината на Слънцето, $E_{рез,i} = f(h_o)$;
3. Построяване на усреднени месечни криви за изменение на височината на Слънцето във функция от часовете от денонощието, $h_o = f(T)$;
4. Построяване на усреднени месечни криви на изменение на резултантната дневна естествена осветеност върху хоризонтална повърхност във функция от часовете от денонощието - $E_{рез,i} = f(T)$.

По горепосочения начин са определени моделите на изменение на дневното естествено осветление и са построени усреднени месечни криви на изменение на дневната естествена осветеност за 27 географски пункта в България. Последните са използвани за определянето на енергийно-икономическите показатели на изкуственото осветление.

На фиг. 1 са дадени усреднени месечни криви на изменение на дневната естествена осветеност за района на гр. Русе.



Фиг. 1. Усреднени месечни криви на изменение на дневната естествена осветеност за град Русе

а – за месеци януари...юни (I ... VI); **б** – за месеци юли ... декември (VII ... XII)

В табл. 1 са дадени стойностите на регресионните коефициенти на модела на изменение на дневното естествено осветление E , klx върху хоризонтална повърхност в зависимост от часа на денонощието за гр. Русе.

Таблица 1

Стойности на регресионните коефициенти на модела на изменение на дневната естествена осветеност E , klx върху хоризонтална повърхност в зависимост от часа на денонощието за гр. Русе

Месец	Зони на критичната осветеност	Стойности на регресионните коефициенти на математичния модел			Статистически показатели					
		b_0	b_1	b_2	Коефициент на корелация r	F – критерий на Фишер	Стандартна грешка на оценката σ_e	t-критерий на Стюдент		
		b_0	b_1	b_2				b_0	b_1	b_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Януари	до 5 klx	-12,920497	3,054990	-0,127291	0,962	88	0,057	-10,499	13,287	-13,290
	над 5 klx	-2,275902	1,102836	-0,045952	0,970	159	0,030	-6,547	17,827	-17,841
Февруари	до 5 klx	-14,302840	3,483732	-0,145155	0,883	26	0,101	-5,854	7,256	-7,256
	над 5 klx	-1,295553	0,972289	-0,040512	0,976	248	0,038	-5,439	22,246	-22,285
Март	до 5 klx	-10,597587	2,913175	-0,121382	0,953	70	0,064	-8,971	11,872	-11,873
	над 5 klx	-0,158573	0,797654	-0,033236	0,985	471	0,036	-1,141	30,610	-30,712
Април	до 5 klx	-9,430195	2,881201	-0,120050	0,927	44	0,079	-6,902	9,409	-9,410
	над 5 klx	0,556482	0,703681	-0,029320	0,987	684	0,044	5,513	36,768	-36,991
Май	до 5 klx	-9,179522	3,050687	-0,127112	0,951	67	0,065	-8,481	11,645	-11,646
	над 5 klx	1,176245	0,610560	-0,025440	0,989	898	0,044	15,572	42,052	-42,397
Юни	до 5 klx	-8,138752	2,919710	-0,121655	0,951	67	0,065	-8,182	11,626	-11,627
	над 5 klx	1,442899	0,576841	-0,024035	0,989	993	0,046	21,347	44,148	-44,577
Юли	до 5 klx	-8,478070	2,962101	-0,123421	0,951	67	0,065	-8,285	11,632	-11,633
	над 5 klx	1,185615	0,632016	-0,026334	0,986	844	0,054	14,656	40,719	-41,098
Август	до 5 klx	-10,294096	3,193965	-0,133082	0,951	68	0,065	-8,755	11,667	-11,668
	над 5 klx	0,574662	0,734187	-0,030591	0,980	535	0,063	4,879	32,513	-32,735
Септември	до 5 klx	-12,790551	3,55079	-0,146878	0,951	68	0,065	-9,243	11,717	-11,718
	над 5 klx	-0,026391	0,811300	-0,033804	0,986	715	0,049	-0,227	37,588	-37,817
Октомври	до 5 klx	-13,399032	3,397834	-0,141576	0,994	544	0,023	-26,281	33,001	-33,004
	над 5 klx	-0,842829	0,916215	-0,038176	0,978	317	0,045	-4,295	25,147	-25,217
Ноември	до 5 klx	-11,507134	2,843314	-0,118471	0,973	127	0,048	-12,300	15,967	-15,971
	над 5 klx	-1,173542	0,918154	-0,038256	0,982	322	0,030	-5,746	25,320	-25,379
Декември	до 5 klx	-14,002662	3,218736	-0,134114	0,962	89	0,057	-10,756	13,391	-13,394
	над 5 klx	-2,028703	1,044064	-0,043503	0,979	235	0,021	-7,402	21,670	-21,692

Забележка: Изведените регресионни модели на изменение на ДЕО са от вида: $\log E = b_2 \cdot x^2 + b_1 \cdot x + b_0$

Взаимното обвързване на нормите за естествено и изкуствено осветление, с оглед осигуряване на нормените количествени показатели на осветлението в помещенията през светлата и тъмна част от денонощието, се извършва чрез критичната външна естествена осветеност $E_{кр}$, klx или lx [3, 4]:

$$E_{кр} = \frac{E_m}{e_m} 100, \quad (1)$$

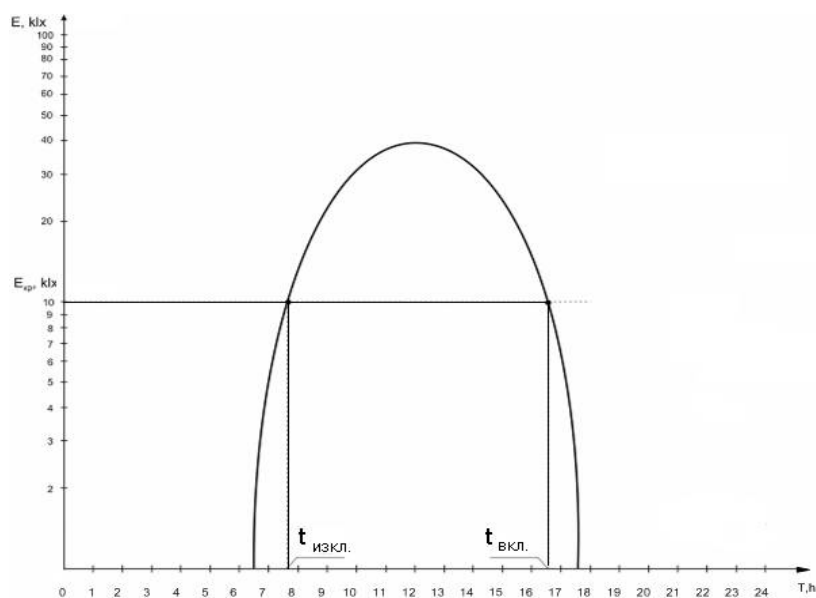
където E_m е експлоатационната осветеност за изкуствено осветление, klx или lx;

e_m - експлоатационната стойност на коефициента на естествено осветление, %.

Критичната естествена осветеност е тази външна естествена осветеност (на открита площ, от целия небосвод), при която се получава изравняване на естествената осветеност вътре в помещението с експлоатационната осветеност от изкуственото осветление. Ако включването и изключването на изкуственото осветление се осъществи при достигане на критичната естествена осветеност (т.е. ако изкуственото осветление се използва само когато естествената осветеност се понижи под критичната ѝ стойност), светлинният климат в

помещенията ще съответства на нормите за естествено и изкуствено осветление.

Принципа за определяне на енергийно-икономическите показатели на изкуственото осветление е илюстриран, чрез диаграмата представена на фиг. 2.



Фиг. 2. Диаграма съгласно принципа за определяне на енергийно-икономическите показатели на изкуственото осветление

Чрез използване на усреднените месечни криви и критичната естествена са определени следните енергийно-икономическите показатели за вътрешно осветление [2, 3]:

Ø Използваемост на вътрешното осветление по тарифни зони - $T_{ди1}, T_{ди2}, T_{ди3}$;

Ø Средноденонощна използваемост на вътрешното осветление;

Средноденонощната продължителност на включване на изкуственото осветление се определя според системата часово време, прилагана през съответния месец (поясно или лятно).

При поясно часово време е:

$$T_{ди}^{(п)} = T_{ди1}^{(п)} + T_{ди2}^{(п)} + T_{ди3}^{(п)}, h \quad (2)$$

При лятно часово време е:

$$T_{ди}^{(л)} = T_{ди1}^{(л)} + T_{ди2}^{(л)} + T_{ди3}^{(л)}, h \quad (3)$$

Ø Средномесечна използваемост на вътрешното осветление;

Средномесечната продължителност на включване през i -тия месец от годината $T_{ми}$ ($i = 1 \dots 12$) се определя в съответствие с:

а) Общият брой работни дни през месеца $N_{РАБi}$;

б) Броят работни дни през месеца, съответно по пояското и по лятното часово време $-N_{РАБi}^{(п)}$ и $N_{РАБi}^{(л)}$, като:

$$N_{рабi} = N_{рабi}^{(п)} + N_{рабi}^{(л)} \quad (4)$$

Тогава,

$$T_{ми} = (T_{ди1}^{(п)} + T_{ди2}^{(п)} + T_{ди3}^{(п)}) \cdot N_{РАБi}^{(п)} + (T_{ди1}^{(л)} + T_{ди2}^{(л)} + T_{ди3}^{(л)}) \cdot N_{РАБi}^{(л)}, h \quad (5)$$

където индексиранието "(п)" и "(л)" се отнася за показателите съответно по поясното и по лятното часово време.

Ø Средногодишна използваемост на вътрешното осветление;

Средногодишната продължителност на включване на изкуственото осветление T се определя чрез сумиране стойностите на средномесечната такава:

$$T_{\Gamma} = \sum_{i=1}^{12} T_{mi} \cdot h \quad (6)$$

Целесъобразно е освен общата (сумарно за трите тарифни зони) средногодишна продължителност на включване на изкуственото осветление да се определя и средногодишната продължителност на включване на изкуственото осветление поотделно за всяка тарифна зона - нощна, дневна, върхова, съответно T_1, T_2, T_3 , като

$$T_{\Gamma} = T_{\Gamma 1} + T_{\Gamma 2} + T_{\Gamma 3}, h \quad (7)$$

Продължителността на включване на изкуственото осветление се определя в зависимост от: сменността на производството (в общия случай в зависимост от началото и края на работното време, режима на прекъсванията на същото за почивка, възможността за прекъсване на производствения процес и др.); критичната естествена осветеност на помещението; системата часово време; географския пункт (характеризиран от неговата географска ширина и неговите климатични условия).

Ø Средномесечна цена на електрическата енергия;

$$\beta_{\text{ср.мес}} = \frac{b_1 \cdot T_{M1} + b_2 \cdot T_{M2} + b_3 \cdot T_{M3}}{T_M}, \text{ лв/kWh} \quad (8)$$

Ø Средногодишна цена на електрическата енергия;

$$\beta_{\text{ср.год}} = \frac{b_1 \cdot T_{\Gamma 1} + b_2 \cdot T_{\Gamma 2} + b_3 \cdot T_{\Gamma 3}}{T_{\Gamma}}, \text{ лв/kWh} \quad (9)$$

Ø Относителен месечен разход на електрическа енергия за 1 kW електрически осветителен товар;

$$C_{\text{мес}} = \beta_{\text{ср.мес}} \cdot T_M, \text{ лв/kW} \quad (10)$$

Ø Относителен годишен разход на електрическа енергия за 1 kW електрически осветителен товар;

$$C_{\text{год}} = \beta_{\text{ср.год}} \cdot T_{\Gamma}, \text{ лв/kW} \quad (11)$$

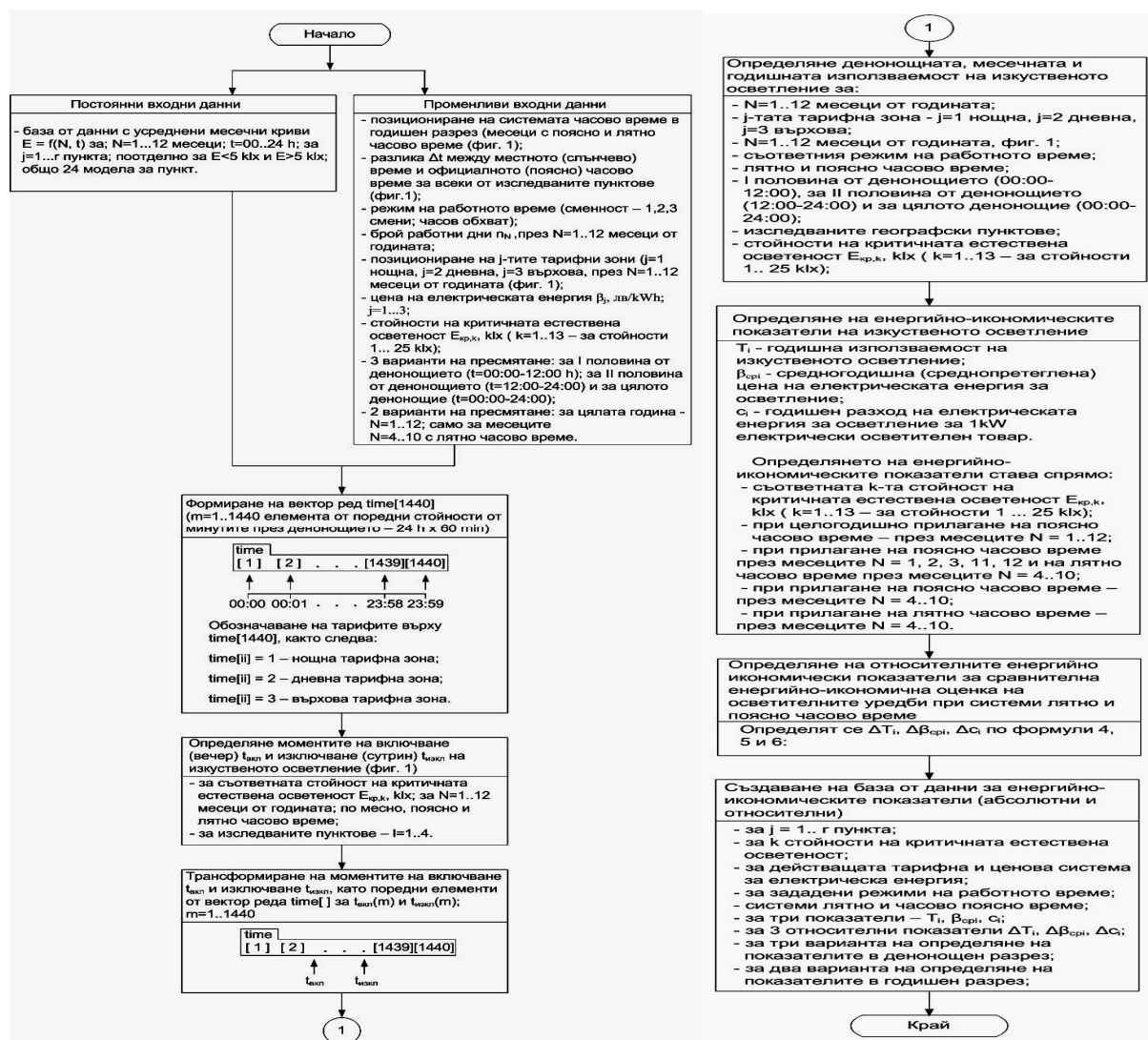
където $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ са цените на електрическата енергия съответно през нощната, дневната и върховата тарифни зони, лв/kWh;

T_{M1}, T_{M2}, T_{M3} - сумарна месечна използваемост съответно за нощна, дневна и върхова тарифни зони, h;

$T_{\Gamma 1}, T_{\Gamma 2}, T_{\Gamma 3}$ - сумарна годишна използваемост съответно за нощна, дневна и върхова тарифни зони, h.

За определянето на енергийно-икономическите показатели на изкуственото осветление е разработен алгоритъм. Блоквата схема на алгоритъма е представен на фиг.3. Алгоритъмът е програмно реализиран.

С програмния продукт са определени стойностите на енергийно-икономическите показатели на 27 пункта в България



Фиг. 3. Блокова схема на алгоритъм на програмен продукт за определяне на използваемостта на изкуственото осветление

За нуждите на практическото изпълнение на енергийните одити на осветителни уредби е разработена WEB базирана система.

Като входни данни в системата се въвеждат следните параметри:

- Ø Географски пункт (съдържа база от данни за 27 географски пункта);
- Ø Електроснабдително дружество;
- Ø Измерване на електрическата енергия (еднотарифно, двутарифно, тритарифно);
- Ø Начало и край на работното време;
- Ø Критична естетвена осветеност;
- Ø Инсталирана мощност на осветителната уредба;
- Ø Цена на електрическата енергия;
- Ø Брой работни дни през месеца.

Примерен екран от действието на системата е показан на фиг.4.

*Географски пункт:

*Електроснабдително дружество:

*Измерване на електрическата енергия: ☐ Еднотарифно ☐ Двойнотарифно ☒ Тройнотарифно

*Критична естествена осветеност: lx

*Инсталирана мощност: kW

Цена на електрическата енергия, BGN/kWh

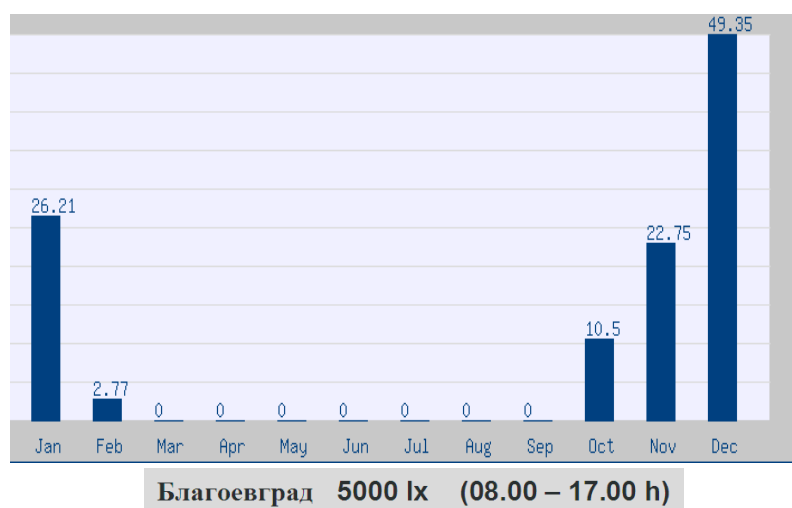
Дневна: Нощна: Върхова:

Брой работни дни през месеца

Януари	31	Февруари	29	Март	31	Април	30
Май	31	Юни	30	Юли	31	Август	31
Септември	30	Октомври	31	Ноември	30	Декември	31

Фиг. 4. Примерен екран от действието на WEB базираната система (въвеждане на входни данни)

Крайните резултати от пресмятането на системата, могат да бъдат представени както в табличен, така и в графичен вид. На фиг. 5 е дадена диаграма на крайните резултати от пресмятането системата.



Фиг. 5. Примерен екран от действието на WEB базираната система (табличен вид на крайните резултати от пресмятането на системата)

4. Заключение

1. Изведен е моделът на изменение на дневното естествено осветление, представен, чрез усреднени месечни криви на изменение на дневната естествена осветеност;
2. За 27 географски пункта в България са построени усреднени месечни криви на изменение на дневната естествена осветеност;

3. За същите географски пунктове, цитирани в т. 2 са определяни енергийно-икономическите показатели на изкуственото осветление;
4. Разработена е WEB базирана система за енергийни одити на осветителни уредби.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кючуков, Р., С. Басри. Структурен модел на облачното небе в условията на България, Научна конференция РУ&СУ'07, Русе, 2007.
- [2] Кючуков, Р., М. Димитров, С. Басри. Изследване на енергийно-икономическите показатели на изкуственото осветление през периода на въвеждане на лятното часово време, Енергиен форум – Сборник доклади, Варна, 2008.
- [3] Кючуков, Р., С. Басри. Енергийно-икономически показатели при обследване за енергийна ефективност на външни осветителни уредби, Научна конференция РУ&СУ'08, Русе, 2008.
- [4] Басри, С., О. Петров, Р. Кючуков. Оценка на потенциала на дневната естествена светлина чрез количеството дневна естествена осветеност, Научна конференция РУ&СУ'09, Русе, 2009.

АВТОРИ: маг. инж. Садетин Басри, доц. д-р инж. Радослав Кючуков - Русенски университет “Ангел Кънчев”

СВЕТЛИНА В УНИВЕРСИТЕТА – ЕДИН ПОГЛЕД НА СВЕТЛИННАТА СРЕДА В УЧЕБНИТЕ ЗАЛИ

Орлин Петров, Радослав Кючуков

***Резюме.** Докладът представя разработването на проект на осветителна уредба на Нов учебен корпус на Русенския университет „Ангел Кънчев” и последващата му реализация. Специфицирани са основната елементна база и приложените осветители. Реализирани са ергономични решения, които са издържани естетически и икономически и са съобразени със съвременните изисквания за ефективно енергоспестяване.*

LIGHT IN UNIVERSITY – ONE VIEW ON LIGHTING ENVIRONMENT IN EDUCATIONAL HALLS

Orlin Petrov, Radoslav Kyuchukov

***Abstract.** The report presents the development of a project on lighting installation of new academic building of the University of Rousse "Angel Kanchev" and its subsequent implementation. There are specified the main element base and attached lighting. Have been implemented ergonomic solutions that are aesthetically and economically sound and comply with modern requirements for effective energy efficiency.*

1. Въведение

В настоящата работа се представя разработката и реализацията на проект на осветителната уредба на нов учебен корпус на Русенския университет „Ангел Кънчев” (корпус 2). Сложната икономическа обстановка в страната наложи спазването на комплекс от условия, но без компромис в крайните решения.

Целта на настоящата работа е да се предложи ергономично, енергийноефективно и икономически обосновано решение на осветителната уредба на учебните зали в корпуса.

2. Изложение

Новият учебен корпус на Русенския университет „Ангел Кънчев” е с обща застроена площ над 15000 m². В него са обособени над 40 учебни зали с различен капацитет (от 30 до 120 места), разположени на 5 етажа.

Проектът и неговата реализация са съобразени със следните основни изисквания:

- Û ергономичност** – видът и разположението на осветителните тела са подбрани с оглед осигуряване на ергономичните изисквания в учебните зали [1,2,3];
- Û съответствие с актуалните стандарти и препоръки за реализиране на вътрешни осветителни уредби в учебни сгради [1];**
- Û енергийна ефективност:**
 - приложение само на осветителни тела с електронна пусково-регулираща апаратура (ЕПРА);
 - приложение на качествени енергийноефективни светлинни източници и осветителни тела;
 - приложение на димируеми светлинни източници в основните осветителни тела в лекционните зали;
 - приложение на датчици за присъствие в коридорите и санитарните възли;
- Û реализиране на многокомпонентни осветителни уредби** – в по-големите учебни зали са разработени многокомпонентни осветителни уредби включващи следните компоненти:
 - дневно естествено осветление;
 - общо изкуствено осветление на помещението;
 - местно изкуствено осветление на учебната дъска;
 - стенно изкуствено осветление (аплици);
 - таванно базирани осветителни тела (тип „Луна” с компактни луминесцентни лампи);
 - местно изкуствено осветление на лекторските банки.

Всяка компонента може да се управлява независимо с оглед постигане на оптимална и ергономична светлинна среда. Така изградената светлинна среда е в състояние да осигури нормална зрителна работа както през светлата, така и през тъмната част от денонощието. Всички помещения са с достатъчно естествено осветление, а смесено осветление се налага да се приложи по системата „допълнително изкуствено осветление” само при преходите „светло-тъмно” и „тъмно-светло” и в мрачни дни.

- Û управление на осветителната уредба** – приложено е димиране (регулиране на светлинния поток) в по-големите учебни зали. В коридорите и санитарните възли са предвидени датчици за присъствие, управляващи съответния брой осветители;
- Û разработени са специализирани електрически табла** – във връзка с работата са проектирани специализирани електрически табла за управление на осветителната уредба. Те позволяват управлението да става от централно от входа на залата или местно от лекторското място.

При разработването на проектното решение са направени многовариантни пресмятания на осветителните уредби на всяко едно помещение и са подбрани целесъобразните варианти, отговарящи на поставените условия [4].

Съобразени са безусловно и всички съвременни изисквания за електробезопасност.

При реализацията на осветителните уредби са използвани следните типове осветители:

- луминесцентни осветители с тръбни луминесцентни лампи 2 x 55 W, индиректно излъчване, електронна димируема ПРА, лампи T5;
- луминесцентни осветители с тръбни луминесцентни лампи 4 x 18 W и 2 x 18 W, двойнопараболична оптична система, електронна ПРА, лампи T5;
- аплици с компактни луминесцентни лампи 22W с млечен разсейвател;
- луминесцентни осветители за дъска 1 x 36 W; ЕПРА; фасетен огледален рефлектор;
- прожектори с металхалогенна лампа с бяла светлина, асиметрично широко светлоразпределение, мощност на лампата в прожектора 70 W;
- аварийни осветители за евакуация с вградена акумулаторна батерия с луминесцентна лампа 8 W; стандартни стикери за указване на спасителния изход;
- осветители с директна светлина тип "Луна", с компактна луминесцентна лампа 22 W;
- луминесцентни осветители за вграждане в лекторска банка – 1x18 W.

Съгласно проекта се монтирани общо над 1200 броя осветители за изграждане на осветителната уредба на учебния корпус. Общата инсталирана мощност за осветление е 109 kW. Относителната инсталирана мощност за осветление в корпуса е около $7,3 \text{ W/m}^2$, което представлява светлотехническо решение със съвременна норма на енергоспестяване.

На фиг. 1, 2, 3, 4, 5 са показани снимки от вече изградената осветителна уредба. Корпусът е въведен в експлоатация през септември 2010 г. На посочените снимки може да се види използваната елементна база и приложените решения за организиране на светлинната среда.

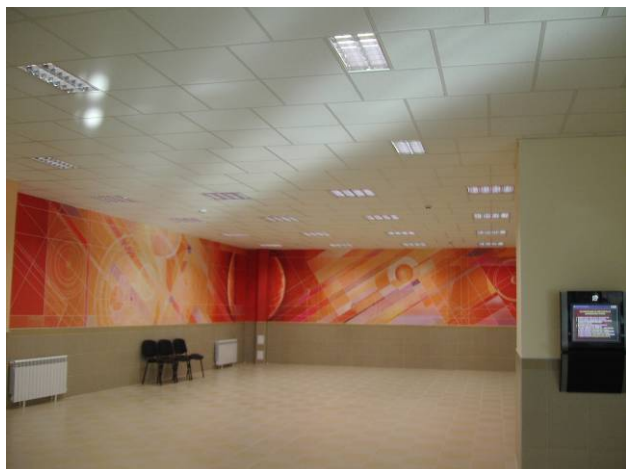
Проектът беше реализиран от следния колектив: доц. Радослав Кючуков; д-р Орлин Петров; докторант Садетин Басри; докторант Методи Димитров; студенти от специалностите „Електроенергетика и електрообзавеждане” и „Промислен дизайн”.



Фиг. 1. Осветителна уредба на голяма лекционна зала (120 места)



Фиг. 2. Осветителна уредба на основно помещение на Печатна база



Фиг. 3. Осветителна уредба на Входно фоайе на учебния корпус



Фиг. 4. Осветителни уредби на коридори и санитарни възли



Фиг. 5. Специфична елементна база съгласно проектната разработка

3. Заключение

1. Разработена е цялостна проектна концепция за реализиране на съвременна светлинна среда в учебни зали на новоизграден учебен корпус на Русенския университет „Ангел Кънчев”.
2. Светлотехническите решения са с приложение на различни конструкции и видове осветители с енергийно ефективни светлинни източници. Приложени са над 1200 броя осветители с обща инсталирана мощност 109 kW. Относителната инсталирана мощност за осветление е около 7,3 W/m², т.е. реализирана е висока норма на енергоспестяване.
3. Осветителна уредба е проектирана и реализирана при съобразяване на следните основни изисквания: ергономичност; съответствие с актуалните стандарти и препоръки за реализиране на вътрешно осветление в учебни сгради; енергийна ефективност; приложение на многокомпонентни осветителни уредби; адекватно управление на

осветителните уредба; разработване на специализирани електрически електроснабдителни решения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 12464-1:2006. Светлина и осветление. Осветление на работни места.
- [2] Кючуков, Р., О. Петров, Т. Кючуков, Основни принципи при изграждане на университетска светлинна инфраструктура, Национална научна конференция „BulLight 2010”, Варна, 2010.
- [3] Петров, О., С. Басри, Т. Кючуков, Изследване на енергийно-икономическата ефективност на решения за университетска светлинна инфраструктура, Национална научна конференция „BulLight 2010”, Варна, 2010.
- [4] Петров, О., Приложение на съвременни програмни продукти за светлотехническо проектиране и 3D визуализиране на осветителни уредби, Научна конференция RU&CU'09, Русе, 2009.

Благодарности

Изследванията са подкрепени по договор № **BG051PO001-3.3.04/28**, „Подкрепа за развитие на научните кадри в областта на инженерните научни изследвания и иновациите”. Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси” 2007-2013, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз“.

Автори: ас. д-р Орлин Петров, доц. д-р Радослав Кючуков -Русенски университет „Ангел Кънчев”

ХУДОЖЕСТВЕНО И ЕФЕКТНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА КРЕПОСТНАТА СТЕНА НА АРХЕОЛОГИЧЕСКИ РЕЗЕРВАТ, ГР. ХИСАРЯ

Димитър Матев, Валентин Гюров, Румен Киров, Самет Исак

Резюме. Докладът описва ново, специфично и енергоефективно проектно решение на архитектурно-художествено осветление. Обект на проекта са общите, представителните, и определящите облика на обекта части - запазените части от крепостната стена на Археологическия резерват, съоръжения от крепостната структура със специално предназначение, като порти, кули, бойници и др., алейно осветление по протежение на крепостната стена. Концепцията предвижда реализирането на художествено, ефектно и алейно осветление, и спектакъл "Звук и светлина". Използването на нестандартен подход води до относително евтина и икономична осветителна уредба.

ARCHITECTURAL AND ARTISTIC LIGHTING OF THE FORTRESS WALLS OF THE ARCHAEOLOGICAL RESERVE, HISAR

Dimitar Matev, Valentin Gyurov, Roumen Kirov, Samet Isaac

Abstract. The report describes a new, specific and energy-efficient design solution for architectural and artistic lighting. The object of this project are common, representative, and determining the appearance of object parts - preserved parts of the city wall of archaeological reserve, the fortified structure facilities for specific purposes, such as gates, towers, etc., lane lights along the city wall. The concept envisages the art lighting, spectacular lighting, lane lighting, spectacle "Sound and Light". Using a nonstandard approach leads to relatively inexpensive and economical lighting system.

1. Увод

Характеристика на обекта

Хисаря (Аугуста, Диоклецианополис, Севтополис, Алексиополис, Топлица) има богата хилядолетна история. През 293 г. римският император Диоклециан му дава статут на град и започва строежа на масивни крепостни стени и изпълнението на нови градоустройствени решения.

По своята запазеност и оригиналност укрепителната система и архитектурата на римския град Диоклецианопол се нарежда на едно от първите места в Европа. В някои участъци крепостната стена достига височина до 11 метра, а

южната крепостна порта се извисява на 13 m. Археологическите проучвания уточняват, че крепостта е била подсилена от 44 кули (понастоящем разрушени).

Античният град е имал четири големи порти. Градската архитектура е съсредоточена в централния градски парк до извор "Момина сълза". Тук се намира най-представителната обществена сграда (резиденция). Тя представлява голяма двуетажна постройка, чиито помещения завършват с внушителна сводова конструкция. В непосредствена близост до нея е разположен бански комплекс, който обхваща площ от около 2000 кв.м. Термите на Диоклецианопол са едни от малкото запазени римски терми на Балканския полуостров, в които са били извършвани процедури и лечение с минерална вода. Съхранени почти до покрив, те впечатляват със своята оригиналност. За отопление е била използвана минералната вода. Комплексът от представителните сгради в парк "Момина сълза" включва и амфитеатър от типа на циркусите, в които са се провеждали спортни състезания и борби с животни. Построен е през първата половина на IV в. Отлично са запазени арената и обслужващите амфитеатъра помещения. През 306 г. е била построена банската сграда при извора "Момина баня", където и сега е запазен керамичен надпис, дълъг 16 метра, с имената на римските съимператори Максимилиан Галери и Лициний-баща.

Според историческите данни през средата на V в. градът се е нареждал на трето място по големина сред градовете в провинция Тракия, след Филипопол (Пловдив) и Берое (Стара Загора).

През втората половина на XVII в. върху развалините на античните и средновековни сгради възниква малко селище, наречено Хисаря (от "крепост", арабски).

Всички паметници на културата в Хисаря са експонирани в подходяща паркова среда и са достъпни за посещение.

2. Изложение

Светлотехнически проект

Обект на настоящия проект е не целия археологически комплекс, който е разположен върху голяма площ и има изключително сложна инфраструктура, а общите, представителни, и даващи неговия облик части:

- Крепостната стена на Археологическия резерват, като цяло.
- Запазените части от стената, в частност.
- Добре запазени съоръжения от крепостната структура, със специално предназначение, като порти, кули, бойници и др.
- Алейно осветление по протежение на крепостната стена.

Концепцията за осветяване на обекта и подобектите, и възможностите за нейната реализация са разработени при следните предпоставки:

- Запазена е приблизително половината от крепостната стена по целия периметър.
- Стената е фрагментирана на участъци с дължина до 90 m, поради разрушените защитни кули.
- Запазена е много добре главната (южна) порта на крепостта, зад която, от вътрешната страна има малък площад.
- По протежението на запазената част от стената има изградени алеи, граничещи с тревни площи.

Концепцията за осветяване предвижда реализирането на:

- художествено осветление;
- ефектно осветление;
- алейно осветление;
- спектакъл "Звук и светлина".

Архитектурната структура на обекта е моделирана със светлотехнически софтуер от клас "Lighting Design", като за целта са използвани данни от кадастрални планове, натурни измервания и снимков материал. За уточняване на пропорции и размери са прилагани, където е било възможно, фотограметрични методи.

Избрани са подходящи по спектър, цвето предаване и мощност източници на светлина.

Избран е подходящ вид светлоразпределение на осветители за всеки конкретен подобект.

Реализирано е многовариантно проектиране на светлинната среда с конкретни модели примерни осветители, които покриват изискванията на концепцията за осветяване.

Художествено осветление

Реализирано е като статично осветление, разположено изцяло по протежение на запазената част от крепостната стена. То е изпълнено с 85 прожектора **MVF617 1xSON-TRP70W CON OR P1** на **PHILIPS** [1] (фиг. 1), с асиметрична огледална оптика, НЛВН 70W и светлоразпределение, което е много широко в хоризонтална фотометрична равнина $C0^{\circ}/C180^{\circ}$ и асиметрично и насочено надолу, с изразен максимум при 15° , във вертикална фотометрична равнина $C90^{\circ}/C270^{\circ}$ (фиг. 2). Прожекторите са разположени на метални стълбове (мачти) с височина 6 m. Електрозахранването на отделните сегменти е кабелно, подземно.

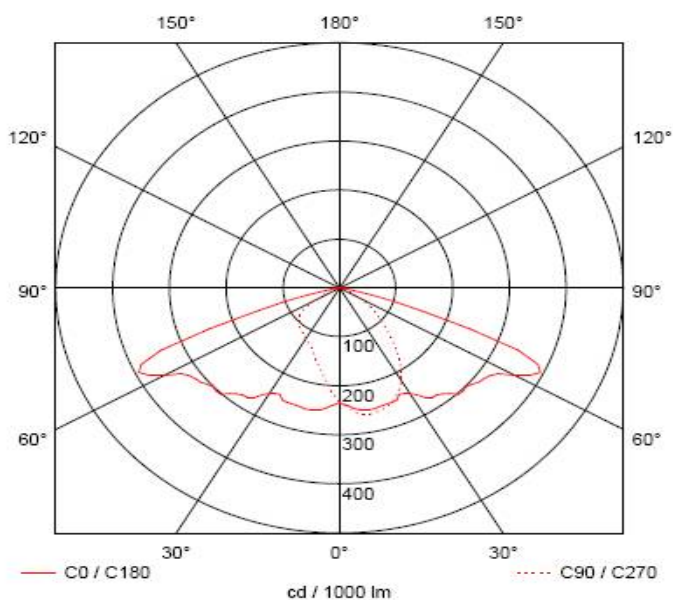
По този начин се създава светлинна композиция с метрична структура [4], при която се редуват светлини и сенки с плавен преход помежду им (фиг. 3, 4, 5), избягва се монотонността при едноцветното осветяване, и се постига срав-

нително висока равномерност и върху прилежащата на стената алейна инфраструктура [3].

Втора група от 6 прожектора е предназначена за статично осветяване на вътрешната страна на главната (южна) порта на крепостта, зад която има малък площад, на който са разположени 2 бр. стълбове (мачти). Прожекторите са с огледална оптика и НВЛН 150W.



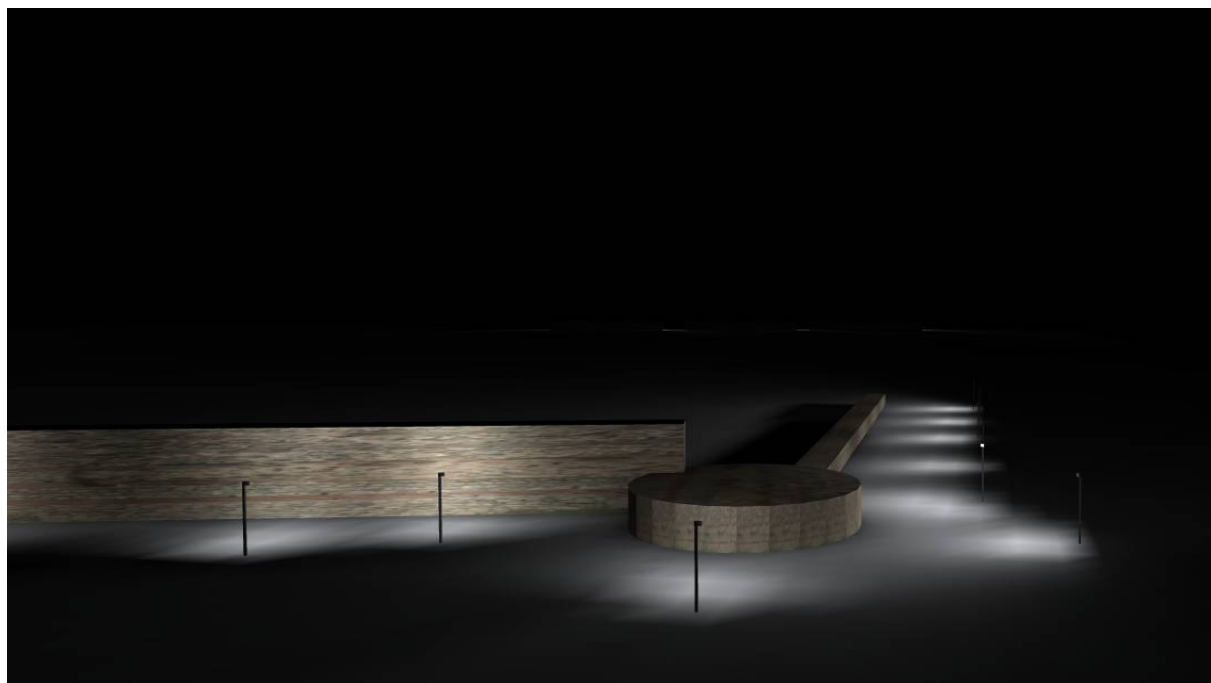
Фиг. 1. MVF617 1xSON-TTP70W CON OR P1 PHILIPS



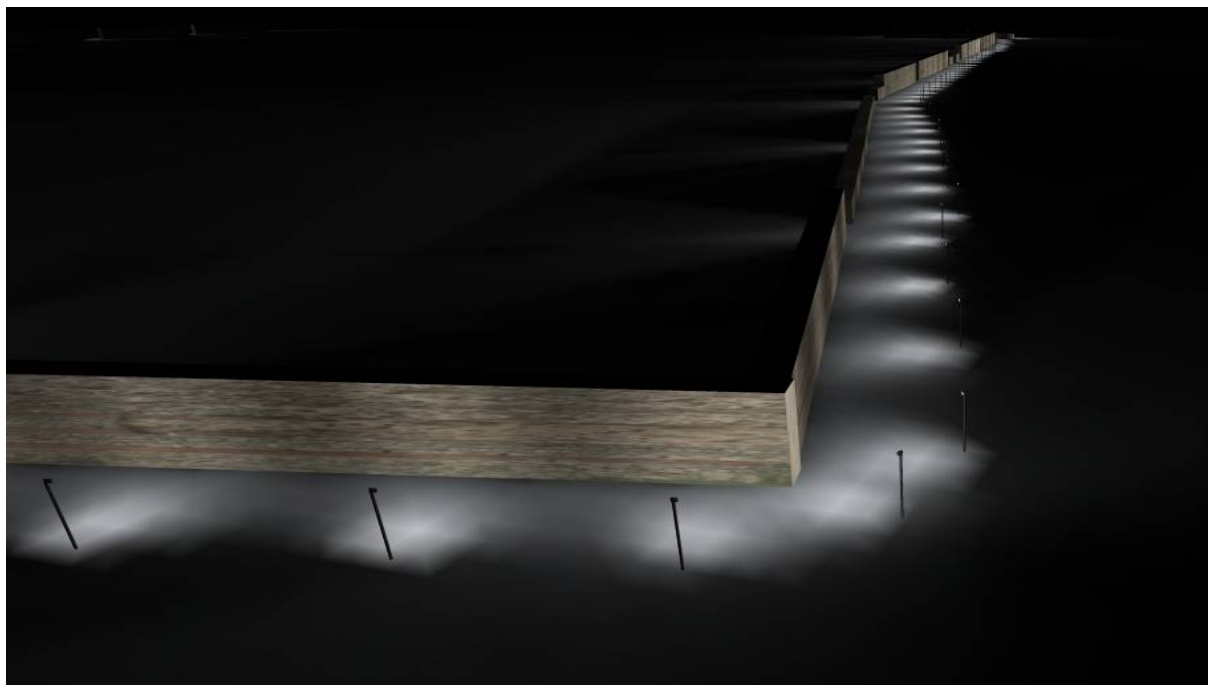
Фиг. 2. Светлоразпределение на основен тип прожектор



Фиг. 3. ReluxPro 2010.1.1 – светлотехнически проект (3D rendering)



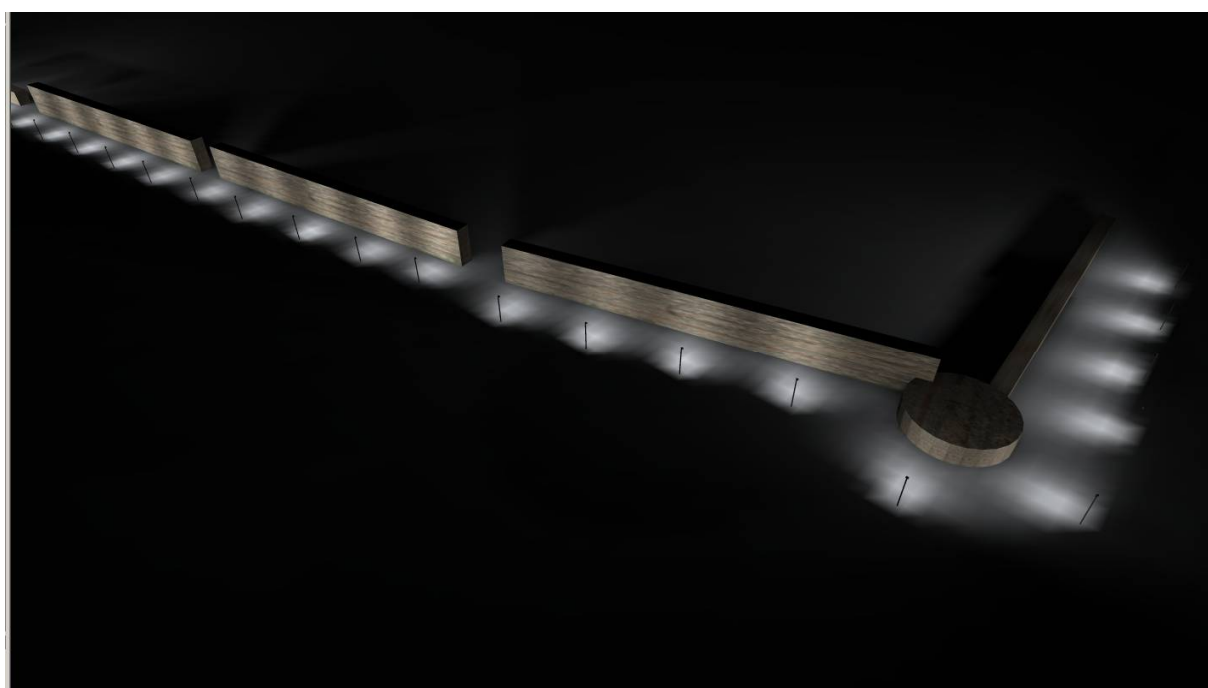
Фиг. 4. ReluxPro - 2010.1.1 – светлотехнически проект (3D rendering)



Фиг. 5. ReluxPro - 2010.1.1 – светлотехнически проект (3D rendering)

Алейно осветление

Реализирано е не като структура с отделни по вид и разположение осветители, а като съвместяване на две функции от художественото осветление, описано по-горе (фиг. 6, 7, 8).



фиг. 6. ReluxPro - 2010.1.1 – светлотехнически проект (3D rendering)



Фиг. 7. ReluxPro - 2010.1.1 – светлотехнически проект (3D rendering)



Фиг. 8. ReluxPro - 2010.1.1 – светлотехнически проект (3D rendering)

Чрез това решение се получава хомогенност на светлинната композиция и дневния изглед на съоръженията, решението спестява финансови ресурси и е енергоефективно.

Решението се налага и от необходимостта от органична функционална връзка между двата вида осветление, при наблюдение и обхождане на обекта от зрители, вечер и през нощта.

Ефектно осветление

Реализирано е със светодиодни (LED/RGB) осветители от прожекторен тип, изпълняващи функция на статично/динамично и цветно осветление, когато не се провежда спектакъл "Звук и светлина", както следва:

- Линеини светодиодни осветители, max 65 W/m, 10 бр., предназначени за осветяване свода на главната (южна) порта. Осветителите трябва да бъдат вградени на нивото на терена, в непосредствена близост със стената, в съответни дренажни шахти.
- Светодиодни прожектори с ъгъл на излъчване 10 ° и мощност 50W, 4 бр., по 2 бр./стълб, предназначени за статично осветяване на вътрешната страна на главната (южна) порта на крепостта, зад която има малък площад.
- Светодиодни прожектори с ъгъл на излъчване 13 ° и мощност 350W, 2 бр., разположени върху (в близост до) конструкцията на мултимедийния център.

Спектакъл "Звук и светлина"

Реализира се чрез комплектно съоръжение "Мултимедиен център" - обект на доставка, изграждане и строително-монтажни работи.

Съоръжението ще бъде разположено на площада зад главната (южна) порта на крепостта.

Проект на електрозахранването

Електрозахранването на съоръженията е реализирано с новоизградена подземна кабелна мрежа, поради амортизираността и ниската надеждност на съществуващата в близост до обекта стара проводна структура.

Извършени са:

- избор на топология на схемата на електрозахранване;
- оразмеряване на проводната мрежа;
- избор на електрически табла и комплектоващи изделия;
- избор на начините и съоръженията за електрообезопасяване.

Присъединяването е предвидено в точки, указани като възможни от поддържащото инфраструктурата електроразпределително дружество. Използват се също и съществуващи електрически табла и касети за улично осветление.

3. Заключение

Обектът на настоящия проект - Археологически резерват, гр. Хисаря е изключително сложен по своята структура, особености на терена и наличието на археологически дадености.

Поради това, по време на изграждането на осветителната уредба, може да се наложат промени в топологията на схемата на електрозахранване, препозициониране на отделни осветители или на групи осветители, при запазване на светлотехническата концепция.

Целта на настоящата разработка е да предложи енергоефективно и икономично художествено и ефектно осветление на крепостната стена на Археологически резерват, гр. Хисаря, с възможности за бъдещо развитие и усъвършенстване.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] PHILIPS Lighting, Decoflood MVF617, Data sheet, 2010.
- [2] PHILIPS, Lighting manual, 5th edition, PHILIPS Lighting B.V., 1993.
- [3] Василев, Н. и И. Василева, Архитектурно, художествено и рекламно осветление, С., АВС Техника, 2007.
- [4] Божков, Х. и Г. Папагалов, Осветяване на архитектурни и художествени обекти, С., Техника, 1971.

Автори: доц. д-р Димитър Матев, гл. ас. д-р Валентин Гюров, доц. д-р Румен Киров - Технически университет – Варна, кат. ЕСЕО, маг. инж. Самет Исак, POLARIS Lighting – Варна

ЕЛЕКТРОННА ПУСКОРЕГУЛИРАЩА АПАРАТУРА ЗА НАТРИЕВИ ЛАМПИ С ВИСОКО НАЛЯГАНЕ

Христо Хинов, Стойо Платиканов

Резюме. В доклада се представя разработена електронна пускорегулираща апаратура за натриеви лампи с високо налягане. Проведени са експериментални измервания и е направено сравнение на електрически и светлотехнически характеристики на конвенционална електромагнитна пускорегулираща апаратура и на създадената електронна пускорегулираща апаратура.

ELECTRONIC BALLAST EQUIPMENT FOR HIGH-PRESSURE SODIUM LAMPS

Hristo Hinov, Stoyo Platikanov

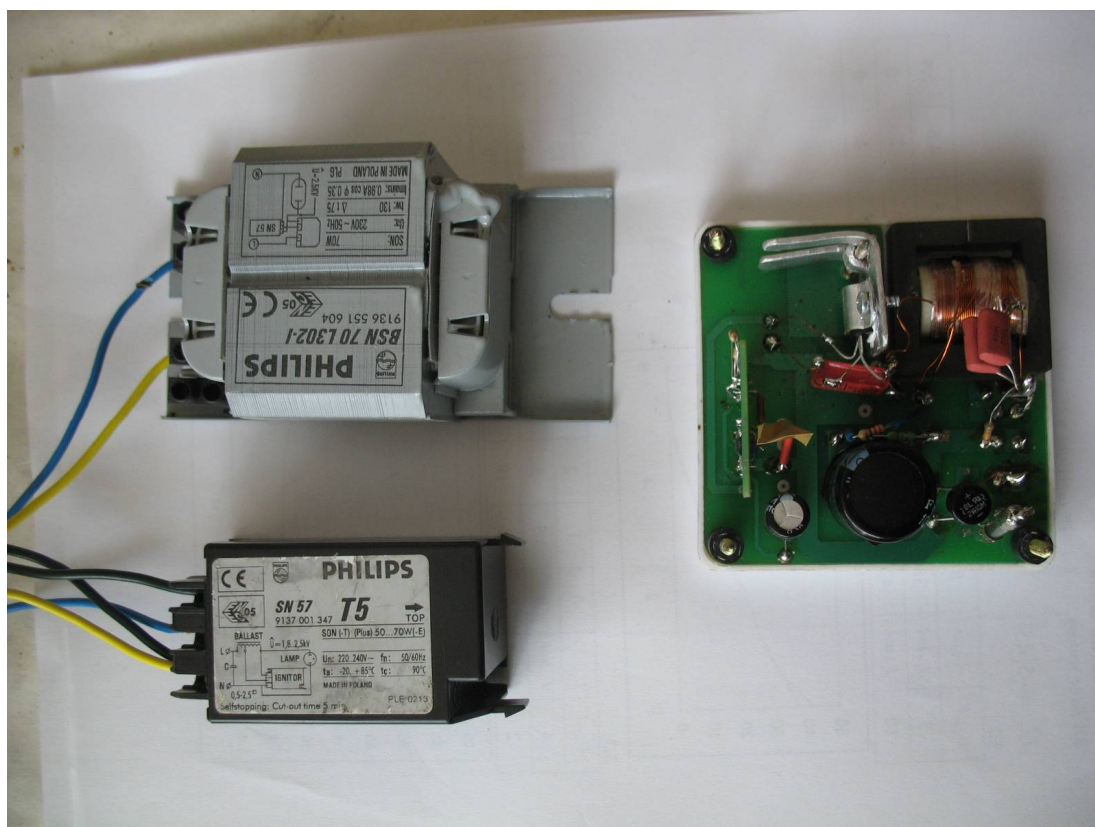
Abstract. This paper considers developed electronic ballast equipment for high-pressure sodium lamps. Measurements have been taken and the electrical and lighting-technical characteristics of conventional magnetic ballast equipment and of the proposed electronic ballast equipment have been compared.

1. Въведение

Натриевите лампи с високо налягане (НЛВН), както и другите газоразрядни лампи имат продължителен преходен процес, през който се повишава температурата и налягането в разрядната тръба, което променя техния импеданс и затруднява автономното им високочестотно захранване. Високочестотната електронна пускорегулираща апаратура (ЕПРА) вече се е наложила и утвърдила при луминесцентните и компактните луминесцентни лампи, но не все още при газоразрядните лампи с високо налягане, където познатите инвертори [1] са неустойчиви и неконкурентни. В настоящата разработка се доказват предимствата на високочестотното захранване на НЛВН с разработена и изследвана оригинална ЕПРА, базирана на специализиран инвертор [2,4].

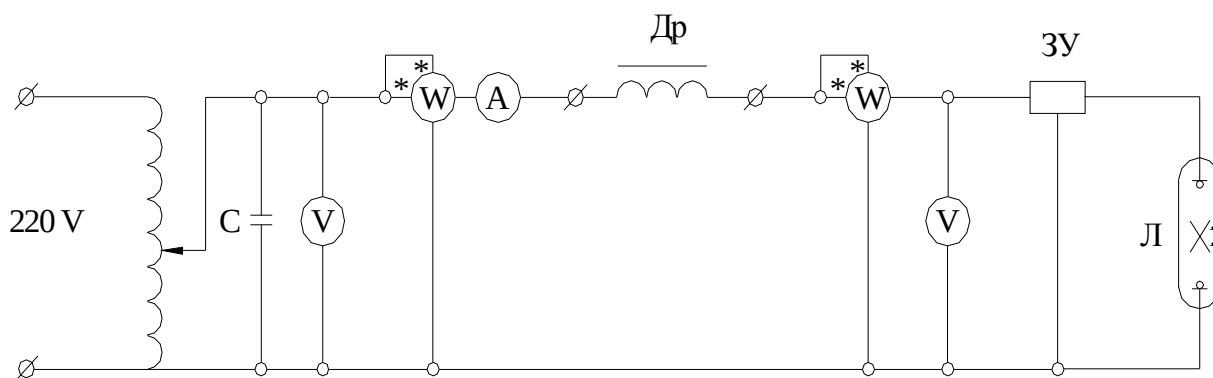
2. Изложение

Разработената ЕПРА съдържа минимален брой елементи [3] и задържа резонанса на НЛВН [4]. Нулевото комутационно напрежение [2,3,4] гарантира максимален КПД (98%) на инвертора, допълнително спестява енергия и посредством облекчаващото охлаждане повишава сигурността на цялата ЕПРА. На фиг. 1 е представен външния вид на част от сравняваните апаратури – конвенционалната ПРА и електронната ПРА.



Фиг. 1. Електромагнитна и електронна пускорегулираща апаратура

Извършва се измерване на електрическите и светлотехническите параметри и характеристики на две натриеви лампи с високо налягане, 50W и 70W, захранени съответно с електромагнитна и с електронна пускорегулираща апаратура. Електрическите параметри на лампите при работа с електромагнитната ПРА (базови резултати), са измерени по схемата от фиг. 2, а светлотехническите – изменението на светлинния поток на лампите в кълбов фотометър с диаметър 2 m чрез луксмер (lx) в относителни единици (o.e.).



Фиг. 2. Електрическа измервателна схема

Базовите резултати от измерване на НЛВН 50W – тип SON 50W E, комплектувана с дросел BSN 50 L407-1 (Philips) и запално устройство (игниитор) SN 57S (Philips) са представени в таблица 1.

Таблица 1

Напрежение мрежа [V]	Напрежение лампа [V]	Ток [A]	Мощност консумирана [W]	Мощност лампа [W]	Загуби ПРА [W]	Светлинен поток [о.е.]	[Lx/W]
220	92.4	0.665	55.3	43.7	11.6	552	9.98
230	93.1	0.695	62.5	48.8	13.7	670	10.73
240	93.7	0.723	68.1	52.3	15.8	791	11.62

Базовите резултати от измерване на НЛВН 70W – тип SON-T В 70W Е, комплектувана с дросел BSN 70 L302-1 и запално устройство SN 57 T5 са представени в таблица 2.

Таблица 2

Напрежение мрежа [V]	Напрежение лампа [V]	Ток [A]	Мощност консумирана [W]	Мощност лампа [W]	Загуби ПРА [W]	Светлинен поток [о.е.]	[Lx/W]
220	94,5	0.665	78.9	62.1	16.8	766	9.71
230	94.9	0.695	88.2	68.8	19.4	930	10.54
240	95.4	0.723	96.0	74.9	21.1	1101	11.47

Измерените параметри при работа на НЛВН с електронната пускорегулираща апаратура (ЕПРА) – целеви резултати, са получени също по схемата от фиг.2, в която дросела и запалното устройство са заменени с изследваната ЕПРА. В схемата на фиг. 2 не се използват ватметъра и амперметъра между ЕПРА и НЛВН, тъй като работната честота 28 kHz не е подходяща за техния измервателен обхват. Загубите в ЕПРА са фиксирани чрез измервателен термостат.

Целевите резултати при измервания с НЛВН 50W и разработената ЕПРА, тип S50 са представени в таблица 3, а с НЛВН 70W и ЕПРА, тип S70 – в таблица 4.

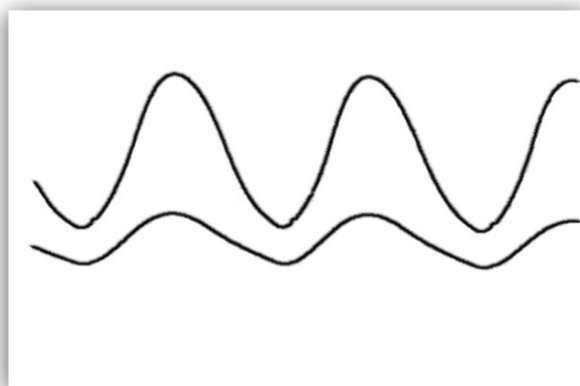
Таблица 3

Напрежение мрежа [V]	Напрежение лампа [V]	Ток [A]	Мощност консумирана [W]	Мощност лампа [W]	Загуби ЕПРА [W]	Светлинен поток [о.е.]	[Lx/W]
220	63.5	0.455	55.3	50,1	5.2	681	12.32
230	65.4	0.490	62.5	56.1	6.4	857	13.71
240	66.2	0.519	68.1	59.4	8.7	1080	15.86

Таблица 4

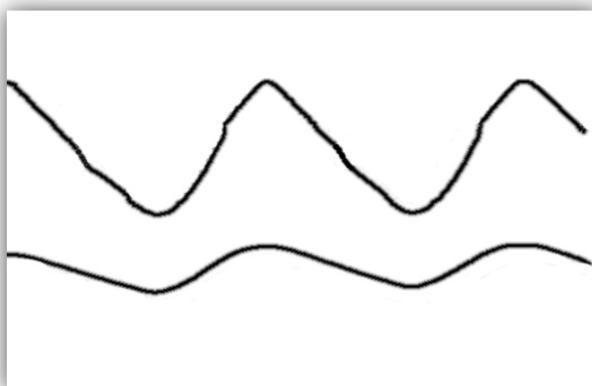
Напрежение мрежа [V]	Напрежение лампа [V]	Ток [A]	Мощност консумирана [W]	Мощност лампа [W]	Загуби ЕПРА [W]	Светлинен поток [о.е.]	[Lx/W]
220	65.2	0.524	75.4	69.1	6.3	858	11.38
230	66.7	0.548	77.2	70.4	6.8	1036	13.42
240	67,9	0.573	79.1	71.8	7.3	1203	15.21

В таблици 1, 2, 3, и 4 е представено съотношението $[lx/W]$, от измереното относително изменение на светлинния поток на НЛВН в кълбовия фотометър – чрез луксмер в $[lx]$ и консумираната мощност от комплекта „лампа-пускорегулираща апаратура”. Посоченият показател $[lx/W]$ при работа на лампите с високочестотното захранване (ВЧЗ) чрез ЕПРА (таблици 3 и 4) е с 20÷30% по-голям в сравнение с електромагнитната ПРА (таблици 1 и 2), което доказва подобряване на светлотехническите характеристики (светлинния добив) поради увеличената производна на ВЧ захранващо напрежение. Изменението на йонизационно-плазмените процеси при ВЧЗ се отразяват и на напрежението на лампата, чиято ефективна стойност намалява до 64÷66V (таблици 4 и 5), а при мрежовата честота (50 Hz), то е значително по-голямо – 93÷95V (таблици 1 и 2). Формата на напрежението на лампата е почти синусоидална при ВЧЗ с ЕПРА (фиг.3), а е трапецовидна при захранване с мрежово напрежение (50 Hz).



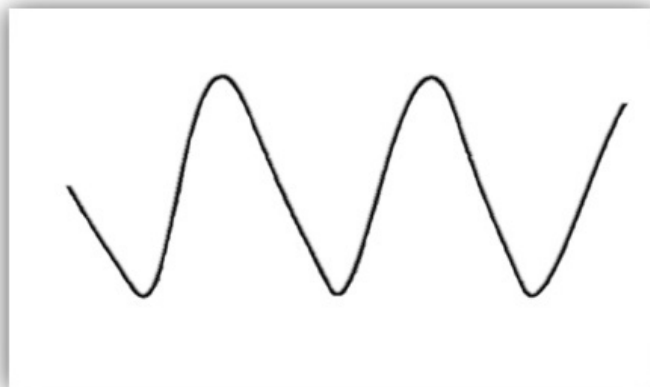
Фиг. 3. Напрежение и ток на лампата в установен режим при работа с ЕПРА

При ВЧЗ с ЕПРА, НЛВН работи сравнително устойчиво до 30% от номиналната си мощност, което е предпоставка за успешна работа при димиране на светлинния поток. При запалване на НЛВН с ЕПРА има изменение на „гладкостта” на формата на напрежението на лампата, вследствие на комутациите на инвертора на ЕПРА [3,4] – фиг. 4. Токът е във фаза с напрежението и те дефинират мощността на лампата.



Фиг. 4. Напрежение и ток на лампата при запалване

На фиг. 5 е представен тока на лампата като комбинация от един косинусоидален и от един линеен сегмент, които съответстват на подинтервалите на работния цикъл.



Фиг. 5. Ток през лампата при високочестотно захранване с ЕПРА

Особеностите на преходния процес при запалване на разглежданите НЛВН са свързани с изменението на температурата и налягането в разрядната тръба, което променя нелинейния им импеданс и е предпоставка за специфичен резонанс. Разработената ЕПРА с работна честота 28 kHz, на базата на специализирания оригинален инвертор клас Е, защитен от авторите с патент [2], намалява вероятността от резонанс, повишава устойчивостта на йонизационните процеси и увеличава светлинния добив на натриевата лампа с високо налягане.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rashid, M. H. Power Electronics, Circuits, Devices and Applications. Pearson Prentice-Hall International, Inc., 2004, chapt. 8.
- [2] Патент D20 2004 018 243.2 DC/AC – Quasi – Resonanzwechselrichter der Klasse E mit einem Reischwingskreis und induktiver Energieanhauung (Kumulation); BR Deutschland.
- [3] Hinov, H., D. Girginov, I. Aylov. Analysis of a Single-switch Inverter in Phase Space; ACEMP'04; Turkey, Istanbul; 26 – 28 May 2004; pp 457 – 462.
- [4] Хинов, Х., С. Платиканов. Високочестотно захранване на натриеви лампи с високо налягане посредством инвертор клас „Е”; XIV Национална конференция с международно участие; Светлина 2010; България Варна; 10 – 12 юни 2010; No VII-40.

Автори: доц. д-р Христо Хинов, доц. д-р Стойо К. Платиканов - Технически университет – Габрово, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”

ОХЛАЖДАНЕ НА СВЕТОДИОДИТЕ С ВИСОКА ЯРКОСТ И ГОЛЯМА МОЩНОСТ

Христо Василев, Ганчо Ганчев, Вълчан Георгиев

Резюме. В доклада са описани методите и техническите средства за провеждане на изследвания в областта на термичния мениджмънт на светодиоди (LED) във връзка с използването им за осветление в различни направления на светотехниката: улично, вътрешно (за административни сгради, обществени сгради, офиси, битово) или архитектурно-художествено.

COOLING OF HIGH POWER LEDs

Hristo Vasilev, Valchan Georgiev, Gancho Ganchev

Abstract. Methods and technical tools for scientific research of thermal management of LEDs related to its use for illumination in the different aspects of the lighting technique are presented in the paper. Some results of the study are shown and several general standardization problems are considered.

1. Въведение

Задача на всеки, който се занимава с изследване, конструиране, разпространение на светодиодни изделия, е да спазва предписаните режими, за да осигури надеждна работа на светодиодите. За тази цел са необходими периодични изследвания, тъй като количеството отделена топлина и температурата на нагряване зависят от светлинния добив: при по-ниски стойности на добива, отделеното количество топлина е по-голямо и за достигането на препоръчваните стойности на температурата са нужни по-големи усилия за охлаждане - осигуряване на повърхности за охлаждане, като охладителни радиатори, изработени от подходящи материали, с подходяща конфигурация и площ. Когато светлинния добив е по-голям, отделеното количество топлина е по-малко и положените технически средства и финансовите разходи за охладителни системи са по-малки.

Задачата за нагряването и охлаждането на светодиодите с голяма мощност и висока яркост може да се реши с използването както методите, прилагани за решаване на класическите задачи за топло и масообмен, така и с по-нови методи, като теорията на крайните елементи и с методите на CFM (механика на флуидите). Важното е да се дефинират правилно условията на нагряване и охлаждане, колкото е възможно по-прецизно да се въведат уточнени коефициенти и константи за материалите и т.н.

2. Състояние на проблема

Ще се опитаме да определим условията на работа на светодиодите при сегашното им състояние.

1. В средата на 2010 година на пазара се появиха светодиоди със светлинен добив 130 lm/W, като почти по същото време се появиха съобщения, че в лабораториите на водещи фирми– производители са конструирани и изпитани светодиоди с добив 180 lm/W. Някои фирми докладваха и ефективност от 208 lm/W. В края на 2010 година вече на пазара се появяват светодиоди с ефективност 160 lm/W, разбира се, при съответстваща цена. Най – важното е, че теоретичният праг на ефективността, над 300 lm/W, още не е достигнат.

2. Топлината, която се генерира от един светодиод при ефективност 160 lm/W, може да се очаква да заема около 50% от цялата мощност. При тези условия, при мощност от 1 W на светодиода, се очаква около 0,5 W трансформирани в топлина. При работа около 5 часа непрекъснато би се отделила $0,5 \text{ W} \times 5 \text{ h} = 0,25 \text{ Wh}$

3. Термичните съпротивления в различните елементи от конструкцията на светодиода.

Термичното съпротивление между две точки се дефинира като отношение на разлики в температурите към разсеяната енергия. За изчисленията фирмата CREE използва общоприетата единица $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ (както и повечето фирми-производители). В случая с LEDs съпротивлението на две термично важни части влияе на температурата на p-n прехода (T_{junction}): $R_{\text{th j-sp}}$ и $R_{\text{th sp-a}}$.

$$T_j = T_a + (R_{\text{th j-a}} \times P_d),$$

където: T_a – температура на околната среда;

- $R_{\text{th j-a}}$ – термично съпротивление от p-n прехода до околната среда;

- P_d – разсеяната енергия

4. Съпротивление зависи от дизайна, от конструкцията на пакета. То се приписва на наличието на термично съпротивление между p-n прехода и точката на запояване ($R_{\text{th j-sp}}$).

5. От термичния контакт до външните условия (където няма конструктивни елементи). Това термично съпротивление се дефинира с частта от пътя между точката на запояване и външната среда. Приписва се на термичното съпротивление между точката на запояване и околната среда ($R_{\text{th sp-a}}$).

Когато се използва радиатор за охлаждане, общото термично съпротивление е серия съпротивления от p-n прехода до мястото на запояване ($R_{\text{th j-sp}}$), от спайката - до радиатора ($R_{\text{th sp-h}}$) и от радиатора – до околната среда ($R_{\text{th h-a}}$).

$$R_{\text{th j-a}} = R_{\text{th j-sp}} + R_{\text{th sp-h}} + R_{\text{th h-a}}$$

Цялото термично съпротивление между LED p-n прехода и околната среда ($R_{\text{th j-a}}$) може да се моделира като сума от последователно съединени $R_{\text{th j-sp}}$ и $R_{\text{th sp-a}}$.

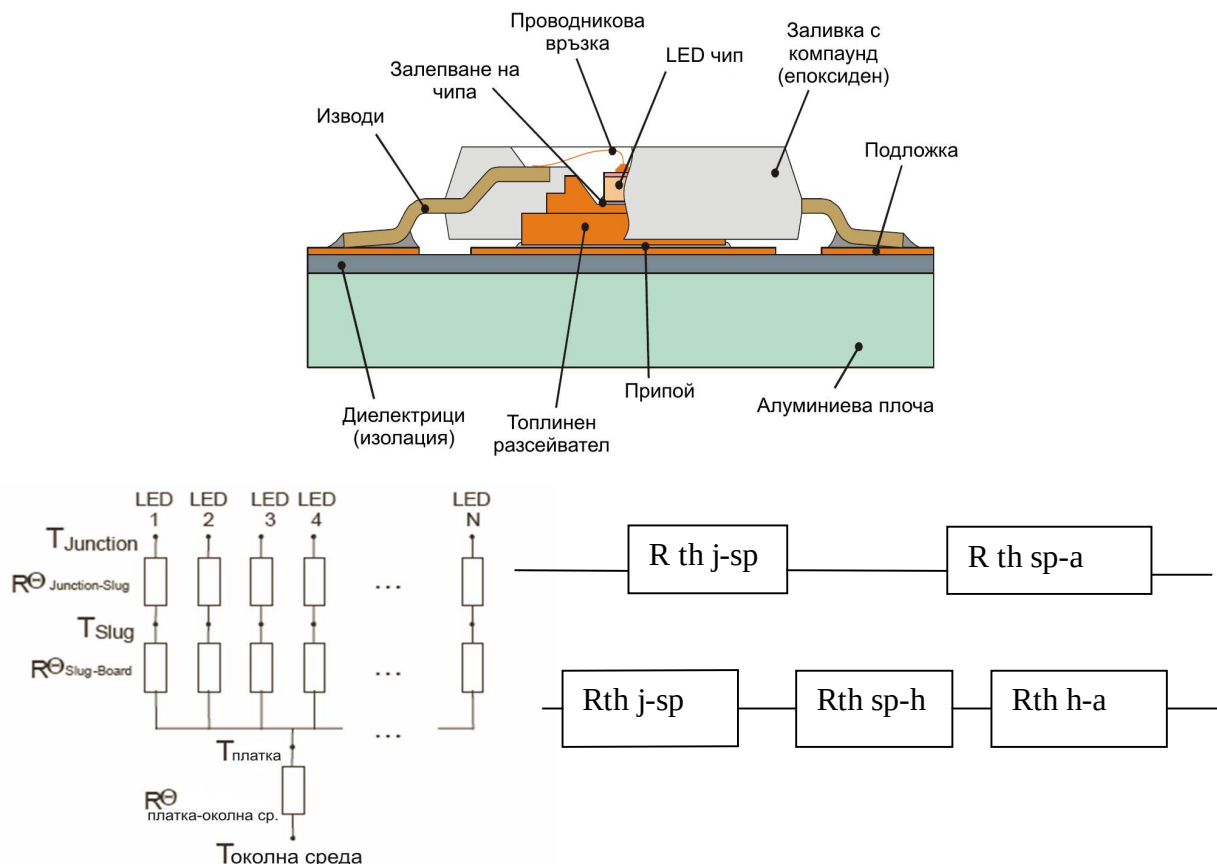
- Разсейване на енергията
- Цялата разсеяна енергия от LED (P_d) е произведение на приложеното напрежение в права посока и на тока в права посока (I_f) на LED.
- Температура на p-n прехода

Температурата на LED p-n прехода (T_j) е сума от околната температура (T_a) и резултата (продукта) от термичното съпротивление от прехода към околната среда и разсеяната енергия: $T_j = T_a + (R_{th\ j-a} \times P_d)$

В повечето случаи мощните светодиоди се монтират на печатни платки с метална основа (MCPCB), които ще бъдат залепени върху радиатор за охлаждане. Топлинните потоци от LED p-n прехода през MCPCB до радиатора за охлаждане чрез кондукция. Радиаторът разсейва топлината в околното пространство чрез конвекция. В повечето LED приложения контактното термично съпротивление между p-n прехода на LED и MCPCB и/или охладителния радиатор е малко, в сравнение с това на термичното съпротивление между прехода и термичното съпротивление на подложката и след това от подложката – до околното пространство.

Точката на запояването $R_{th\ j-sp}$ $R_{th\ sp-h}$ чипа на LED, околна среда T_{sp} T_j T_a

Преките топлинни загуби от светодиодния пакет към околното пространство са достатъчно малки, за да се пренебрегнат при изчисленията.



Фиг. 1. Модели включващи различни термични съпротивления

Крайната цел на проектирането за определяне на размера / големината и природата на изисквания топлинен разсейвател / радиатор е да се изчисли максималното топлинно съпротивление ($R_{th\ h-a}$), което ще поддържа температурата на прехода под максималната стойност при най-лошия случай на работа.

Термичното съпротивление между точката на запояване на LED и охладителния радиатор $R_{th\ sp-hs}$ зависи от: гладкостта на повърхността, приложеното налягане при монтиране, големината на контактната площ и типа на използваните материали за интерфейса и техните дебелини. При добър дизайн то може да се минимизира до по-малко от $1^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Максималната стойност на термичното съпротивление от радиатора до околната среда ($R_{th\ h-a}$) може да се изчисли, като се използва предното уравнение и решението за $R_{th\ h-a}$:

$$R_{th\ h-a} = (145^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 34,125\text{W} / 6 - 1^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 34,125\text{W}) / 34,125\text{W} = 58^{\circ}\text{C}.$$

С цел да се запази температурата на прехода под 145°C , при най-лошия случай, то термично съпротивление от радиатора до въздуха ($R_{th\ h-a}$) трябва да е по-ниско от $10.85^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Охладителен радиатор с изискваната характеристика може да бъде избран, като се използват схеми и данни, публикувани от производителите на охладителни радиатори или чрез моделиране и тестване на изследваните режими – ако това е във възможностите на фирмата.

3. Измерване

При измерване на термичното съпротивление, трябва да се получат надеждни стойности за температурата на прехода T_j .

Директно измерване на температурата на p-n прехода с нормални средства не е възможно. Използват се обикновено индиректни способи, инфрачервено и контактно измерване на температурата.

Всеки от методите има своите недостатъци.

4. Охладителен радиатор

Охладителния радиатор създава целенасочен път за топлината от светодиодния източник до външната среда. Охладителният радиатор може да разсейва енергия по три начина: чрез топлопредаване, чрез конвекция и чрез радиация. Това е класическият модел на термодинамиката.

Отдаденото количество топлина е пропорционално на топлоотдаващата повърхност. Следователно, разсейвателите трябва да се конструират така, че да притежават максимална площ.

Топлинната радиация на радиатора е функция на финишната обработка на повърхността, особено при високите температури. Боядисаната повърхност ще има по-голямо излъчване отколкото полираната, небоядисана повърхност.

Монтажът на радиатора с винтове или притискането с пружини е много често по-добър метод, отколкото използването на обикновени клипсове, термопроводящи лепила или лепнещи смоли.

Крайният потребител иска да изчисли някои критични температури (обикновено температурата на p-n прехода, но често и температурата в точката на спойката). Най-често се използва уравнението:

$$T_{junction} = T_{ref} + P.R_{thj-ref}$$

$R_{thj-ref}$ е стойност, който се доставя от производителя, мощността P обикновено се дава от инженерите по електроника, а T_{ref} е референтна температура, която зависи от дефиницията. След като бъде изчислена $T_{junction}$, тази температура се сравнява обикновено с измерената установена температура.

Ако $T_{junction}$ е по-висока от $T_{specification}$, се налага повторно проектиране. Очевидно трябва да се убедим в правилността на изчислената $T_{junction}$, преди да се вземе решение. За целта трябва да се даде отговор на някои основни въпроси:

- Как е определена $T_{junction}$? Може ли да се измери на практика? Ако ли не – как да се получат от други измервания, например от T_{case} ?
- Какво е T_{ref} ? Може ли тази стойност да се определи? Лесно ли може да се измери на практика?
- Как се дефинира P , какъв е делът на топлинната енергия в общата консумирана мощност?
- Какво е физическото значение на термичното съпротивление, използвано в уравненията?
- Използва ли се термичното съпротивление в уравнението с реална температурна независимост?
- Какви са разликите в публикуваните данни за различни производители?
- Някои автори стигат и по-далеч – казват, че има нужда от нов метод за термична характеристика, наречен “Гранични условия на независимо компактно термично моделиране”.

Някои от проблемите, породени от начина по който производителите предоставят понастоящем данни и документация са:

- Данните не отразяват реалната продължителност на експлоатация, и специално зависимостта ѝ от работната температура;
- Съществуват големи различия в приетите стойности за референтните температура и ток (T_{ref} , I_{ref}). Често $T_{junction}$ се приема 25°C , което е подвеждащо, защото ефективността при максимална стойност на мощността е често с 50% по-ниска, отколкото при стайна температура. Положителната страна е, че водещите производители започнаха да цитират по-реалистични стойности.
- Често пряко сравнение между продукцията на производителите не е възможно.
- Не се дават топлинно зависими, а температурно зависими параметри.
- Начинът на публикуване на термични данни от производителите е серия от приблизителни стойности на термични съпротивления, което е съмнително в много от практическите случаи, за които се предпочитат по-комплексни термични данни.

Да съсредоточим за момент върху дефиницията на мощност и на сериите приблизителни термични съпротивления.

Може би най-големият проблем днес, който възпрепятства безпристрастното сравнение между светодиоди от различни производители, е липсата на стандартизирани начини за определяне на мощността. Много производители определят тяхната разсейвана мощност като произведение на напрежението и тока, без да отчитат ефективността на преобразуването от електрическа енергия в светлина. Според нас, а и според много други автори, всяко термично съпротивление би могло да бъде свързано с физическите параметри и да бъдат независими от ефективността. Проблемът на практиката е, че потребителите трябва да знаят ефективността, във функция от времето на работа и общата разсеяна мощност. От друга страна обявяването на по-добра ефективност е много важен търговски елемент: то работи за увеличаването на интереса в устойчив интерес и това прави усещането, че има раздвояване при тълкуването на този параметър от физическото R_{th} . Общата ефективност (още известна като wall plug efficiency (WPE), зависи от температурата и тока. Ето защо, би следвало да се дават някакви метрични LED-доклади, наред с тока и температурата, при които дадените данни са били определени.

5. Заключение

1. Нагряването и охлаждането на мощните светодиоди, използвани за осветление, може да се прогнозира, да се оразмеряват, конструират и разработват различни охладителни системи с висока ефективност на охлаждане, което позволява да се реализират прогнозните светлинен добив, продължителност на експлоатация и цветна температура. Някои параметри при светодиодите обаче, все още не съответстват на данните, дадени от производителите.

2. Без стандарт, производителите на LED, които не могат да се съпротивляват т.е. да модернизират и контролират качеството на производството си, прибегват до измама, за да имат конкурентен ефект, създавайки проблеми на крайните потребители. Когато производителите не предприемат инициатива, крайните потребители се стремят да постигнат висока надеждност, основавайки се на топлинните и връзката с продължителността на използване. Производителите, които могат да доставят тези данни навреме, имат усещане за конкуренция. Но все пак в България се търси евтиното и, разбира се, с ниско качество, доставено от някои азиатски страни

3. Термичните измервания на LED не са само изисквания за надеждност и прогноза за продължителност на експлоатация, но също за удобно светлинно проектиране поради всички аспекти на светлинната ефективност, с крайна температурна зависимост.

4. Акуратно термично моделиране и тестване изисква прецизна експертиза, която е вероятно недостъпна при съществуващото стандартизиращо тяло, което фокусира главно на електрическите и оптичните стандарти, където топлинния аспект е само в бъдещите стандарти.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cree XLamp LED Thermal Management.
- [2] LUXEON® Power Light Sources.
- [3] Василев, Х., В. Георгиев, Г. Ганчев, Особенности при конструирането на улични осветители със светодиоди.
- [4] <http://www.coolingzone.com/>
- [5] <http://www.electronics-cooling.com/>
- [6] <http://www.r-theta.com/>
- [7] <http://www.aavidthermalloy.com>
- [8] www.lumiledsfuture.com
- [9] www.luxeon.com
- [10] Theo Treurniet and Li Zhang , On The Challenges of Thermal Characterization of High-Power, High-Brightness LED Packages, May 1st, 2008.
- [11] Mehmet Arika, Charles Becker, Stanton Weaver, James Petroski, Thermal Management of LEDs: Package to System.
- [12] Георгиев, В. и др. Моделиране на топлинни процеси в светодиодни осветители, Отчет по тема финансирана от ТУ-София, 2008.
- [13] Фирмена литература на Seul Semiconductots.
- [14] Фирмена литература на OSRAM Opto.

Автори: Христо Василев, Денима 2001 ООД, Вълчан Георгиев: Технически университет- София, Ганчо Ганчев, Денима

ПРИЛОЖЕНИЕ НА СВЕТОДИОДИТЕ ПРИ ОСВЕТЛЕНИЕ НА БЕНЗИНОСТАНЦИИ

**Христо Василев, Ганчо Ганчев, Вълчан Георгиев, Стефан Стефанов,
Иван Цонев**

***Резюме.** В настоящия доклад е обобщен опита от пилотен проект за цялостна реконструкция на осветителната уредба на бензиностанция, намираща се в района на гр. София. Старата осветителна уредба е на възраст 17 години и е морално и технически остаряла. Извършена е нейната подмяна с изцяло светодиодно осветление. Извършена е и оценка на техникоикономическите параметри на проекта.*

APPLICATION OF LED IN GAS STATION ILLUMINATION

**Hristo Vasilev, Gancho Ganchev, Vultchan Georgiev, Stefan Stefanov,
Ivan Tzonev**

***Abstract.** The results of a project for replacement of conventional lighting system of a gas station with LED based lighting system are presented. The technological and financial aspects of the project are summarized.*

1. Осветителни инсталации на бензиностанции

Бензиностанциите са разположени навсякъде в страната и са около 1000 на брой за цялата територия на България. В зависимост от фирмата, осветлението заема от 80 до 90% от консумацията на енергия. Най-много енергия за осветление се използва в бензиностанциите на “Лукойл”, следват на “Петрол”, “Шел”, ОМВ и т.н. Много от осветителните инсталации на тези обекти са вече технически остарели и се налага тяхната подмяна, поради изчерпване на ресурса им. Разбира се, при планиране на реконструкцията е нормално да се мисли за енергоефективност, а светодиодното осветление предлага най-добри възможности в това отношение.

В района на бензиностанциите са обособени четири зони, подлежащи на осветление:

- районно осветление,
- осветление в зоната на бензиноколонките в откритото пространство под козирката,
- вътрешно осветление на търговската част,
- осветление на информационните табели и рекламни надписи.

Именно на рекламното осветление се пада най-голям дял в инсталираната електрическа мощност – над 50%.

Поради характера на работата предпочитаните класически светлинни източници, използвани за осветление в различните зони са:

- районно осветление - живачни лампи с мощност 250 W или 400 W, натриеви или металхалогенни лампи с мощност 150 W в по-новите инсталации;
- зоната под козирката – металхалогенни лампи с мощност 250W или 400 W;
- вътрешно осветление – луминесцентни лампи 4 x 18 W монтирани на окачен таван;
- информационно-рекламно осветление – луминесцентни лампи с мощност 18, 36, 58 W.

Общата инсталирана мощност само за нуждите на осветлението на една среднестатистическа бензиностанция е около 20 kW. При средна годишна продължителност на работа 4000 часа, консумираната енергия за осветление възлиза на около 80000 kWh , а разходите за електроенергия – на около 8000 лв. Като се има предвид, че в търговската част – магазин, кафе, каси и пр. – осветлението свети непрекъснато и бензиностанциите работят без почивни дни, т.е. 8760 часа годишно, разходите на електроенергия за осветление възлизат на около 100000 kWh или 15000 лв. годишно. За една бензиностанция това означава около 7500 литра бензин! Това дали е много или малко – го преценява собственика. Очевидно това не е малък разход, след като навсякъде по света са реализирани проекти за замяна на светлинните източници със светодиоди.

2. Изисквания към осветлението на бензиностанции

Бензиностанциите са едновременно търговски центрове и производствени помещения и зони. Осветлението трябва да насочва вниманието към определени места, за да се открие типа на продукта, който се продава (примерно на съответната колонка с гориво) и на предлагането на услуги от персонала. Това трябва да се вижда от определено разстояние – от навлизането в района на бензиностанцията. Трябва да се осигури подходящо осветление на нивото на бензиновите помпи и пространството за обслужване и ясно да идентифицират пътя на навлизане, за достъп до колонките и изходните пътища от района на бензиностанцията.

Прекалено високо ниво на осветеност на знаците идентифициращи бензиностанцията може да доведе до това, че информацията да бъде неразбираема и детайлите да бъдат объркани.

Уличните осветители за осветление на входа и изхода трябва да бъдат избрани измежду категорията “защитени” осветители. Обща спокойна обстановка се постига с осветители монтирани на малка височина т.е. насочващи движението осветители, маркиращи трасето. За да не се създава много висока яркост, може да се използва индиректна светлина, примерно с осветяване на вътрешната повърхност на пространството под козирката.

Подчертаването на фасадата на бензиностанциите представлява визуална покана, прави интегриращо влияние и демонстрира възможност и готовност за обслужване.

осветеност

Съгласно EN 12464: 1998 се препоръчват следните стойности за нива на осветеност на горепосочените четири зони:

Помещение или зона	Препоръчително ниво на осветеност/светимост
Районно осветление на бензиностанцията	20 lx,
Района на бензиноколонките	200 lx,
Търговската зона (вътрешно осветление)	300 lx
Информационни табели (светимост)	1000 lm/m ² ,
Каси	500 lx,
Кухни	500 lx,
Ресторанти на самообслужване	200 lx
Коридори	100 lx.

Тук се налага едно пояснение. Видимостта на информационните табели се определя от яркостта на буквите и на фона или по-точно – от контраста, създаден между тях. Буквите са бели, изписани на червен фон. При съществуващото положение беше измерена светимост около 1200 lm/m² на белите полета на буквите и 500 lm/m² на червения фон.

Изисквания за съотношението между осветеността на обекта и на околното пространство:

Осветеност на обекта, lx	Осветеност на околното пространство, lx
≥ 500	100
300	75
200	50
150	30
50	100
< 50 no stipulation	< 50

Изисквания за неравномерност на осветеността

$U = E_{\min}/E_m$ на работното място за различни задачи е съгласно стандарта EN 12464-2.

Неравномерността в околното пространство не трябва да бъде по-ниска от $U = 0.10$.

Цветна температура на светлинните източници

Топло бяла - под 3 300 K – вътрешно осветление на търговската част,

Неутрално бяла от 3 300 K до 5 300 K – вътрешно осветление на търговската част,

Дневно бяла над 5 300 K – външно осветление под козирката, рекламно осветление, районно осветление.

Изисквания към осветителите

Бензиностанциите се класифицират по взривоопасност като открити помещения, в които не може да се създаде взривоопасна концентрация на бензинови пари с въздуха. Най-опасната зона е зоната на 5 метра около бензиноколонките – нагоре и във всички посоки. Само там, при повреда в бензиновата помпа или спукване на бензинопровода от който се зарежда колата (около “пистолета”), може да възникне опасна концентрация. Както е известно, за възпламеняването е необходим още един фактор – инициатор на възпламеняването: висока температура, пламък, искра, електрическа дъга и пр. В зоната на бензиноколонките в някои бензиностанции се инсталират информационни табели с цената, които се осветяват през нощта. При използване на луминесцентни лампи, стартерът е потенциалния източник на електрическа искра, която би възпламенила евентуално взривоопасна смес, която би възникнала при авария. При светодиодно осветление рискът е значително по-малък, но въпреки това, информационните табели над бензиноколонките трябва да се изпълнят с повишена степен на защита.

3. Разход на електроенергия при досегашната осветителна уредба

В дадената по-долу таблица са описани броя и вида на класическите осветители и е дадена общата инсталираща мощност, разделени по зони.

Таблица 1. Инсталирана мощност за осветление при старата осветителна инсталация

№	Зона и тип на осветителите	Обща инсталирана мощност (заедно с ПРА)
1	<u>РЕКЛАМНО ОСВЕТЛЕНИЕ</u> Луминесцентни лампи тип PLL и T8	11 300 W
2	<u>ЗОНА ПОД КОЗИРКАТА</u> МХЛ – 400 W, монтирани на височина 5 m.	3 700 W
3	<u>РАЙОННО ОСВЕТЛЕНИЕ</u> ЖЛ – 400 W, монтирани на стълбове с височина 8 m.	3 600 W
4	<u>ТЪРГОВСКА ЧАСТ (ВЪТРЕШНО ОСВЕТЛЕНИЕ)</u> ЛЛ 4x18 W, монтирани на окачен таван, ХНЛ 50 W / 12 V, монтирани на окачен таван.	2 400 W
Обща инсталирана мощност на осветителната уредба:		21 000 W

На рекламното осветление се падат 54% от цялата инсталирана мощност на осветителната уредба. Освен сериозен разход на електроенергия, класическото

изпълнение на рекламното осветление с луминесцентни лампи с електромагнитни ПРА създава и много експлоатационни неудобства. Заради екстремните условия, при които работи този тип осветление, се налага честа подмяна на изгорели осветители, което е много трудоемко. При част от рекламните и информационни табели, които се осветяват, лампите са монтирани на труднодостъпни места и тяхната подмяна е предизвикателство за обслужващия персонал. Такива са например информационните табели на бензиноколонките, където се изисква взривобезопасност и тотемната колона в района на бензиностанцията.

Вътрешното осветление на търговската част има най-малък дял в общата инсталирана мощност – 11,5%, но годишната продължителност на работа на това осветление е най-голяма.

Точно измерване на годишната консумация на електроенергия на осветителната уредба не може да се направи, тъй като електрическата инсталация не позволява разделно измерване на електроенергията за осветление от останалото електропотребление, но по изчислителен път, годишният разход за електроенергия за осветление може да се оцени на 14300 лв.

4. Замяна на съществуващата осветителна уредба със светодиодна такава

При реконструкция на съществуваща осветителна уредба [2,3], е възможно да се поставят изисквания дори по-тежки от предписаните в нормативите [1]. По изрично настояване на възложителите, новопоставеното светодиодно осветление трябва да осигурява същите нива на осветеност, като съществуващата до момента уредба. Освен това беше поставено и изрично „ретрофит“ изискване, т.е. новите светодиодни осветители трябва да се монтират точно на местата на заменените класически осветители. Това разбира се води до известен преразход на електроенергия и ограничава възможностите, но възложителите държат да запазят досегашния облик на бензиностанцията.

За осветлението на обособените зони в една бензиностанция са необходими следните осветители:



Фиг. 1. Светодиодни осветители за районно и вътрешно осветление

Осветители за районно осветление

Те трябва да осигуряват достъп до бензиностанцията от отклонението на превозното средство от главния път (улица, магистрала) създавайки постоянно нарастваща осветеност (яркост на пътното платно) до бензиностанцията (до около 20-50 lx) и обратно, при излизането от района на бензиностанцията постепенно да създава постоянно намаляваща осветеност (яркост на пътя) до нивата на яркост на главния път. Тези осветители трябва да се разполагат на по-малка височина, съгласно с горните съображения. Излъчваната светлина трябва да бъде бяла.

Осветители за вътрешно осветление

За тези два вида осветители, показани на Фиг.1, се използват светодиоди тип XP-G на фирмата CREE.

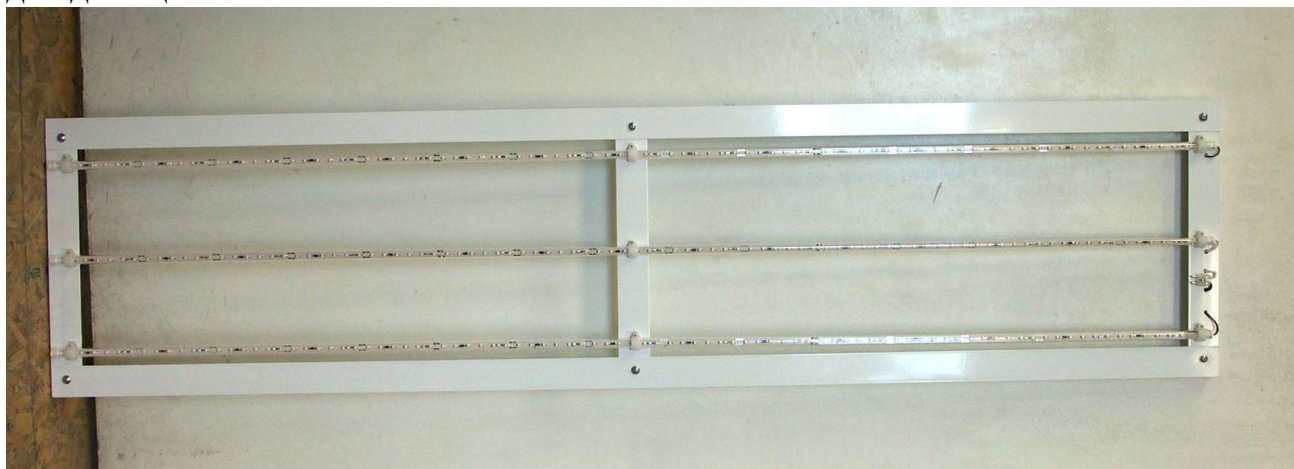
За осветление на открити пространства се използват светодиоди със студено бяла светлина

Осветители разположени на козирката под която се намират бензиноколонките. Тези осветители създават основното осветление в откритата зона на бензиностанцията с нива на осветеност около 200 lx., бяла светлина. Тъй като тези осветители са окомплектовани с металхалогенни лампи (МХЛ), излъчващи бяла светлина със светлинен добив до 110 lm/W, а ако се използва металхалогенна лампа с керамична горелка, добивът може да стигне и до 120 lm/W, смятаме, че засега не е актуална замяната на високоефективната лампа със светодиоди, които в този момент имат ефективност 130 lm/W

Осветители за информационните табели и рекламните бордове по фасадата

Луминесцентните лампи се заменят със светодиодни линейни модули, положени в прозрачни пластмасови тръби с подходяща дължина, която съвпада с дължината на луминесцентните лампи 18 W, 36 W или 58 W. Монтажът се осъществява с подходящо закрепване на групи, според осветяваната площ. Захранването се осъществява със захранващи устройства с напрежение 24 V.

Тук „ретрофит“ изпълнението е избягнато умишлено, тъй като стандартните куплунзи на луминесцентните лампи създават много експлоатационни проблеми, заради тежките експлоатационни условия, наличие на конденз, лоша дъждозащита и т.н.



Фиг. 2. Светодиоден модул за рекламно осветление

5. РЕАЛИЗИРАНА ИКОНОМИЯ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ

Сравнение между общата инсталирана мощност преди реконструкцията на осветителната уредба и след това е дадена в таблицата по-долу. В последната колона е дадено отношението на инсталираните мощности.

При рекламното осветление е реално постигнато намаляване на инсталираната мощност 4 пъти, след замяна на луминесцентното осветление със светодиодно. Светодиодите са изключително подходящи за такъв тип приложения. Особено в случаите, когато рекламните пана имат само една видима страна, целия поток на светодиодите може да се концентрира върху нея, без да са необходими отражения. При луминесцентните лампи се губи голяма част от потока, тъй като задната половина на лампата не осветява директно рекламното пано. Светодиодите са по-слабо чувствителни към ниски температури от луминесцентната лампа. Полученото отношение на инсталираните мощности е реализирано без да се използва възможността за лесно управление на светодиодите. На практика, голяма яркост на рекламните пана е необходима само по време на смрачаване или ако са разположени в силно осветен район. При настъпване на нощта, рекламите са отлично видими и при по-ниска светимост, което лесно може да се реализира с димиране на светодиодните източници.

Таблица 2. Сравнение между общата инсталирана мощност преди реконструкцията и след нея

		Преди реконструкцията	След реконструкцията	Отношение на инсталираната мощност преди реконструкцията, към тази след нея
№	Зона и тип на осветителите	Обща инсталирана мощност – стара уредба	Обща инсталирана мощност – LED	
1	РЕКЛАМНО ОСВЕТЛЕНИЕ	11 300 W	2 880 W	4:1
2	ЗОНА ПОД КОЗИРКАТА	3 700 W	- (3 700 W)	- (1:1)
3	РАЙОННО ОСВЕТЛЕНИЕ	3 600 W	510 W	7:1
4	ТЪРГОВСКА ЧАСТ (ВЪТРЕШНО ОСВЕТЛЕНИЕ)	2 400 W	750 W	3:1
Обща инсталирана мощност на осветителната уредба		17 300 W (21 000 W)	4 140 W (7 840 W)	4:1 (2,7:1)

При районното осветление е получена такова голямо отношение на инсталираните мощности преди и след реконструкция, тъй като съществуващата уредба е стара и заменените конвенционални осветители са изпълнени с живачни лампи, които както е известно имат много нисък светлинен добив.

При вътрешната осветителна уредба беше необходимо да се запази облика на помещението, така че луминесцентните осветители с огледална оптика бяха заменени със светодиодни, също с огледална оптика. Очевидно тук не е достигната оптималност при проектиране на светодиодния осветител, тъй като отношението на инсталираните мощности е най-малко.

От резултатите може да се обобщи, че инсталираната мощност при замяна на конвенционалните осветители със светодиодни намалява средно в отношение 4:1. Действително реализираното намаляване на инсталираната мощност за цялата осветителна уредба е 2,7:1, тъй като металхалогенните осветители, осветяващи пространството под козирката не са заменени със светодиодни.

От направената реконструкция може да се очаква годишна икономия на електроенергия в размер на 39470 kWh/год или 5920 лв/год, при приемане на средна цена на електроенергията от 0,15 лв/kWh (тази цена е актуална за търговски обекти от типа на бензиностанцииите в момента).

Ако се приеме 5 годишен срок за откупване на инвестициите за замяна на класическите осветители със светодиодни и 10 % годишна норма на възвращаемост, то може да се приложи метода на нетната сегашна стойност, за да се изчисли максималната цена на реконструкцията, която я прави изгодна от финансова гледна точка:

$$NPV = \frac{5920}{1.1} + \frac{5920}{1.1^2} + \frac{5920}{1.1^3} + \frac{5920}{1.1^4} + \frac{5920}{1.1^5} = 22441 \text{ лв}$$

Реалната цена на реконструкцията е над два пъти по-голяма от изчислената сума. Това означава, че трябва да се заложи по-голям срок на откупване, което обаче плаши инвеститорите.

6. Заключение

Замяната на конвенционалните осветителни уредби на обекти като бензиностанции със светодиодни такива е възможно, при това може да се очаква намаляване на инсталираната мощност около 4 пъти.

Цената на светодиодните осветители е все още твърде висока, за да направи такава замяна финансово изгодна. Когато обаче съществуващата осветителна уредба е технически остаряла и във всички случаи се нуждае от подмяна, бъдещата икономия на енергия може да покрие оскъпяването на задължителната реконструкция, дължащо се на използване на светодиодни осветители. Същото важи и при проектиране на нови осветителни уредби, където от икономия на енергия трябва да се покрие само разликата в цените на конвенционална и светодиодна осветителни инсталации.

Тенденциите за увеличаване на светлинния добив на светодиодните източници и намаляване на тяхната цена, както и очакваното развитие на цената на електроенергията ще доведат до изменение на финансовите параметри на подобна реконструкция и то в полза на светодиодните осветители.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] The IESNA Lighting handbook reference and application -9th edition.
- [2] Ambergreat LED Gas Station Light, LEDs magazine, 26 Jul 2010.
- [3] www.philipslumileds.com, LUXEON Power LEDs shine brightly in Gas Station and Convenience Market now fitted with 100% LED lighting.

Автори: д-р инж. Христо Василев – професор в катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (ЕСЕОЕТ), д-р инж. Ганчо Ганчев – доцент в Минногеолжки университет, д-р инж. Вълчан Георгиев – асистент в катедра ЕСЕОЕТ, д-р инж. Иван Цонев и Стефан Стефанов – Денима2001 ООД

ОЦЕНКА НА ГРЕШКИТЕ ПРИ ИЗМЕРВАНЕ ИНТЕНЗИТЕТ НА СВЕТЛИНАТА

Красимир Велинов

Резюме. Измерването на интензитета на светлината се извършва с определена точност, зависеща от обективни и субективни фактори. В доклада са разгледани отделните компоненти на грешките при измерванията

ASSESSMENT OF THE ERRORS IN THE MEASUREMENT OF LIGHT INTENSITY

Krassimir Velinov

Abstract. Measurements of light intensity is performed with a precision depending on the objective and subjective factors. The report examined various components of errors in measurements.

1. Въведение

Извършването на фотометричните измервания е свързано с допускане на различни грешки. Едно от възловите измервания е фотометриране на светлоразпределение на осветители и свързаното с това измерване на интензитет на светлината. Измерването на интензитета на светлината се извършва с определена точност, зависеща от обективни и субективни фактори.

Съгласно DIN 5032-7 [1] светлотехническите измервания се извършват от уреди разделени на четири класа:

Клас L – уреди с най-висока точност;

Клас A – уреди с висока точност;

Клас B – уреди със средна точност ;

Клас C – уреди с ниска точност;

В зависимост от класа на уреда се допускат следните грешки при измерването на отделните параметри:

Таблица 1. Максимална грешка за уреди измерващи интензитет на светлината

величина	L	A	B	C
V(λ) корекция	1.5%	3%	6%	9%
Cos-корекция	-	1.5%	3%	6%
Грешка на измервателния уред	0.2%	3%	4.5%	7.5%
Температурен коефициент	0.1%/К	0.2%/К	1%/К	2%/К

Интензитетът на светлината представлява пространствената плътност на светлинния поток за дадена посока:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Единицата за мярка на интензитет на светлината е кандела [cd]

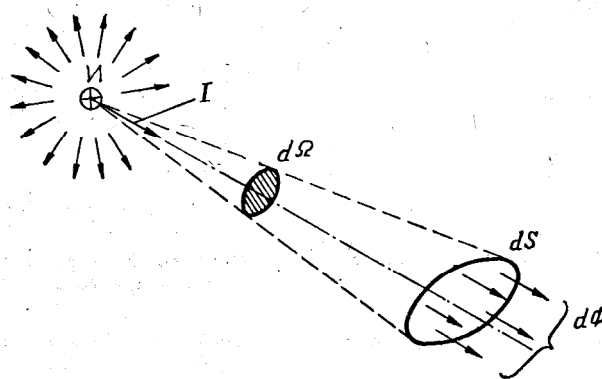
$$1\text{cd} = 1\text{lm} / 1\text{sr}$$

В международната измервателна система (SI) единицата за интензитет на светлината (1cd) приета за основна и до скоро бе дефинирана с еталон от абсолютно черно тяло. (При температура на втвърдяване на платина 2046K и налягане 1 Pa интензивността на излъчваната от абсолютното черно тяло светлина е 60 cd при площ на светещия отвор 1cm^2).

В момента в системата SI единицата за интензитет на светлината е силата на светлината в дадена посока от източник, излъчващ монохроматично лъчение с честота 540.1012 херца и интензитет на лъчението в тази посока $1/683$ вата на стерadian.

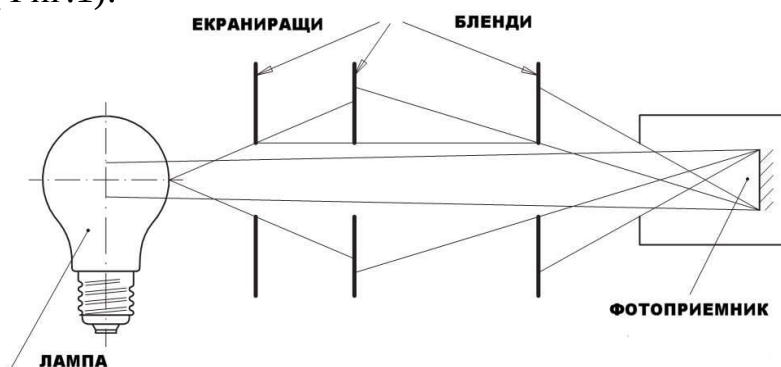
Стерadian е пространственият ъгъл на конус с връх в центъра на сфера с радиус r , който отрязва от повърхността на сферата площ, равна на площта на квадрат със страна, равна на радиуса на сферата (r^2).

Избраната честота съответства на жълтозеления цвят, при който човешкото око притежава най-голяма чувствителност.



2. Измерване на интензитет на светлината

Измерването на интензитета на светлината се извършва чрез сравняване с еталонен източник на интензитет или с луксметър, като се извършва по следната схема (Фиг.1):



Фиг. 1. Измерване на интензитет на светлината с луксметър

$$I = E_{\perp} * R^2$$

Където:

I е интензитетът на светлината в определена посока;

$E_{\perp}$ - нормална осветеност;

R – разстояние между светлинния източник и фотометричната глава.

В горната постановка се вижда, че грешка в измерванията могат да се получат от няколко фактора:

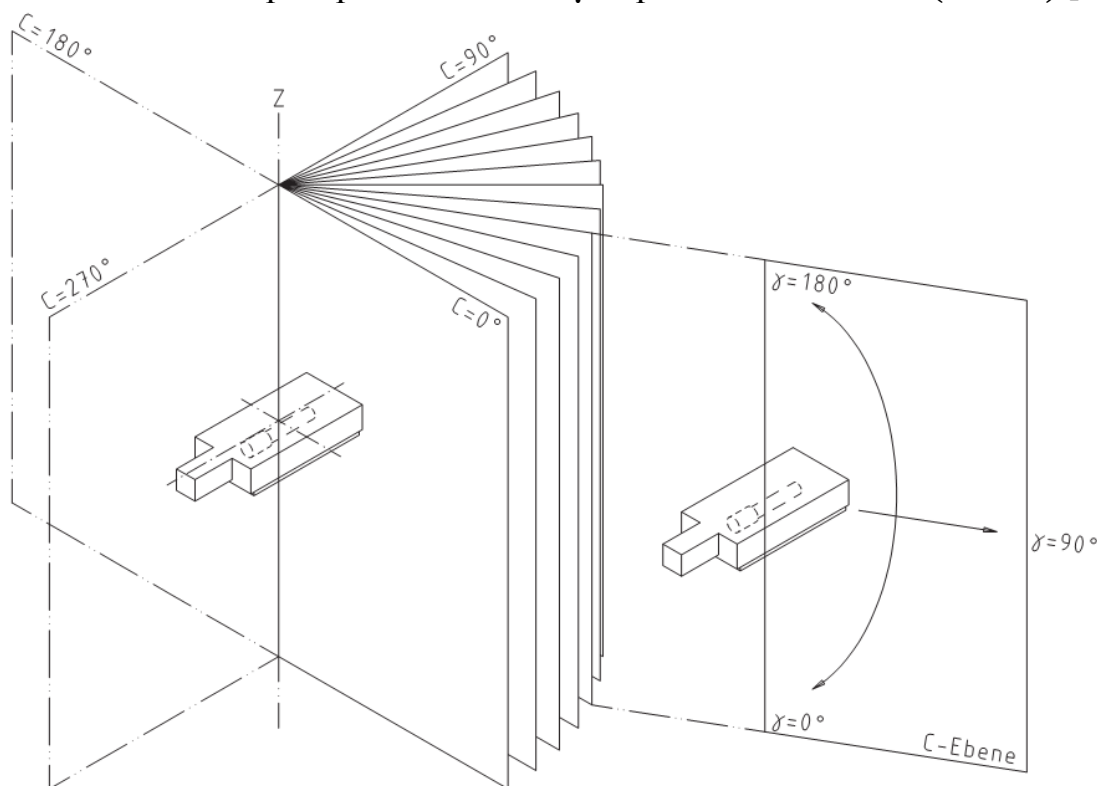
- грешка в измерване на разстоянието;
- грешка при измерване на осветеността;
- грешка в от завъртане на фотоприемника спрямо оста на излъчване.

Тъй като от измерване на интензитет на светлината са производни много други фотометрични измервания, то е от изключителна важност да се познава точността с която работиме.

В момента в България най-висока точност на измерване на интензитет на светлината се гарантира в Националния център по метрология – сектор оптични измервания. За диапазона от 10 cd до 1 000 cd се гарантира точност - 1,5 %, като тя се постига с еталонни светлоизмерителни лампи за интензитет на светлината.

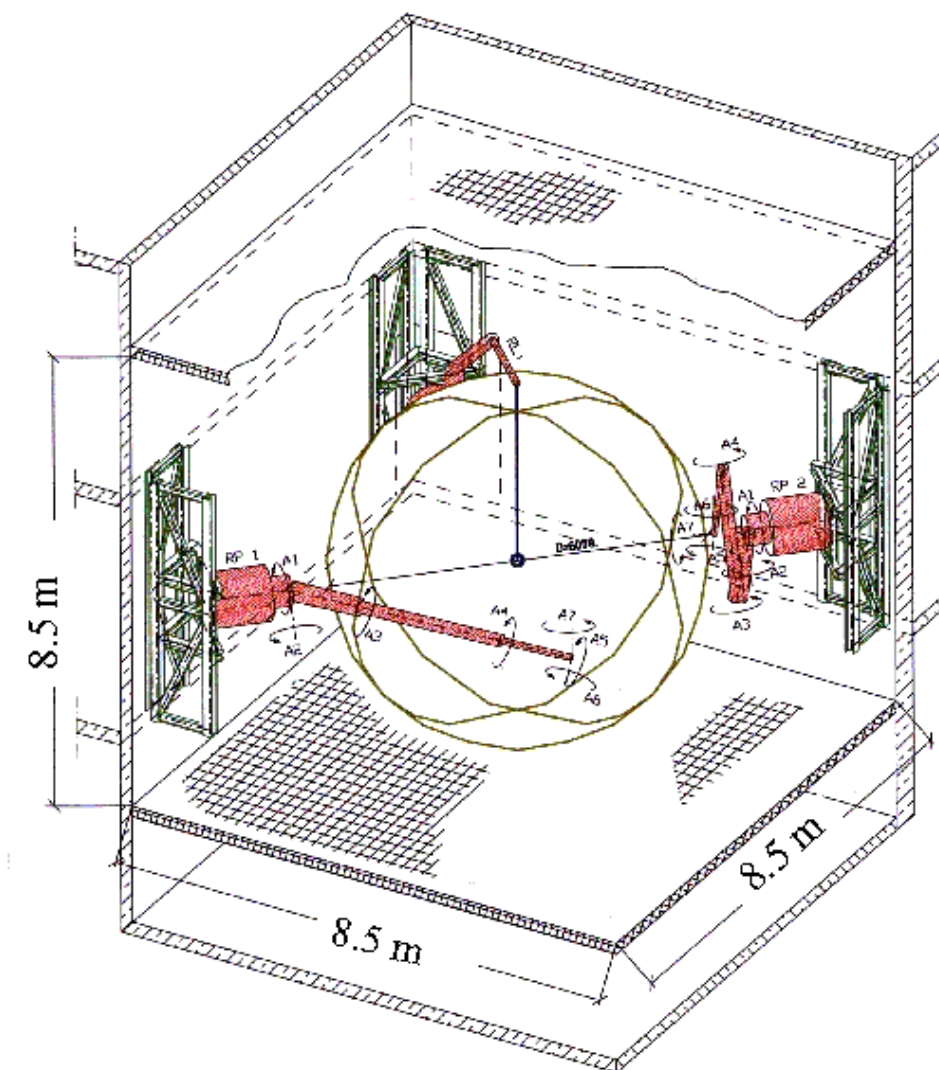
3. Фотометриране на осветители и видове грешки

Измерването на пространственото разпределение на интензитета на светлината може да се извърши по три схеми. Най-разпространено в практиката е заснемането на светлоразпределението в γ -C равнинна система (Фиг. 2) [2,3]



Фиг. 2. γ -C равнинна система

Съобразно [1] и таблица 1 към клас L може да причислим гониофотометрите за възпроизвеждане на еталона за светлинен поток. Пример за такъв е гониофотометърът на РТВ – германския център по метрология (Фиг. 3) [4] и новият гониофотометър на центърът по метрология на България (Фиг. 4)



Фиг. 3. Гониофотометър за измерване на светлинен поток [4]



Фиг. 4. Гониофотометър за измерване на светлинен поток на НЦМ-България

Измерването на интензитета на светлината при фотометриране на осветители е свързано с допускането на следните грешки:

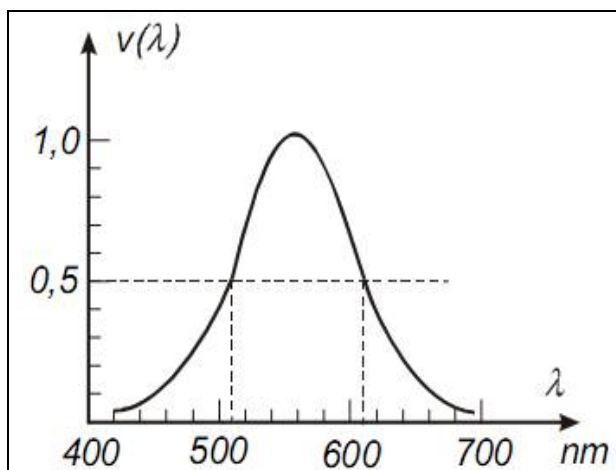
1. $V(\lambda)$ корекция
2. Cos-корекция
3. Грешка на измервателния уред
4. Температурен коефициент и измерване на температура.
5. Грешка при измерване на разстоянието
6. Ъглова грешка
7. Грешка от времето за интегриране на сигнала
8. Грешка в допълнителната оптична система – лещи, огледало
9. Грешка от размера на светещия обект

По-долу последователно ще бъдат разгледани проблемите и възможностите за намаляване на отделните грешки.

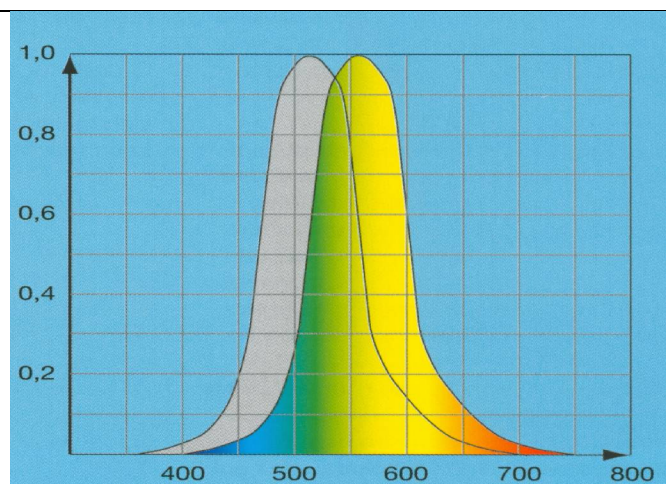
1. Грешка от не добра $V(\lambda)$ корекция

Човешкото око възприема само лъчи с дължина на вълната от 380 до 760 nm. Поради различната спектрална чувствителност на зрителния анализатор към видимите лъчи само една част от енергията, попадаща в областта на видимите лъчи се възприема от зрителния анализатор.

Отзивчивостта на зрителния анализатор към електромагнитните излъчвания се нарича спектрална чувствителност и за нея е възприета специална функция $V(\lambda)$. Тя е различна за яркости под и над 1 cd/m^2 . (фиг. 5 и 6)



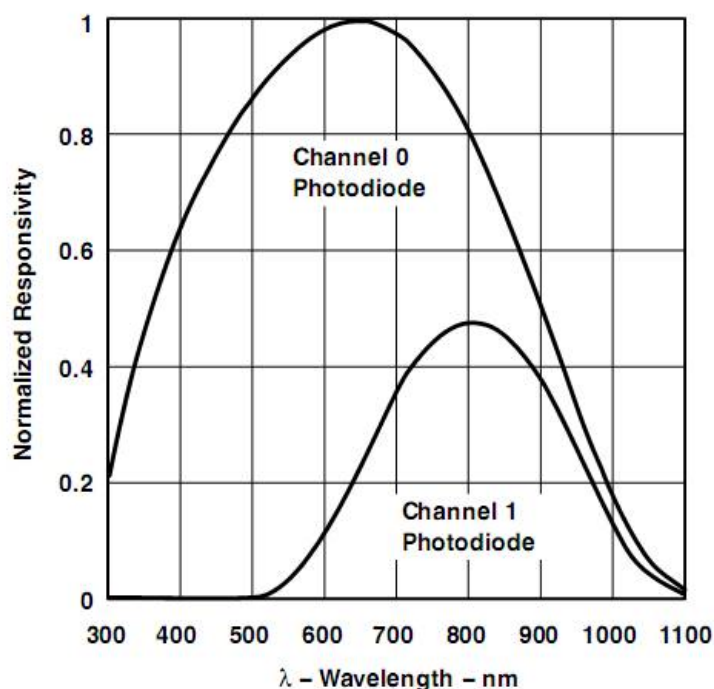
Фиг. 5. Относителна спектрална чувствителност на човешкото око при „дневно виждане”



Фиг. 6. Относителна спектрална чувствителност на човешкото око при „нощно виждане” – $V'(\lambda)$. (лявата графика)

За да бъдат коректни фотометричните измервания, спектралната чувствителност на фотоприемника трябва да съвпада с относителната спектрална чувствителност на човешкото око $V(\lambda)$. В методиките за измерване не се споменава, че при малки яркости фотоприемника трябва да има съответната спектрална чувствителност $V'(\lambda)$.

Исканата спектралната чувствителност се постига чрез внасяне на подходящи примеси в полупроводниковия материал, чрез монтиране на допълнителни оптични филтри пред фотоприемника и по програмен път чрез използване на два и повече фотоприемника с различна спектрална чувствителност (Фиг. 7) [6].



Фиг. 7. Спектрална чувствителност за фотоприемник с два канала

2. Грешка от не добра Cos-корекция

За да няма грешка от измерванията фотоприемника трябва да има пространствена чувствителност пропорционална на $\cos(\alpha)$, където α е ъгъл сключен между оптичната ос на фотоприемника и измервания обект. Допустимата грешка на Cos-корекцията за различните класове уреди е показана в табл. 1.

3. Грешка на измервателния уред

Всеки измервателен уред дава грешка при измерванията. В зависимост от типа на уреда грешката може да бъде обективна и субективна. В последно време повечето измервателни уреди автоматично изпращат данните към записващо устройство или компютър, като по този начин свеждат субективната грешка до минимум. Обективната грешка на уреда може да бъде няколко вида:

- грешка от дискретизация;
- грешка от отместване на нулата;
- грешка от препълване;
- грешка от превключване на обхвата;
- грешка от неправилно подбрано време за интегриране на сигнала;

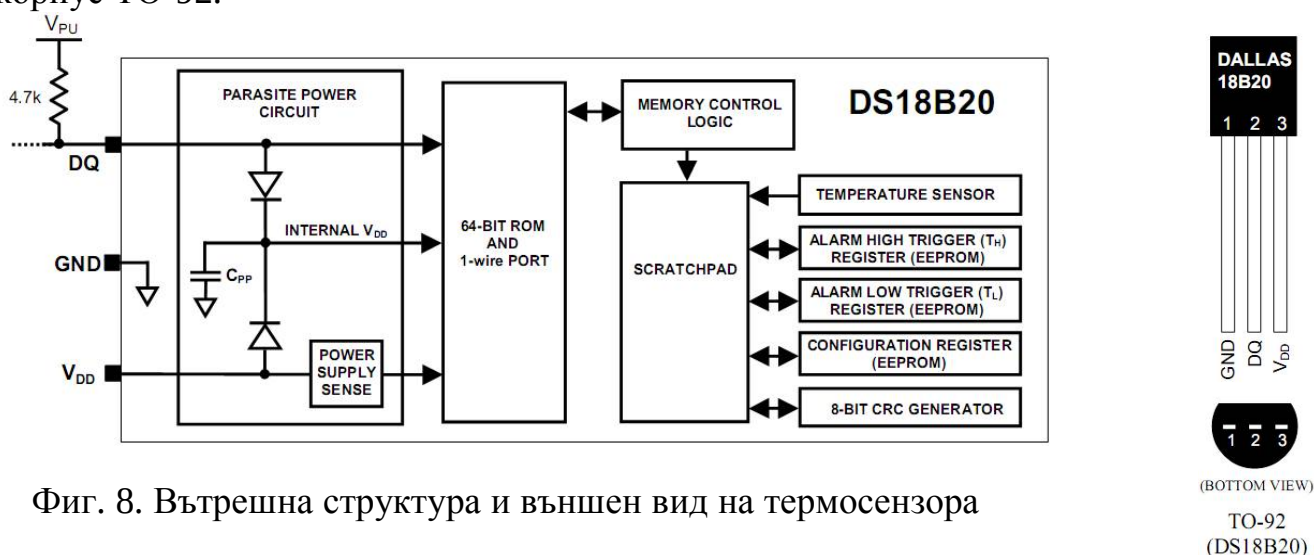
От горните грешки като най-голяма може да се получи грешката от дискретизация на сигнала и лошо калибриран обхват. На пръв поглед ако се използва 16-разряден аналого-цифров преобразувател (АЦП), грешката от

дискретизация е $1/2^{16} \sim 0.0015\%$. В действителност измерената стойност може да варира от 50 – 1000 единици, като грешката може да достигне до 2%. При използване на АЦП с по-малка разрядност – примерно 12 разряда средната грешка ще бъде от 2 – 4%. Използването на превключватели на обхватите в този случай ще доведе до допълнителна грешка особено в случаите когато това не са фабрично калибрирани устройства. Допустимата грешка на измервателния уред за различните класове уреди е показана в табл. 1.

4. Температурен коефициент и измерване на температура.

Всяко устройство работи оптимално в някакъв температурен диапазон. Когато използваме полупроводникови фотоприемници трябва да се знае, че изходният им сигнал е зависим от околната температура. За да се избегне това влияние се практикуват два способа – термокомпенсация и термостабилизация.

В същото време измерваното устройство може да работи при температура различна от номиналната. Контролирането на температурата е особено необходимо при измерване на светодиодни осветители, тъй-като живота на светодиодите и светлинния им поток зависят силно от температурата на прехода. Индиректно тази температура се контролира чрез измерване на температурата на осветителя в определени точки. В този случай се препоръчва използването на сензори тип DS18B20. Широко разпространената микро-схема на цифров термометър [7] осигурява измерване на температурата в диапазона $-55 \div +125^{\circ}\text{C}$ с точност 0.1°C . Най-голямото предимство на този сензор е че той е заводски калибриран и е гарантирана точност $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ в диапазона $-10 \div +85^{\circ}\text{C}$. Вътрешната структура на сензора е показана на фиг. 8. Сензорът е монтиран в корпус TO-92.



Фиг. 8. Вътрешна структура и външен вид на термосензора

Предаването на данните се извършва с помощта на 1-проводен интерфейс (1-WireTM) на фирмата DALLAS. На базата на този интерфейс фирмата е създавала мрежа наречена microLAN (или μLAN) [8].

5. Грешка при измерване на разстоянието

На фиг. 1 е показана постановката за измерване на интензитет на светлината. Във формулата на втора степен участва разстоянието между оптичния център

на източника и фотоприемника. На пръв поглед е много лесно да се измери това разстояние особено при наличието на съвременните лазерни далекомири. В действителност за реален обект – осветител или обемен светещ предмет (примерно сфера от светодиоди) може да бъде трудно това разстояние да се измери със задоволителна точност.

6. Ъглова грешка

При фотометрирането на осветители се получава и допълнителна ъглова грешка от позиционирането на фотоприемника чрез завъртането му в равнините γ и C . При чина за грешките са разколебаване на рамото на фотоприемника или огледалото, пропускане на стъпки (при задвижване със стъпкови двигатели) и не добро позициониране на оптичния център на осветителя спрямо геометричния център на въртене.

7. Грешка от времето за интегриране на сигнала

Основният недостатък повечето гониофотометри е голямото време за фотометриране на светлоразпределението. Причина за това е крайната скорост с която трябва да се върти рамото с фотоприемника или огледалото. Проблемът не е механичен – големият въртящ момент може да се преодолее с по-мощен двигател. Ограниченията идват от захранването на осветителите с променливо напрежение и честота 50Hz. Минималното време за измерване в една точка трябва да продължи най-малко два полупериода – 20 милисекунди. За да се повиши точността на измерването се практикува за всяка точка да се направят 10 измервания, което съответства на 0.2 сек. Ако рамото или огледалото на гониофотометъра се движи равномерно, то за да не се допуска голяма ъглова грешка би трябвало ъгловата му скорост да не е по-висока от $0.5^\circ/\text{sec}$. При измерване през 5° в C -равнината, минималното време за измерване е от порядъка на 8 часа. За да се съкрати това време се практикува захранването на светлоизточника с постоянен ток или използването на по-голям брой фотоприемници [4,5].

8. Грешка в допълнителната оптична система – лещи, огледало

В случаите когато за фотометриране се използва огледален фотометър или друга допълнителна оптика (включително и бленди), трябва да се отчете, че тя внася допълнителни загуби на светлина. Естествено при калибрирането на уреда тези загуби се отчитат в калибровъчния коефициент, но по време на експлоатация примерно едно огледало може да се покрие с прах и преди всяко измерване то трябва да бъде почиствано. По-лошото е че огледалото старее, което налага периодична калибровска на уреда.

9. Грешка от размера на светещия обект

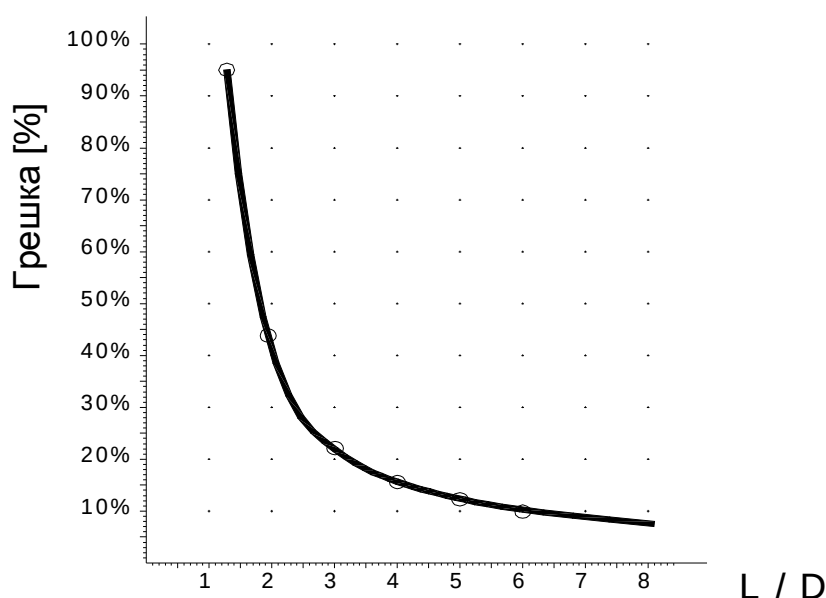
При линейни и площови обекти се получава допълнителна грешка. Може този обект да се раздели на краен брой елементи с достатъчно малки размери и геометрично раздалечени до запълване на реалния обект. Очевидно е, че всеки

такъв елемент няма да свети в оптичната ос на измервателния уред и ще внася ъглова грешка или грешка от разстояние.

За да бъде измерването с минимална грешка ($< 1\%$) трябва да се спазват следните условия: [3]

Таблица 2. Минимално фотометрично разстояние в зависимост от размера на осветителя

Измервателно разстояние	Дължина на осветителя
5 м	0.3 м
10 м	1.3 м
15 м	1.6 м



Фиг. 9. Влияние на относителните размери на фотометрирания светлинен източник върху точността на измерването (Фотометрично разстояние - L към размер на светещия обект- D)

4. Заключение

Отчитането на всички компоненти и отстраняването на грешките при измерване на интензитет на светлината е от изключителна важност при конструирането на уреди за оптични измервания, както и за извършване на самите измервания .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] DIN 5032-7, Klassenleitung von Beleuchtungsstärke und Leuchtdichtemessgeräten, Lichtmessung, 1999.
- [2] DIN 5032-1, Lichtmessung, 1999.
- [3] DIN 5032-4, Lichtmessung, 1999.

- [4] http://www.ptb.de/de/publikationen/jahresberichte/jb2001/bilder/04_3_Goniophotometer.gif..
- [5] Велинов, К. Гониофотометър за експресно измерване на светодиодни осветители, XIV Национална конференция с международно участие - Светлина 2010, 10 – 12 Юни 2010, Варна, България.
- [6] Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc., TSL2561, LIGHT-TO-DIGITAL CONVERTER.
- [7] Dalas semiconductor, MAXIM, DS18B20, Programmable Resolution, 1-Wire Digital Thermometer.
- [8] Dalas semiconductor, MAXIM, Руководство по применению AN155.
- [9] БДС EN 13032-1:2005, Светлина и осветление. Измерване и представяне на фотометрични данни на лампи и осветители. Част 1: Измерване и формат на папката.
- [10] БДС EN 13032-2:2007, Светлина и осветление. Измерване и представяне на фотометрични данни на лампи и осветители. Част 2: Представяне на данни за работни места на закрито и на открито.
- [11] БДС EN 13032-3:2008, Светлина и осветление. Измерване и представяне на фотометрични данни на лампи и осветители. Част 3: Представяне на данни за аварийно и евакуационно осветление на работни места.
- [12] БДС EN 12665:2005, Светлина и осветление. Основни термини и критерии за специфични изисквания към осветлението.

Автор: доц. д-р. Красимир Велинов - МГУ „св. Иван Рилски“, кат. „Електрификация на минното производство“

ОПТИМИЗАЦИЯ НА КОНСУМАЦИЯТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ ЗА ОСВЕТЛЕНИЕ В ОБЩЕСТВЕНИ СГРАДИ ПОСРЕДСТВОМ ГЕНЕТИЧЕН АЛГОРИТЪМ

Ива Петринска, Ханес Топфер

***Резюме.** В настоящата публикация е представен нов подход за оптимизация на консумираната за целите на осветлението електрическа енергия и възможността за използването му при автоматизация на управлението на осветителни уредби. Целта на изследването е да се минимизира консумацията на електрическа енергия посредством ефективно използване на естествената светлина. За решаване на така дефинираната задача е избран метод за оптимизация, базиран на генетичен алгоритъм. За информационно обезпечаване на генетичният алгоритъм са използвани резултати от експериментални изследвания на коефициентите на естествено осветление при източно и западно изложение на светлинните отвори в обществени сгради.*

OPTIMIZING LIGHTING ENERGY SAVINGS IN PUBLIC BUILDINGS THROUGH GENETIC ALGORITHM

Iva Petrinska, Hannes Toepfer

***Abstract.** The current research represents a new approach for lighting energy consumption optimization and automation of indoor lighting systems. The basic idea is to minimize the electrical energy consumption of the lighting system by effectively using the natural light. The approach proposed uses genetic algorithm as an optimization tool for the lighting control strategy. Further reduction of the energy consumption for lighting and improvement of the system's performance is realized by utilizing experimental results for daylight coefficient's values for rooms with west and east geographical exposure, thus reducing the number of sensors needed for correct operation of the system.*

1. Introduction

Buildings consume up to 40% of total end-use energy in the European Union [1]. Lighting accounts for 14% of the primary energy use in public buildings and therefore holds a greatest potential for energy savings among all the electrical systems, except the space heating. Although a great percent of the energy savings can be achieved through daylight harvesting, load shedding, scheduling, etc., modern

lighting control technologies are still considered too expensive for public buildings, because of the big retrofitting costs [2]. The emergence of wireless sensor network technologies promises an economic lighting system by replacing the costly wiring with wireless devices. Not only the installation of photosensors and occupancy sensors benefit by wireless sensor network technologies, but also light switches or dimmers may be wirelessly enabled to form actuator networks for more sophisticated lighting control [6].

Energy savings and efficiency are some of the most important design considerations for contemporary lighting systems of public buildings. For achieving energy savings it is important considering an appropriate lighting control system. The most efficient lighting control systems are those that use the maximum possible amount of daylight and only complete it with artificial electrical lighting, whenever the illuminance levels on the working plane become lower than the norm [4]. This lighting control strategy is called daylight harvesting. A well designed daylight harvesting system guarantees a preset light level on the work plane at all times and has an impact on human productivity [5]. The artificial light only starts to dim or switch the fixtures off (on) when the norm light level is exceeded by the overall amount of light (artificial + daylight). There are a lot of lighting control strategies existing, but the most widely employed are switching and dimming lighting controls. Each of these control methods have its advantages and drawbacks and its efficiency depends on a lot of factors, but mainly on the geographical coordinates of the place where it will be used, the architecture of the building and the availability of natural light.

2. Approach and considerations

The illuminance on the work planes in public buildings result from the combined light contribution of multiple overhead luminaires. The European standard for indoor lighting EN-12464 gives the norm values of the necessary illuminance on the work planes according to the visual tasks being performed [3]. This research is targeted in developing an algorithm for intelligent lighting control system for public buildings with the following objective: minimize the overall lighting energy usage without compromising the norms given by the standard for indoor lighting. The control algorithm formulated considers lighting control as a linear programming problem and is based on genetic algorithm. The algorithm uses experimental data for daylight coefficients obtained for public buildings in Bulgaria. The two basic control strategies taken in consideration in the optimization algorithm are automatic switching of the lighting fixtures and individual dimming of the light sources.

The room taken in consideration in the current research is a laboratory, located on the third floor of the Electrotechnical Faculty of the Technical University of Sofia, Bulgaria. The floor area of the laboratory is 52 m², and its height is 2.8m. There are two windows with a total area of 14m² facing west (for enhanced results the same geometry is taken in consideration with windows facing east). The walls and the ceiling are white; the work plane is light gray. The corresponding reflectance coefficients of the surfaces are 70%, 50%, 30%. New design of the lighting system in the room is considered with 12 electric lighting fixtures to provide electrical lighting.

Each fixture is provided with one fluorescent lamp, T5, 35W and electronic ballast – figure 1a. Figure 1b gives the overall illuminance that the electrical lighting system provides in the test laboratory.

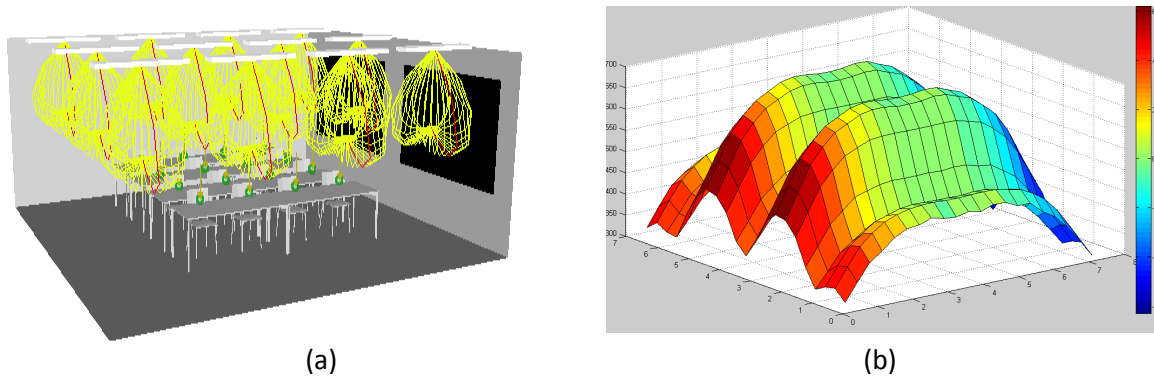


Fig. 1. Lighting system configuration (lighting fixtures and luminous intensity curves) of the test room (a). Illuminance provided by the electrical lighting system (b)

Sixteen working places are taken in consideration – figure 2 [10]. The daylighting coefficients are considered the same along the work places situated at the same distance from the window and their values decrease in a direction perpendicular to the windows. The daylight coefficients remain the same, no matter of the atmospheric conditions outside the room. They change with the season and geographical exposure of the windows of premises and have different values in the morning and in the evening. The daylight coefficients give the correlation between the inside and outside illuminance and once calculated, they can be used to get the values of the illuminance on work planes indoors, while only the outside natural illuminance is measured – figure 3.

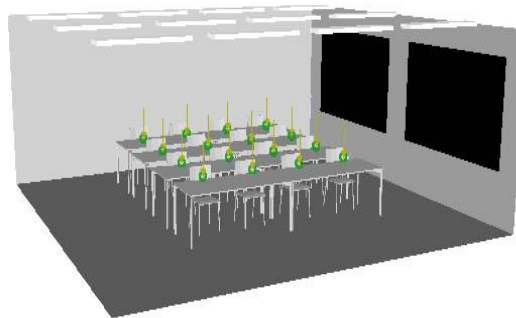


Fig. 2. Configuration of the control points on the working plane taken in consideration

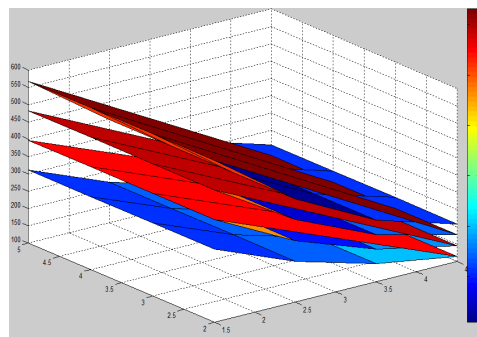


Fig. 3. Illuminance on the work planes taken in consideration, calculated by means of daylight coefficients

3. Formulation of the daylighting control and optimization problem

The electrical lighting fixtures are operated to maintain constant illuminance level of 500lx on the work plane in 16 control points where the desks are situated. The illuminance output required from the electrical lighting system is determined by taking the difference between the norm value of the illuminance for the task performed and the calculated daylight illuminance for the time of the day reviewed. Thus the illuminance level required by the artificial lighting is given by the equation:

$$E_{AL} = E_N - DC \cdot E_{DO} \quad (1)$$

where,

- E_N is a vector representing the desired illuminance level on the working plane;
- DC is the matrix for the daylight coefficients;
- E_{DO} is the outside illuminance level (calculated from statistical calendars).

The overall lighting in a space is considered a linear combination of the light contributions of each of the luminaires.

To optimize the electrical energy use from the light fixtures it is necessary to minimize the entire lighting output of the system. Each lamp then must be set to provide a specific amount of light to supplement available daylighting in order to maintain the desired illuminance level in all working zones. The optimization problem can be expressed by equation (2) to state that the required additional illuminance output from the electrical lighting should be equal to the desired illuminance level minus the illuminance, received through the natural light:

$$A \cdot X = E_{AL} = E_N - DC \cdot E_{DO} \quad (2)$$

where,

- X is a matrix that provides the illuminance output from the electrical lighting system. The matrix X is m x n, where m is the number of lighting circuits (lamps) in the space;
- A is a n x m matrix that represents the illuminance contribution of the m lighting fixtures to the n working zones;
- E_{AL} is a n x 1 matrix that represents the illuminance required from the electrical lighting system.

The electrical lighting energy use depends on how the electrical inputs for the lamps are adjusted to provide the required illuminance levels. This adjustment in the current case utilizes two strategies – on/off and dimming. It should be noted that when using dimming strategy the relation between the light output of the lighting fixtures and the power consumption of the same fixtures is not linear. Dimming below 10% does not reduce the energy consumption any further, but the color rendering of the light source decreases significantly and efficacy declines. In order to deliver different light outputs for energy savings, it is necessary to enable individual control of each luminaire.

If the number of the working places (control points) is equal to the number of luminaires installed in the room under consideration ($n=m$), the system of linear equations can be solved and has only one solution. However, when the space has more working zones than electrical lighting circuits ($n > m$), equation 2 becomes an over-determined system of linear equations and there is no unique solution of the system. In this case an approximate solution is necessary. That is why an $n \times 1$ error vector, E , is introduced as follows:

$$E = E_{AL} - A \cdot X \quad (3)$$

This vector E represents the excess illumination for the working zones. To achieve the maximum energy savings, the norm of the excess illumination, E , must be minimized:

$$\|E\| = [(E_{AL} - A \cdot X)^T (E_{AL} - A \cdot X)]^{1/2} \quad (4)$$

In the research presented, a minimization method based on the Genetic Algorithm (GA) approach is used to estimate X and consequently the potential electrical lighting energy savings. Specifically, the GA method determines the most efficient operating schedule for electrical lighting lamps and calculates the excess illumination based on the desired illuminance level for the working zones.

4. Genetic algorithm

A genetic algorithm is an explanatory procedure, inspired by evolution that is often able to find near optimal solutions to complex problems [7]. To do this it maintains a set of trial solutions, called individuals, and forces them to evolve towards an acceptable solution. First a representation of possible solutions must be developed. These algorithms encode a potential solution to a specific problem on a simple chromosome-like data structure, and apply recombination operators to these structures in such a way as to preserve critical information. Then, starting with an initial random population and employing survival-of-the-fittest and exploiting old knowledge in the gene pool, each generation's ability to solve the problem must improve. Given a clearly defined problem to be solved, a simple GA works as follows [8]:

1. Start with a randomly generated population of n chromosomes (candidate solutions of the problem).
2. Calculate the fitness $f(x)$ of each chromosome x in the population.
3. Repeat the following steps until n offspring have been created:
 - Select a pair of parent chromosomes from the current population, the probability of selection being an increasing function of fitness.
 - With chosen crossover probability cross over the pair to form two offspring.
 - With chosen probability mutate the two offspring.
4. Replace the current population with the new population.
5. Go to step 2.

Each iteration of this process is called a generation. A GA is typically iterated for anywhere from 50 to 500 or more generations. The entire set of generations is called a run. At the end of a run there are often one or more highly fit chromosomes in the population. Since randomness plays a large role in each run, two runs with different random-number seeds will generally produce different detailed behaviors. A GA provides a number of potential solutions to a given problem and the choice of final solution is left to the user.

For illustration of the genetic algorithm used in the current research, selected results are shown in tables below. A Matlab program has been developed to code the objective function (fitness function) and the Optimization toolbox has been used for the optimization procedure. For results confirmation after running the GA, another run is performed using hybrid function fmincon. The hybrid function is an optimization function that runs after the genetic algorithm terminates in order to improve the value of the fitness function [9]. The hybrid function uses the final point from the genetic algorithm as its initial point. The results obtained have been than simulated in Dialux to confirm that the lighting level needed on the work plane is achieved and the approach chosen is appropriate. The parameters needed for GA initialization are:

- Selection method: Roulette Wheel;
- Crossover: Shuffle;
- Mutation: Adaptive feasible;
- Crossover rate: 0.7;
- Population size:100;

The results of the GA-based optimization as well as electrical lighting use energy savings, obtained by the control strategies used compared to a lighting installation with manual control are discussed below.

5. On/off artificial lighting control

After obtaining the results from the GA based optimization procedure, an operation schedule for the lighting installation has been developed. Because of the short period of time between the sunrise and the moment when the norm illuminance on the work planes is reached and the fast changing values of the natural illuminance outside, every lighting control scene is considered to last for thirty minutes. Table 1 gives the operation schedule for all of the lighting fixtures considered for a typical sunny day in spring for the room with west geographical exposure. Table 2 shows the results for the same room, but with windows facing east. In tables 1 to 4 “1.00” means the luminaire is on and “0.00” – off.

Table 1. Work schedule of the lighting fixtures for typical sunny day in spring – control strategy on/off switching, orientation of the windows – west

Time	Luminaire number											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7:00-7:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00
7:30-8:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
18:00-18:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00
18:30-19:00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00

Table 2. Work schedule of the lighting fixtures for typical sunny day in spring – control strategy on/off switching, orientation of the windows – east

Time	Luminaire Number											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7:00-7:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
7:30-8:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
18:00-18:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
18:30-19:00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00

Figures 4 and 5 show respectively the lighting situation and the illuminance distribution from electrical lighting for the test laboratory with west geographical orientation on a sunny spring day, for period of time from 18:30 to 19:00h. The lighting control strategy is on/off.

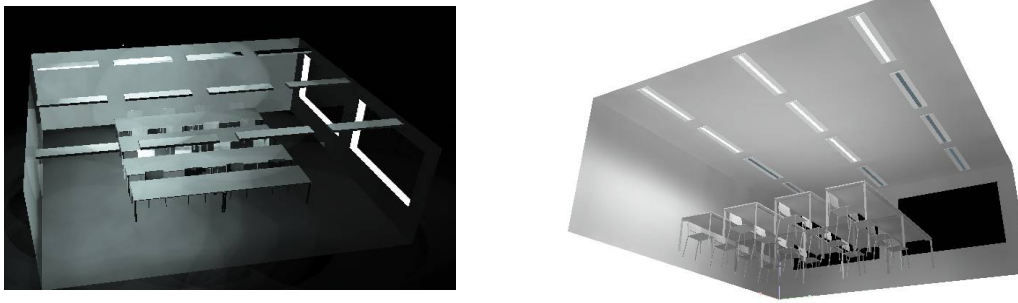


Fig. 4. Lighting scene (on/off control) for period of time from 18:30 to 19:00h on a sunny spring day for a room with windows facing west

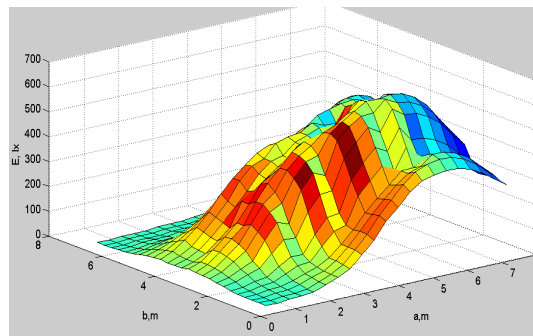


Fig. 5. Illuminance distribution (on/off control) for period of time from 18:30 to 19:00h on a sunny spring day for a room with windows facing west

6. Dimming lighting control strategy

In the case of lighting control strategy with dimming of the light sources the results, obtained for the work schedule of the fixtures is shown in tables 3, 4. Tables 3 and 4 are for sunny spring day, west and east geographical exposure respectively.

Table 3. Work schedule of the lighting fixtures for typical sunny day in spring – control strategy dimming, orientation of the windows – west

Time	Luminaire Number											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7:00-7:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.29	0.04	1.00	1.00	0.87
7:30-8:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.96	0.26
18:00-18:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.07	0.00	0.86	0.91	0.60
18:30-19:00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.25	0.25	0.71	0.88	0.20	0.54	0.13	1.00

Table 4. Work schedule of the lighting fixtures for typical sunny day in spring – control strategy dimming, orientation of the windows – east

Time	Luminaire Number											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7:00-7:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.55	0.12
17:30-18:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.84	0.39
18:00-18:30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.66	0.76	0.23	0.22	0.00	0.65
18:30-19:00	0.25	0.19	0.32	0.60	0.64	0.34	0.53	0.64	0.24	1.00	0.78	1.00

The lighting situation and illuminance distribution from the artificial lighting for the test laboratory with west geographical orientation on a sunny spring day, for period of time from 18:30 to 19:00h, are shown on figures 6 and 7. These results correspond to the results, shown on figures 5 and 6, but the lighting control strategy in this case is dimming.

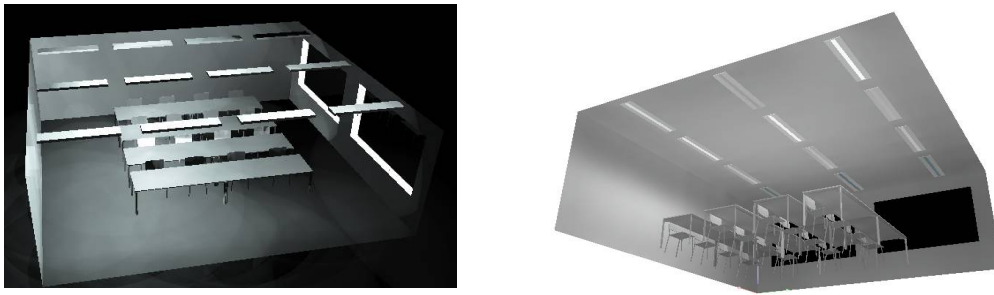


Fig. 6. Lighting scene (dimming control) for period of time from 18:30 to 19:00h on a sunny spring day for a room with windows facing west

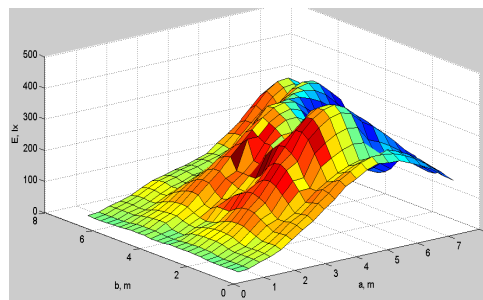


Fig. 7. Illuminance distribution (dimming control) for period of time from 18:30 to 19:00h in the morning on a sunny spring day for a room with windows facing west

Table 5 shows the potential lighting energy savings, that can result from using the two considered lighting control strategies based on GA optimization, compared to the case of lighting installation using manual switching.

Table 5. Potential lighting energy savings using on/off switching or dimming strategy according to the available daylight levels, compared to manual switching of the lighting system

Geographical Exposure	Type Day, Season	Energy Savings, On/Off, kWh/day	Energy Savings, Dimming, kWh/day
West	Sunny, Spring	0.61	0.66
East	Sunny, Spring	0.61	0.66
West	Gloomy, Spring	2.10	2.31
East	Gloomy, Spring	2.37	2.66
West	Sunny, Summer	0.35	0.36
East	Sunny, Summer	0.2	0.21
West	Gloomy, Summer	2,02	2,3
East	Gloomy, Summer	1,47	1,8
West	Sunny, Autumn	0,79	0,91
East	Sunny, Autumn	0,57	0,83
West	Gloomy, Autumn	1,91	2,26
East	Gloomy, Autumn	1,88	2,23
West	Sunny, Winter	1,03	1,27
East	Sunny, Winter	0,84	1,00
West	Gloomy, Winter	1,47	2,08
East	Gloomy, Winter	1,23	1,59

Having statistical data about the number of sunny and gloomy day in every season for the climate of Bulgaria, the early energy savings can be calculated and the saved energy in terms of money can be obtained [12]. The value of the energy, saved by employing the two different lighting control strategies can be used for economical appraisal of which system is worth to invest in.

7. Economical Appraisal

The net present value method of economical appraisal is usually used when evaluating the undertaking of a project. Usually, that requires a large outlay of capital in the present moment in exchange of series of positive cash flows in the future [13]. The series of cash flows have to be figured out precisely in order to obtain right appraisal. In the current research, the net present value of the two considered lighting control systems is found through formula (5) in order to analyze which of them is more appropriate for installation in public buildings for the climate and geographical exposure of Bulgaria.

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (5)$$

where,

- C_0 is the investment value for the lighting system;
- C_t is the positive cash flow for the year t ;
- r is the discount rate, taken in consideration.

The price of a lighting system including dimmable high frequency ballasts is about 250 Euro, while the price of a system with high frequency ballasts, that do not allow dimming of the light sources is approximately 100 Euro. The current price of

the electrical energy in Bulgaria is 0.10 Euro per kWh and the period chosen for return of the investments is 5 years. The positive cash flows are the values of the energy saved through different lighting control. If the discount rate is considered 15% per year and the energy savings obtained in the current research are used, the NPV value of the lighting system using dimming control and the NPV of the on/off switching control system are as follows:

- NPV = -231.7 for the dimming lighting system applied in the room with west geographical exposure;
- NPV = 22 for the on/off control system applied in the room with west geographical exposure;
- NPV = -255.2 for the dimming lighting system applied in the room with east geographical exposure;
- NPV = 4.6 for the on/off control system applied in the room with east geographical exposure.

Positive value of the NPV means that the project can be undertaken, while negative value of NPV means, that the investment should not be made, because the return of the capital cannot be ensured.

8. Conclusions

There is no considerable difference in lighting energy savings obtained by the two control strategies taken in consideration, because the transition between day and night for the climate of Bulgaria is short in terms of time and the norm levels of the illuminance on the work plane are reached fast, especially on sunny days. The results from the economical appraisal conducted confirm that the dimming lighting control systems are still economically unfavorable, which makes the on/off lighting control strategy a preferable choice for public buildings with limited budget.

REFERENCES

- [1] Zhang, F., P. Cooke, Green Buildings and Energy Efficiency, Center for Advanced Studies, Cardiff University, UK.
- [2] Wen, Y., A. Agogino, Wireless Networked Lighting Systems for Optimizing Energy Savings and User Satisfaction, Proceedings of Wireless Hive Networks Conference, Austin, Texas, USA, August 07-08, 2008.
- [3] European Standard EN 12464 -1, Light and Lighting -Lighting of work places – Part 1: Indoor work places, November 2002 ISBN 058041128 1.
- [4] Mills, E., Global Lighting Energy Savings Potential, Light and Engineering, vol. 10, pp. 5-10, 2002.
- [5] DiLouie, C., Lighting and Productivity: Missing Link Found?, Architectural Lighting Magazine, vol. Sep/Oct, 2003.
- [6] Littlefair, P. J., Predicting lighting energy use under daylight linked lighting controls, Building Research and Information 26 (4), pp. 208 – 222, 1998.

- [7] Frenzel J., Genetic Algorithms – A New Breed of Optimization, IEEE Potentials, October 1993.
- [8] Mitchell, M., An Introduction to Genetic Algorithms, Boston (USA), MIT press, 1999.
- [9] Global Optimization Toolbox User's Guide, Copyright 2004-2010 by The MathWorks, Inc.
- [10] Pachamanov, A., I. Petrinska, N. Yaneva, Yearly change of the daylight coefficients in premises with different geographic exposure, XII National Conference with international participation Lighting'2007, 10-12 June 2007, Varna, Bulgaria, pp. 167-173.
- [11] Nasiri, A., S. Zabalawi, G. Mandic, Indoor Power Harvesting Using Photovoltaic Cells for Low-Power Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, No. 11, November 2009.
- [12] Lingova, S., Sun radiation and light regime for Bulgaria, Bulgarian Academy of Science, 1981.
- [13] Johnson, D., NPV Analysis and Applications for Competitive Intelligence, Competitive Intelligence Magazine, Vol. 6, No. 3, May-June 2003

Authors: PhD eng. Iva Petrinska, Department of “Electrical Power Supply and Electrical Equipment” TU – Sofia, Prof. PhD. eng. habil. Hannes Töpfer, Head of Department “Electromagnetic Theory“, TU – Ilmenau, Germany

РАЗРАБОТВАНЕ НА ОСВЕТИТЕЛ СЪС СВЕТЛОДИОДИ ЗА ПЕШЕХОДНИ ПЪТЕКИ

Захари Иванов, Иван Димитров

Резюме: Разработен и изследван е прототип на автономен светлодиоден, сигнален осветител за вграждане в пътната настилка на пешеходни пътеки. Осветителят се захранва от фотоволтаик и акумулаторна батерия, а светлодиодите работят в мигащ режим.

DEVELOPMENT OF LUMINAIRES WITH LED'S FOR WALKWAY

Zahari Ivanov, Ivan Dimitrov

Abstract: Developed and tested a prototype of an autonomous LED signal lamp for incorporation into road paving footpaths. The illuminator is powered by photovoltaic and battery, and LED's operate in flashing mode.

1. Анализ на пътно - транспортни произшествия на пешеходни пътеки

Анализът е направен въз основа на статистическа информация, предоставена от “Държавно - обществената консултативна комисия по проблемите на безопасността на движението по пътищата.” [1]. Използваната информация е за период от 3 години, съответно от 01. 01. 2007 до 31.12.2009 г.

От статистическите данни за вида на произшествията “блъскането на пешеходец” в трите разглеждани години се нарежда на второ място по смъртност, след “сблъскване между МПС”. Общия брой убити за този период са 707 лица, а ранените са 6514. Процентно това е 23.8% от всички загинали по пътищата на страната през тези 3 години и 22.9% от броя на ранените за същия период.

На фиг.1, са показани характерните места на ПТП за периода от 01.01.2009 г. до 31.12.2009 година.

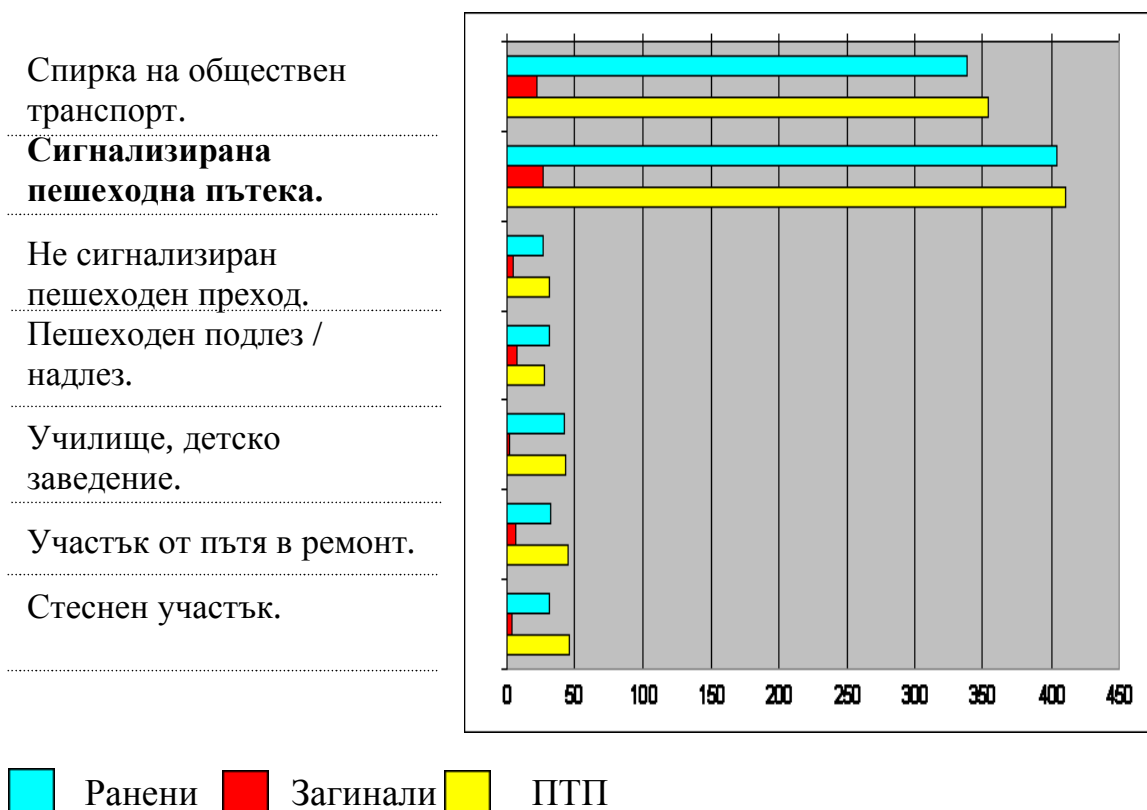
Вижда се, че едно от най- характерните места е именно сигнализираната пешеходна пътека. Това се дължи на факта че именно там е най-конфликтното място между автомобилния трафик и пешеходците.

2. Обзор и анализ на изискванията за осветление на пешеходни пътеки

Осветлението на пешеходни пътеки трябва да дава възможност на водачите по време на шофиране в тъмната част от денонощието, своевременно да могат да разпознават пешеходци, които се намират на пешеходната пътека или са в близост до нея на тротоара или пътния банкет.

Не е необходимо пешеходните пътеки тип “зебра”, да се осветяват отделно, когато уличното осветление изпълнява следните условия:

- Средната яркост на пътното платно на разстояние 50 метра преди и след пътеката не е по-малка от 2 cd/m^2 ;
- Равномерността на яркостите и заслепяването отговаря на изискванията на БДС 5504-82 и БДС EN 13201-2000;
- Пешеходната пътека не се намира в зоната на минимална яркост на пътя;
- Началните и крайните места на пешеходната пътека (областта на тротоара на разстояние 1 метър от пътеката) са достатъчно осветени.



Фиг. 1. Характерни места на ПТП

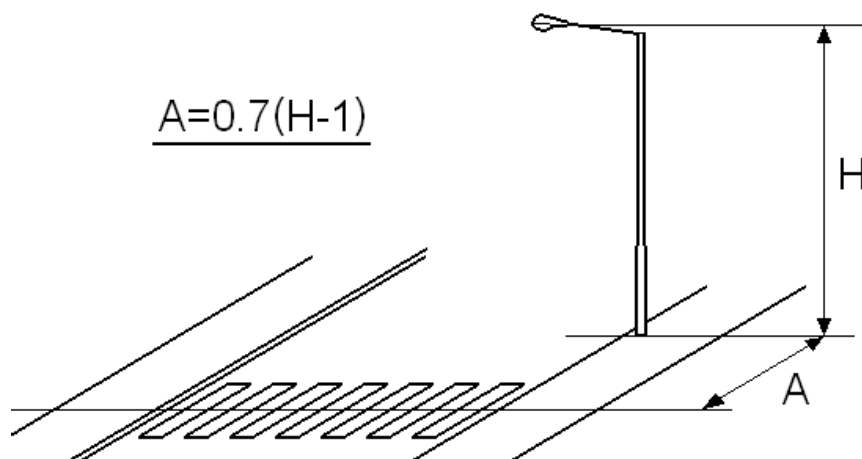
При така осветена пешеходна пътека е реализиран “отрицателен контраст”, при който пешеходеца се забелязва като тъмен силует на светъл фон.

Ако не се реализира кое да е от горните условия, трябва да бъде предвидено отделно осветление на пешеходната пътека. При допълнително осветление на пешеходната пътека се търси ефекта на “положителен контраст”, т.е. пешеходеца се явява светъл обект на тъмен фон. За целта осветителите на пешеходната пътека трябва да бъдат така разположени, че да осветяват самите пешеходци по посоката на движение.

Съгласно БДС 5504-82 средната вертикална осветеност на един метър височина над средната ос на “зебрата” в равнина, перпендикулярна на посоката на движение, трябва да бъде по-голяма от средната яркост на улицата, след пешеходната пътека, но не по-малко от 40 lx . Минималната вертикална осветеност в която и да е точка, трябва да е по-голяма от 10 lx . Добър “положителен контраст” може да се постигне, когато средната вертикална

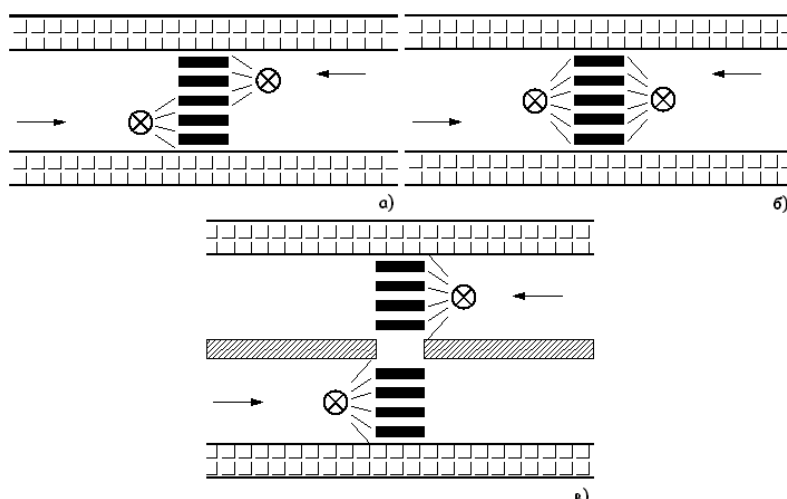
осветеност по оста на пешеходната пътека на височина един метър над пътното платно е петдесет пъти по-голяма от средната яркост на пътното платно.

Посочените светлотехнически изисквания могат да се реализират само когато светлината идва отстрани, а не над пешеходната пътека. За целта се предвиждат отделни осветители за всяка посока на движение и те са изнесени настрани от оста на пешеходната пътека, т.е. разположени са преди и след пешеходната пътека, като са насочени към нея и я осветяват отстрани. По този начин те успешно осветяват намиращите се на пешеходната пътека участници в движението и те се забелязват като светли обекти на тъмен фон.



Фиг. 2. Изискване за монтаж на осветителя спрямо пешеходната пътека

Вертикалната осветеност е подходяща за пешеходците, когато осветителя е разположен така, че хоризонталното отстояние (A) (фиг.2) между вертикалните оси на осветителя и оста на симетрия на пешеходната пътека и височината на монтаж на осветителя (H) отговарят на условието: $A=0.7(H-1)$ [4].



Фиг. 3. Варианти за разположение на осветителите

На фиг. 3 са показани примерни варианти за разположение на осветителите: а) несиметрично разположени осветители; б) симетрично разположени осветители спрямо цялата улица; в) симетрично разположени осветители спрямо отделните платна.

Осветителите трябва така да са проектирани, че потока на светлината от тях да осветява максимално добре пешеходната зона без да заслепява участниците от автомобилния трафик. За целта се подбират подходящи рефлектори и източници на светлина, като е целесъобразно цвета на светлината, осветяваща пешеходната пътека, да се различава от тази на уличното осветление. Цветът на светлината трябва да бъде такъв, че намиращите се в района пътни знаци недвусмислено да се разпознават.

Предимствата на отделното осветление на пешеходните пътеки са: а) максимален контраст между пешехода и неговата околност; б) висока стойност на осветеността (яркостта) върху пешеходната пътека; в) забелязване от по-голяма дистанция.

3. Нововъведения при пешеходните пътеки

Един от начините водачите на МПС да бъдат предупреждавани за опасността на пътя им да изскочи човек е светлинното сигнализиране [2].



Фиг. 4. Светещи пулсиращи пътни знаци поставяни на пешеходни пътеки

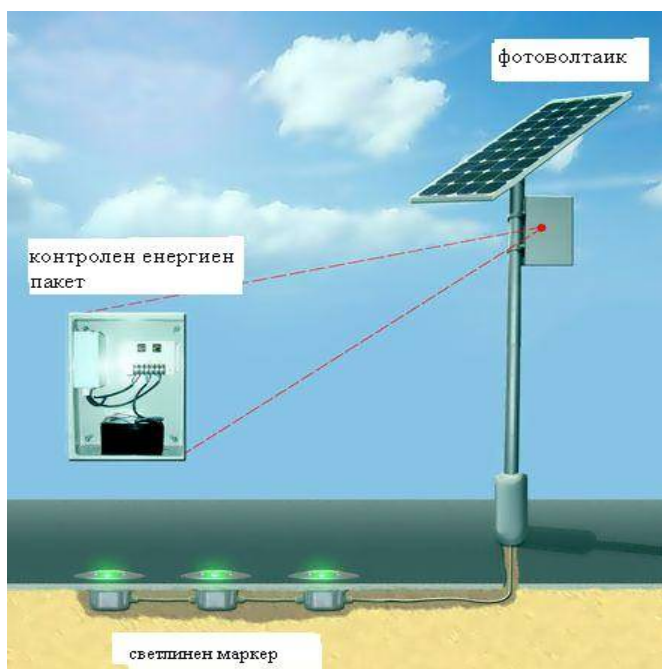
Вече има разработени модели и действащи такива на светещи и премигващи пътни знаци (фиг. 4) [6]. При тях видимостта е значително по-голяма както през деня, така и през тъмните часове. Наличието на каквото и да е движение привлича вниманието на водача и му напомня, че става дума за пешеходна пътека. Светлодиодите са най-динамично развиващия се нов светлинен източник, който непрекъснато намира все по-широко приложение.

Понастоящем се разработват предупредителни светлинни сигнализатори с монтиран осветител в техния корпус. Те директно се вграждат в настилка по протежение на пешеходната пътека (фиг. 5). Вградените в настилка осветителни тела са изработени от специални материали, които не позволяват те да бъдат повредени от преминаващите върху тях МПС. Някои от тях са със захранване от мрежата, други са с общо захранване от соларни панели [4,5] или вятърни турбини, а трети са с автономно захранване от соларен панел вграден в корпуса на изделието. На фиг. 6 е даден пример за мигащ светлинен сигнализатор със захранване от фотоволтаик. Всеки един вид има своите предимства и недостатъци.



Фиг. 5. Монтирани в настилка светлинни сигнализатори по протежение на пешеходната пътека

При светлинните сигнализатори с външно захранване, времето за монтаж е съответно по дълго. За сметка на времето те имат друго предимство, а именно, че през зимните периоди ще продължават да функционират безпроблемно веднага след разчистване на снега. Моделите с вграден в тях соларен панел ще имат нужда от поне няколко часа светлина за да могат да заредят изгубената такава, докато са били под снежната покривка.



Фиг. 6. Светлинно сигнализирана пешеходна пътека с вградени осветители, захранвани от слънчевата енергия чрез фотоволтаик

3. Разработване на прототип на автономен светлодиоден, сигнален осветител за вграждане в пътната настилка на пешеходни пътеки

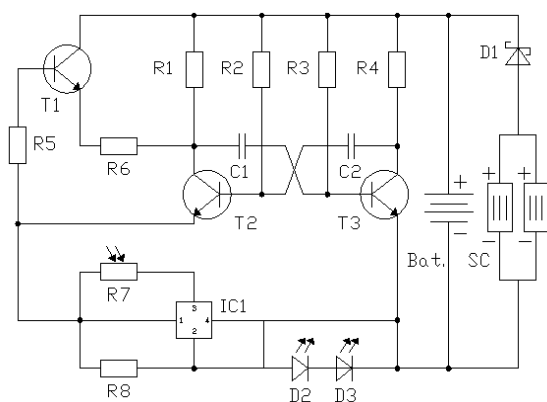
Разработвания осветител трябва да удовлетвори следните изисквания:

1. Да може самостоятелно да определя кога трябва да се включи и съответно кога да се изключи;
2. Да се забелязва от достатъчно голямо разстояние, за да позволи своевременна реакция от водачите на МПС;
3. Да има достатъчен запас от енергия за безпроблемна работа по време на тъмната част от денонощието;
4. Да има възможност да възстанови енергийния си запас по

време на светлата част от денонощието; 5. Елементите от корпуса, които са над нивото на настилка да не са препятствие за пешеходци, велосипедисти и МПС; 6. Да има достатъчна механична якост за да не се повреди от преминаването на тежкотоварни МПС; 7. Да позволява бърз монтаж; 8. Да позволява бързо и лесно обслужване; 9. Да е защитено против кражби и вандализъм.

Характеристика на разработения осветител

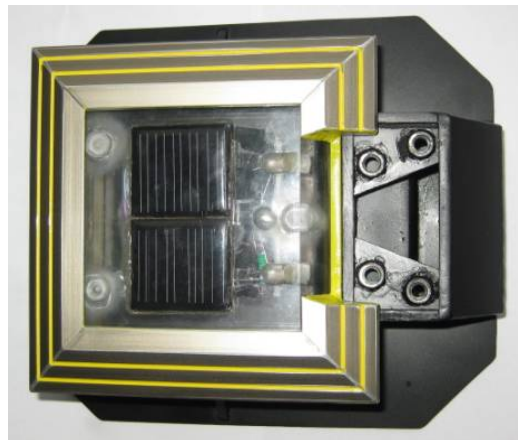
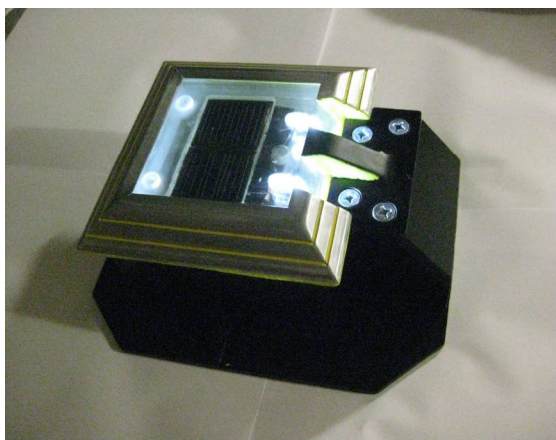
<u>Общи данни:</u> Основа за вграждане: Габаритни размери: Работно устройство: Габаритни размери: Дълбочина на вграждане в настилка: Издигане над настилка:	210 x 180 x 68 [mm] 135 x 135 x 73 [mm] 70 [mm] 13 [mm]
<u>Материали:</u> Основа за вграждане: Защитно тяло: Вътрешен корпус: Уплътнение:	Неръждаема стомана. Неръждаема стомана. Поликарбонат. Силикон.
<u>Начин на работа:</u> Вид светлинен източник: Ниво на включване и изключване: Време за зареждане: Време на работа при пълен заряд: Режим на светене: Честота на мигане:	СД - 2бр. , 25cd, 15 ⁰ , бял. Вкл.: 90 lx ; Изкл.: 100 lx . 3÷6 ч. при до зареждане; незареден: 9ч. 40 часа. Мигащ. 0,96 Hz.
<u>Соларен панел:</u> Тип: Максимална изходна мощност: Максимален ток: Напрежение:	Поликристална клетка. 280mW (2 x 140 mW) 70 mA (2 x 35 mA) 4 V
<u>Съхраняване на енергията:</u> Тип: Капацитет:	Батерия Ni-MH AA (2бр.) 600 mAh, 1.2 V
<u>Степен на защита:</u>	IP67
<u>Особености:</u>	Устройството позволява бързо и лесно обслужване или ремонт. Възможно е СД с различен цвят: жълт, червен, син или бял. Възможна е подмяната на Ni-MH батериите със суперкондензатор.



Фиг. 7. Схема на сигнала
осветител



Фиг. 8. Изглед на „работното
устройство”



Фиг. 9. Разработеният образец на автономен светлодиоден сигнален
осветител за вграждане в пътната настилка на пешеходни пътеки

4. Изследване на разработения образец

В лаборатория по ”Осветителна и инсталационна техника” (№ 12303) на ТУ-София са направени следните изследвания:

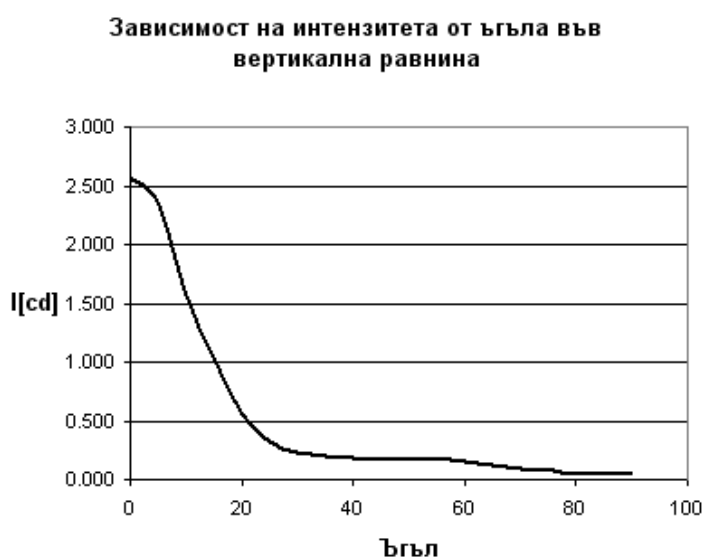
-Проверка при каква осветеност светлинния сигнализатор (фиг.9) започва да работи и съответно при каква осветеност преустановява работа.

Изпитването е реализирано чрез измервания на осветеността в стая с изкуствено осветление, като осветеността е променяна плавно и опитът е повтарян докато се убедихме, че получаваме еднозначни данни. От направените измервания с дигитален луксметър MS-1300 на фирмата ”Volcraft е установено, че устройството се задейства, когато осветеността достигне 90 lx, и преустановява своята работа, когато осветеността достигне 100 lx.

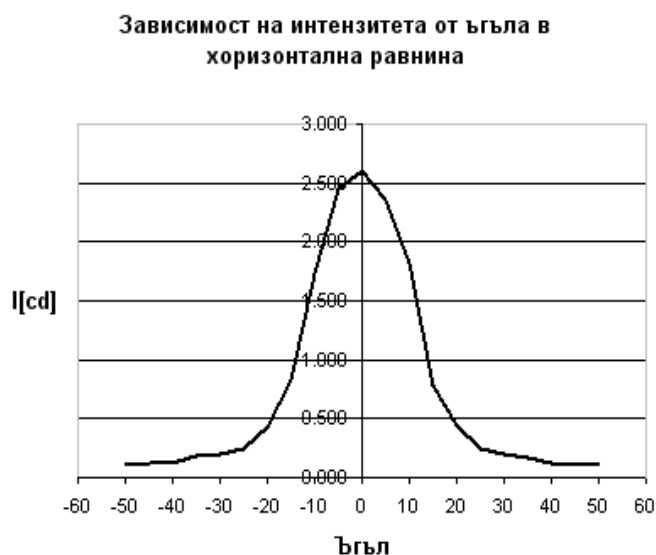
-Определяне на светлоразпределението на осветителя.

Измерванията са направени на образца, работещ в мигащ режим. Измерената светлоразпределителна крива (СРК) във вертикална равнина е дадена на фиг. 10, а СРК в хоризонтална равнина на фиг.11.

От фиг.11 се вижда, че осветителят излъчва в хоризонтална равнина в ъгли $\pm 15^\circ$ (за $I_{\max}/2$). Принципно, това е достатъчно, защото целта на устройството е да се забелязва от платното за движение, а не от тротоара или банкета. Измерването във вертикалната равнина е извършено само в едната посока защото реално устройството се намира на нивото на асфалта. От направеното измерване на СРК във вертикалната равнина се вижда, че ъгълът на излъчване на осветителят в тази равнина е също около 15 градуса.



Фиг. 10.
Светлоразпределителна крива
във вертикална равнина



Фиг.11.
Светлоразпределителна крива
в хоризонтална равнина

-Опитно установяване на честотата на премигване.

Сигналният осветител премигва с честота 0,97 Hz. При желание честотата може да се коригира чрез подмяна на елементи от електронната схема с подходящи за постигане на желаната честота.

-Определяне на времето на работа при напълно заредени батерии.

Опитът е проведен по две различни начина. При единият батериите бяха заредени със зарядно устройство, включено към електрическата мрежа с индикатор за заряда на батериите. След зареждането батериите бяха поставени в изпитвания образец и последния беше оставен в помещение без приток на светлина. След 41 часа работа, устройството започна да забавя честота на премигване и след още 30 минути преустанови работа.

Вторият начин - устройството бе оставено на слънце за около 9 - 10 часа, след което отново бе преместено в тъмна стая. Този път след 40 часа устройството започна да забавя своите импулси и съответно след още малко време окончателно спря.

От двата опита приехме, че при напълно заредени батерии, енергията е достатъчна за безпроблемна работа около 40 часа, т.е. устройството би издържало един ден под снежна покривка без да се зарежда и при почистването на същата, то би продължило своята работа.

-Проверка за зареждане при напълно разредени батерии.

Устройството е оставяно на слънце за различно време, като постепенно времето за излагане на слънце е увеличавано с по 1 час и съответно след това е поставяно в стая без достъп на слънчева светлина и е засичано времето му на работа. Опитно е установено, че времето за зареждане е около 9 часа при ясен и слънчев ден. При облачно време и дъжд, съответно времето за зареждане се увеличава.

-Изпитване на продължителна работа.

Изпитването за продължителна работа е извършено по следния начин. Макетът е оставен в автомобил, където съответно е изложен на слънчева светлина за зареждане. Опитът е с продължителност 1 седмица, през която устройството е работило успешно, след което на сутринта на осмия ден е преместено в тъмна стая и продължителността му на работа е още 9 часа. Като извод от опита можем да твърдим, че устройството успешно се справя с продължителен режим на работа.

-Проверка на максималната дистанция от която устройството се забелязва.

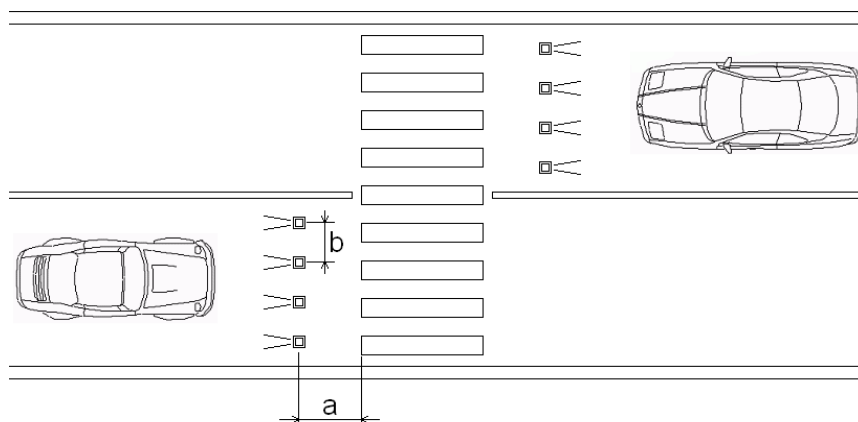
Опитът е извършен на права улица в тъмните часове от денонощието. Улицата е добре осветена от уличните осветители и въпреки това, устройството ясно се различава от над 250 метра, което е напълно достатъчно за приложението му в градски условия.

5. Примерно решение за монтаж спрямо пешеходната пътека

На фигура 12 е дадено примерно разположение на разработения осветител. Излъчваните от него светлинни сигнали са предназначени да уведомят водачите на МПС, че приближават пешеходна пътека. По изискване, пешеходните пътеки се намират на места, където осветеността е най добра или ако се намират в зоната с най-ниска осветеност, се предвижда отделно осветление за самата пешеходна пътека. Отстоянието “а” от началото на “зебрата” може да се подбере в зависимост от осветената част от специализираното осветление, за да

може по-добре да се открояват сигналите на устройствата. Светлинните сигнализатори могат да бъдат монтирани минимум един метър преди пешеходната пътека, за да не създават неудобства за преминаващите пешеходци. При изнасянето им преди пешеходната пътека, те се намират в зона с по-малка осветеност и съответно контраста им спрямо настилка ще е по-добър. Отстоянието “b”, между отделните осветители е препоръчително да се подбере така, че да позволява спокойно преминаване на колелата на автомобилите между отделните осветители. По този начин се намалява неудобството в пътните превозни средства при преминаването им през зоната на пешеходната пътека, а също така се намалява и износването на самите осветители, защото повечето хора предпочитат да заобикалят неравностите по пътя.

Броят на осветителите във всяка лента за движение зависи от избраното разстояние “b” и от икономически съображения. По големият брой осветители спомага за възприемането им като еднообразна светеща ивица от водача на превозното средство и съответно, той би трябвало да реагира като намали своята скорост.



Фиг. 12. Примерно разположение на сигналните осветители

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <http://dokkpbdp.mvr.bg>
- [2] <http://www.adhold.org>
- [3] Podlipnik P. , Svetlotehnički priručnik, Elektrovina, 1978
- [4] <http://bgsolar.com>
- [5] <http://www.sharp-solar.com>
- [6] <http://www.kbrhorse.net/signals>.

Автори: д-р инж. Захари Иванов – доцент в катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (ЕСЕОЕТ), инж. Иван Димитров – студент в магистърска степен в ТУ- София

УЛИЧНА ОСВЕТИТЕЛНА УРЕДБА С АСИМЕРИЧНО ИЗЛЪЧВАНЕ ПО ПОСОКА НА ДВИЖЕНИЕТО

Христо Василев, Вълчан Георгиев,
Ива Драганова, Станислава Спирова, Петър Русев

Резюме: В доклада е описана нова концепция за проектиране и изграждане на улични осветителни уредби с асиметрично излъчване. Изследван е показателя на видимост STV при различни параметри на осветителната уредба. Резултатите показват, че е възможно получаването на много добър показател на видимост при изключително ниска мощност на осветителите.

ROAD LIGHTING SYSTEM WITH ASYMMETRIC EMISSION POINTED TOWARDS THE DIRECTION OF TRAFFIC MOVEMENT

Hristo Vasilev, Valchan Georgiev, Iva Draganova, Stanislava Spirova,
Petar Rusev

Abstract: A new conception for design of asymmetric road lighting installation, suitable for one way streets is presented. The visibility factor STV is studied for different parameters of the road lighting system. Very good STV values can be achieved with extremely low power of the luminaries.

1. Въведение

Целта на настоящия доклад е да се изследва възможността за използване на осветители с асиметрично излъчване по посока на движението. В доклада са изследвани два типа светлоразпределение:

- светлоразпределение, което осигурява вертикална осветеност върху всички точки на изчислителното поле 10lx;
- светлоразпределение, което създава вертикална осветеност 10lx, с коефициент на равномерност $E_{min} / E_{в_ср} = 0.5$

2. Същинска част

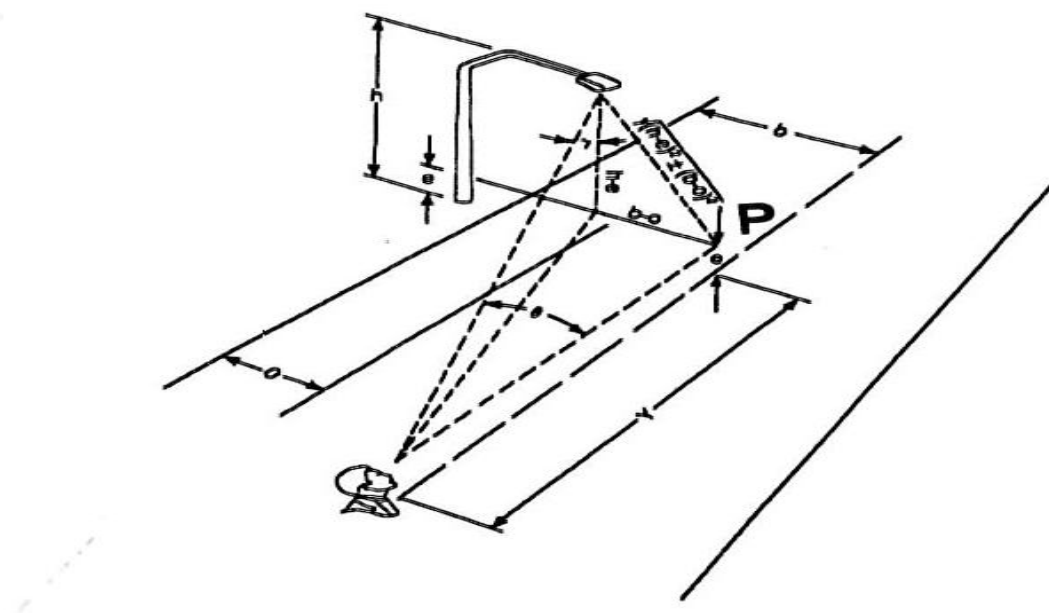
Съществуват ситуации, в които автомобилното движение е еднопосочно (градски магистрали и еднопосочни улици). Задачата е да се изчисли влиянието на светлоразпределението на осветителите върху основните светлотехнически показатели на уличната осветителна уредба (осветеност, яркост на пътното платно, яркост на обекта). Яркостта на пътното платно е интензитетът на светлинния поток върху единица площ, чиято повърхност на пътното платно отразява светлината срещу наблюдателя. Яркостта на повърхността на обекта е

интензитетът за единица проектирана площ, която отразява светлината паднала върху обекта срещу наблюдателя. С цел да извършим изчисленията за измерване на видимостта на малки обекти (STV), е необходимо да изберем точка от пътното платно, обект или ориентация на повърхността на обекта [1]. За изчисляване на видимостта е използвана методиката описана в американския стандарт за улично осветление [1].

Изчисленията са направени при следните фиксирани параметри:

- разположение на стълбовете;
- височина на стълба - H, m ;
- ширина на пътното платно - $7m$;
- брой на осветителите на стълб - 1;
- междустълбие - A, m ;
- отражателна характеристика на пътната настилка;
- зададена вертикална осветеност;
- брой на изчислителните точки - 70бр;
- ъгъл на наклона на погледа - 1°

На фигура 1 е показана геометрията на зрителната задача.



Фиг. 1. Геометрия на зрителната задача

В процеса на изчисляване се променят следните параметри:

- светлоразпределението на осветителя;
- височината на стълба;
- междустълбието;

Като тестов обект, в изчисленията се използва зрителен обект – куб с размери $18 \times 18 \text{ cm}$, разположен перпендикулярно на повърхността на пътното платно и на успоредната линия на видимост на мястото на наблюдателя [4]. При промяна на горните параметри се изчисляват следните величини:

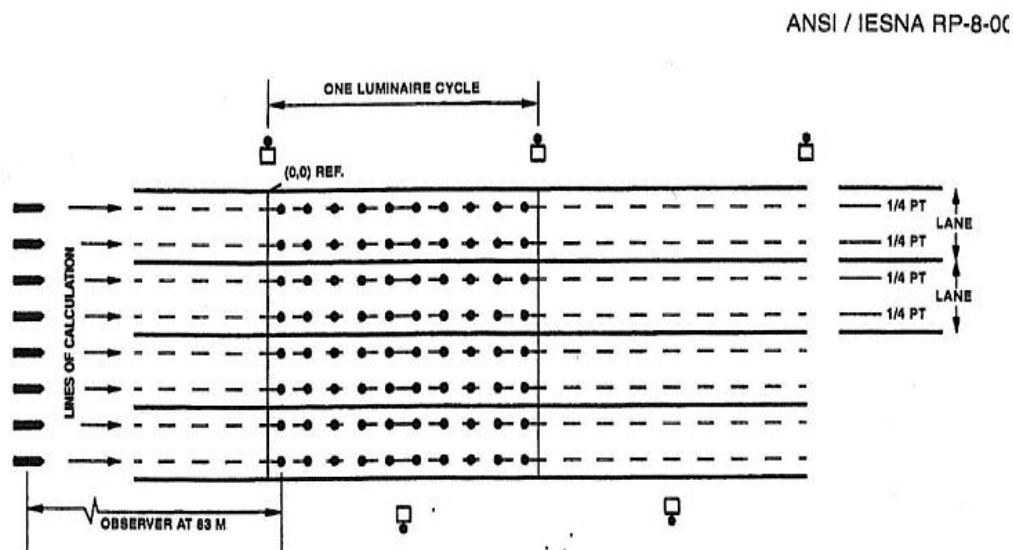
- интензитета;
- хоризонталната осветеност на пътното платно;
- средната яркост на пътното платно;

- яркостта на обекта;
- яркостта на фона;
- STV – видимост;

При изчисляване на параметрите на осветителната уредба се допуска следното:

- светлоразпределението на осветителя е избрано така, че да осигури зададената във всяка точка вертикална осветеност 10lx ;
- наблюдателят е разположен върху успоредна права на осевата линия на пътното платно, която преминава през точката на изчисление. Той се намира на разстояние 83.07 метра от тази точка;
- височината на погледа на наблюдателя е 1.45 метра;
- пътното платно е хоризонтално, а повърхността му е хомогенна;
- повърхността на обекта е идеално разсейваща;
- повърхността на пътното платно трябва да бъде суха, характеризираща се с насочено отражение на светлинния поток.

Използваната изчислителна мрежа е дадена на фигура 2.



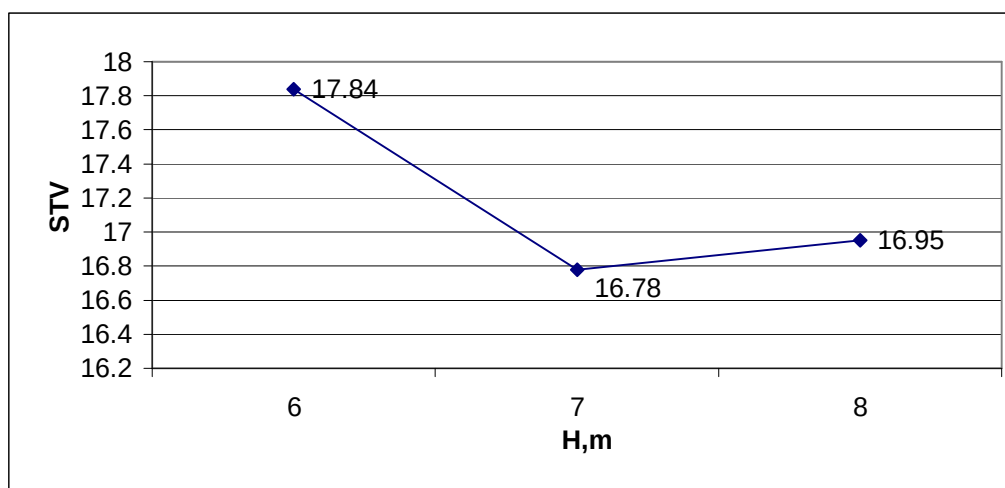
Фиг. 2. Изчислителна мрежа

Текущият доклад е за определяне на светлотехническите показатели на улична осветителна уредба и на показателя STV. Чрез въвеждането на взаимнозависими формули за един показател на осветителната уредба, при зададени геометрични параметри на изчислителната мрежа и на осветителите, както и на вертикалната осветеност (E_v) за всяка една точка, се изгражда автоматизирана таблица. Резултатите от решенията на многовариантна задача при конкретни входни параметри са показани в таблици и съответно графики към тях.

В таблица 1 е показано изменението на показателя на видимостта STV, при промяна на височината на окачване на осветителя, при фиксирано междустълбие 30 мерта. Изчислената хоризонтална осветеност е приблизително равна на 1.5 lx, а яркостта на пътното платно и обекта са съответно 0.6cd/m² и 1.1 cd/m².

Таблица 1

№	H,m	A,m	Eh_sr, lx	Lij, cd/m ²	Lt, cd/m ²	STV
1	6	30	1.5	0.06	1.1	17.84
2	7	30	1.58	0.08	1.1	16.78
3	8	30	1.44	0.06	1.1	16.95



Фиг. 3. STV във функция от H (междустълбие = 30м)

В таблица 2 и на фигура 4 е представена зависимостта на STV от промяната на коефициента на отражение на обекта. При стандартен обект ($\rho=0.5$), STV = 17.8, което е по-високо от нормените стойности посочени в стандарта.

Таблица 2

ρ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
STV	3.5	6.78	10.53	14.29	17.84	21.85	25.65	29.47	33.31

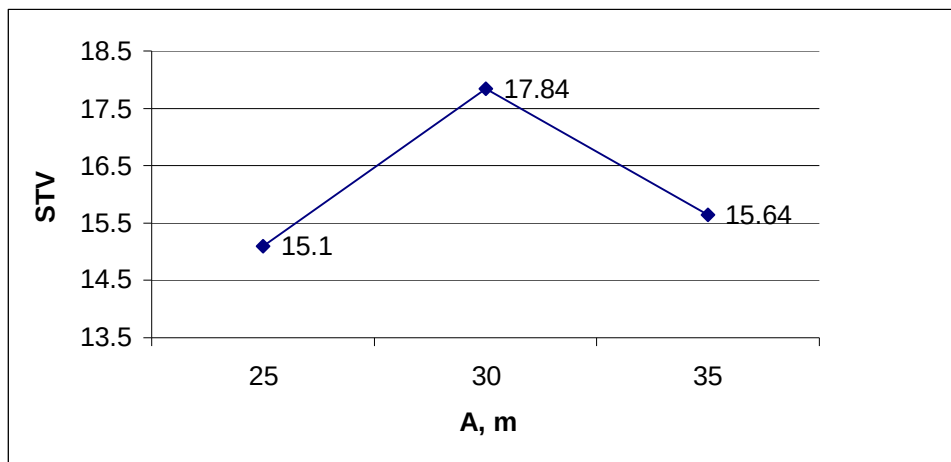


Фиг. 4. STV във функция от ρ (междустълбие = 30м)

На следващата таблица е представена зависимостта на STV във функция от междустълбието (25-35 метра), при височина на окачване на осветителя 6 метра. Изчислената хоризонтална осветеност варира от 1.5 до 2.05 lx. Яркостта на пътното платно 0.08 cd/m^2 и яркостта на обекта е 1.1 cd/m^2 .

Таблица 3

№	H, m	A, m	$E_{h, sr}, \text{ lx}$	$L_{ij}, \text{ cd/m}^2$	$L_t, \text{ cd/m}^2$	STV
1	6	25	2.05	0.08	1.1	15.1
2	6	30	1.5	0.06	1.1	17.84
3	6	35	1.84	0.08	1.1	15.64



Фиг. 5. STV във функция от A (H=6 метра)

3. Заключение

На базата на направените изчисления и изследвания за свтлотехническите показатели и за показателя STV може да се направят следните изводи:

1. Спрямо яркостният коефициент на обекта (r_0) STV има правопропорционална зависимост, а именно при нарастване на r_0 , расте и стойността на STV и обратното.

2. Спрямо височината, на която е монтиран осветителят, показателят STV има обратнопропорционална зависимост. Според направените изследвания представени в графика. 2 при увеличаване на височината (H), стойността на STV намалява. При увеличаване на височината (H)

3. Изследването направено спрямо дължината на междустълбието (A) показва, че в интервала от 25 до 35 метра стойността на показателя STV се променя в много малък интервал.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ANSI Roadway Lighting, RP-8-00, 2005
- [2] Василев, Хр. “Улично светодиодно осветление” кръгла маса, „XIV Национална конференция с международно участие 10-12 юни 2010 г- BulLight2010.” Св.св.Константин и Елена”, Варна.
- [3] Василев, Хр. „Оптимизиране светлоразпределението на уличните осветители по видимост”- Доклад на научна сесия на ВМЕИ „Ленин”, октомври 1981 г.
- [4] Василев, Хр., К. Велинов, „Оптимизиране на параметрите на улични осветителни уредби” - Сборник с доклади на XII Национална конференция по осветление с международно участие Осветление’2004, 15 – 17 Юни 2004, Варна.
- [5] Василев, Хр., Ст. Стефанов, “ Оптимизиране на светлоразпределението на улични осветители по осветеност”, Сборник доклади „XIII национална конференция с международно участие Осветление’2007”, Варна.

Автори: проф. Христо Василев, гл.ас. Вълчан Георгиев, инж. Ива Драганова, инж. Станислава Спирова, инж. Петър Русев – кат. ЕСЕОЕТ

УЛИЧНА ОСВЕТИТЕЛНА УРЕДБА С НЕСИМЕТРИЧНО ИЗЛЪЧВАНЕ СРЕЩУ ПОСОКАТА НА ДВИЖЕНИЕ

Христо Василев, Вълчан Георгиев,
Ива Драганова

***Резюме.** Докладът е посветен на асиметричен уличен осветител със светодиоди излъчващ срещу посоката на движение. Разгледани са различни варианти на светлоразпределението на осветителя и височината му на окачване, като са установени границите на неговото приложение.*

ROAD LIGHTING SYSTEM WITH ASYMMETRIC EMISSION POINTED AGAINST THE DIRECTION OF TRAFFIC MOVEMENT

Hristo Vasilev, Valchan Georgiev, Iva Draganova

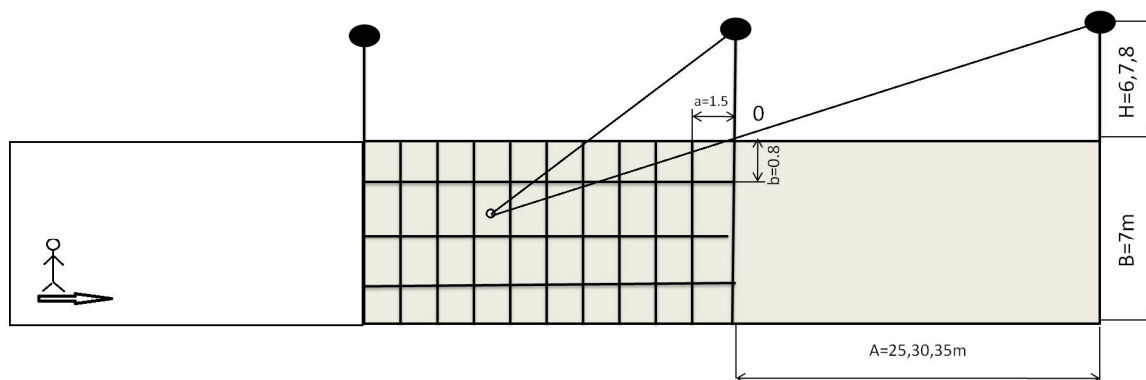
***Abstract.** An asymmetric road lighting LED luminaire with light distribution pointed against the direction of traffic movement is presented. Different road lighting situations with that particular luminaire are studied and the limits of its application are defined.*

1. Въведение

Изключително много производители днес предлагат широк асортимент от улични светодиодни осветители. В предходния доклад сме разгледали уличен, светодиоден осветител с асиметрично светлоразпределение. Тези осветители са подходящи за еднопосочни улици и градски магистрали. При разглеждане на тази постановка, възниква въпроса какво ще се получи при ремонтни дейности на пътното платно и се наложи движението да стане двупосочно. Направените изчисления показват как ще влияе това на движещите се срещу посоката на излъчване.

2. Същинска част

За решаване на многовариантната задача са избрани следните изходни данни и параметри. Разглеждаме улично платно с ширина 7 метра. Осветителните тела са поставени на стълбове с височина 6 - 8.5 метра. Разстоянието между два съседни стълба е 30 метра, а при изчисленията се взимат предвид съседните пет стълба. На фигура 1 е показана геометричната ситуация и разположението на осветителите.



Фиг. 1. Геометрия на изчислителното поле

Изчислителният участък обхваща едно междустълбие по цялата дължина на улицата. В него има 70 изчислителни точки. Точката О е началото на координатната система. Всички осветители са разположени едноредово.

При изчисление на параметрите на осветителя се допуска следното:

- светлоразпределението на осветителя е избрано така, че да осигури зададената във всяка точка вертикална осветеност $10lx$. Необходимата осветеност се изчислява като сума от осветеностите на двата осветителя;
- наблюдателят е разположен върху успоредна права на осевата линия на пътното платно, която преминава през точката на изчисление. Той се намира на разстояние 83.07 метра от тази точка;
- височината на погледа на наблюдателя е 1.45 метра;
- пътното платно е хоризонтално, а повърхността му е хомогенна;
- повърхността на обекта е идеално разсейваща;
- повърхността на пътното платно трябва да бъде суха, характеризираща се с насочено отражение на светлинния поток.

Като тестов обект, в изчисленията се използва зрителен обект – куб с размери 18 x 18см, разположен перпендикулярно на повърхността на пътното платно и на успоредната линия на видимост на мястото на наблюдателя[4]. При промяна на горните параметри се изчисляват следните величини:

- интензитета;
- хоризонталната осветеност на пътното платно;
- средната яркост на пътното платно;
- яркостта на обекта;
- яркостта на фона;
- воалираща яркост;
- показател на заслепяване;
- STV – видимост;

Интензитета на осветителите към всяка от точките се определя на основата на закона за квадратичното отдалечение[2]:

$$E = \frac{I \cdot \cos g}{r^2} \quad (1)$$

където:

- E е осветеността, създавана от осветителя;
- I е интензитета към точката от осветителя;
- γ е ъгъла между нормалата в точка и падащия лъч от осветителя;
- r е разстоянието между точката за която се изчислява интензитета и осветителя.

Хоризонталната осветеност и яркостта на пътното платно се определят съгласно формули (2) и (3).

$$E_h = \frac{I_{(j,g)} \cdot (\cos g)^3 \cdot LLF}{H^2} \quad (2)$$

$$L = \frac{I_{(j,g)} \cdot r_{(b,g)} \cdot LLF}{MF \cdot H^2} \quad (3)$$

където:

E_h – хоризонталната осветеност от един осветител

L – яркост на пътната настилка от един осветител в точка P

I- интензитетът между ъглите γ и ϕ

r- редуцираният коефициент на отражение между ъглите γ и ϕ

MF- експлоатационен фактор(най-често 10,000)

H – височина, на която е монтиран осветителят спрямо повърхността на настилката m

LLF- фактор на загубата на светлина

Изчисление на воалиращата яркост:

$$L_v = K / \theta^n, \quad n = 2.3 - 0.7 \times \log_{10}(\theta) \quad \text{за } \theta < 2, \quad n = 2 \quad \text{за } 2 < \theta \quad (4)$$

където:

L_v – воалиращата яркост от един осветител

K – $10 \times$ (вертикалната осветеност в равнината на наблюдение на 25 годишен наблюдател)

θ – ъгъл в градуси

Воалиращата яркост, отговаряща на всички светлинни източници, е сумата от воалиращата яркост на всички допринасящи източници.

Изчисление на яркостта на обекта:

$$L_t = \frac{I_{(j,g)} \cdot (\cos g)^2 \cdot \sin(g) \cdot [\cos(90 - j) \cdot r_0 \cdot LLF]}{[H - (r_0 \cdot TH)]^2 \cdot p} \quad (5)$$

L_t – яркостта от един осветител

I – интензитетът между ъглите гама и фи

H - височина на която е монтиран осветителят спрямо повърхността на настилката

LLF - фактор на загубата на светлина

0.5 – Фактор на отражението (дифузно)

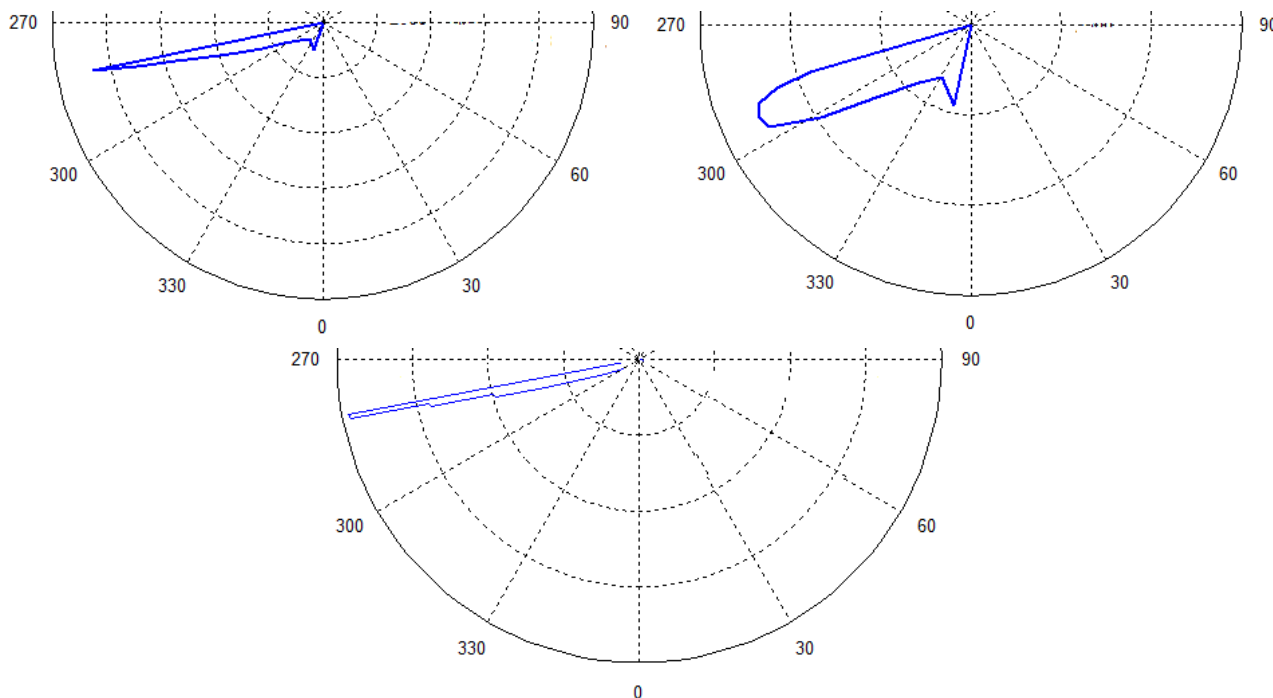
TH – Височина на обекта (обикновено 0.18 m)

Крайната яркост на обекта е сумата от стойностите, изчислени за всички допринасящи осветители.

За реализирането на многовариантната задача, в доклада са използвани:

- три типа светлоразпределения(фигура 2);

- различна височина на окачване на осветителя;
- различни коефициенти на отражение на обекта;
- различно междустълбие.

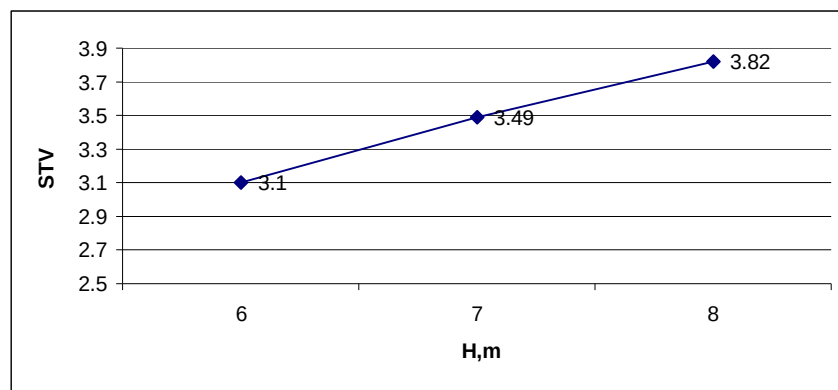


Фиг. 2. Използвани светлоразпределителни криви

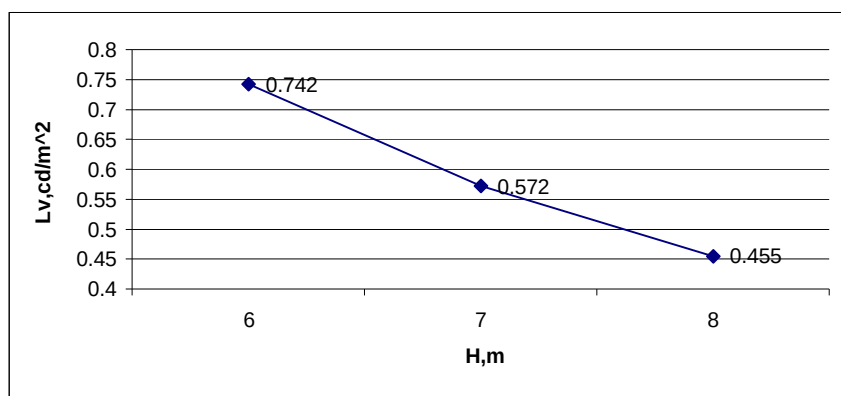
На следващите таблици и графики са показани резултатите от решаването на многовариантната задача. В таблица 1 са показани резултатите от изчисленията от първото светлоразпределение. От нея се вижда, че при увеличаване на височината на окачване на стълба воалиращата яркост намалява, съответно намалява и заслепяването, а видимостта расте.

Таблица 1

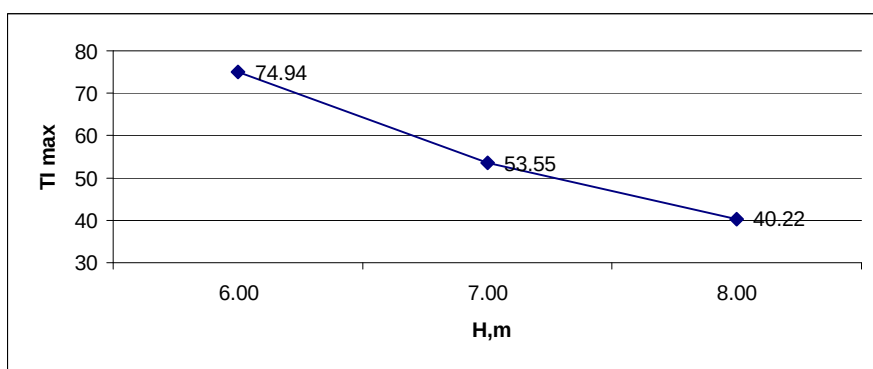
№	H,m	A,m	Eh _{sr} , lx	Lij, cd/m ²	Lt, cd/m ²	Lv,cd/m ²	TI max	STV
1	6	30	1.48	0.91	0	0.742	74.94	3.1
2	7	30	1.73	0.91	0	0.572	53.55	3.49
3	8	30	1.99	0.92	0	0.455	40.22	3.82



Фиг. 3. STV=f(H)



Фиг. 4. $L_v = f(H)$

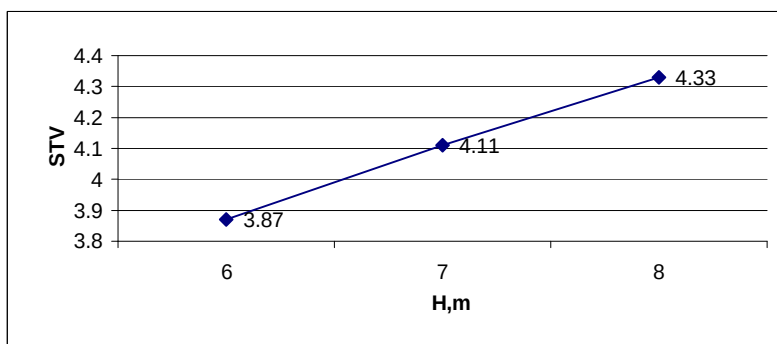


Фиг. 5. $TI_{max} = f(H)$

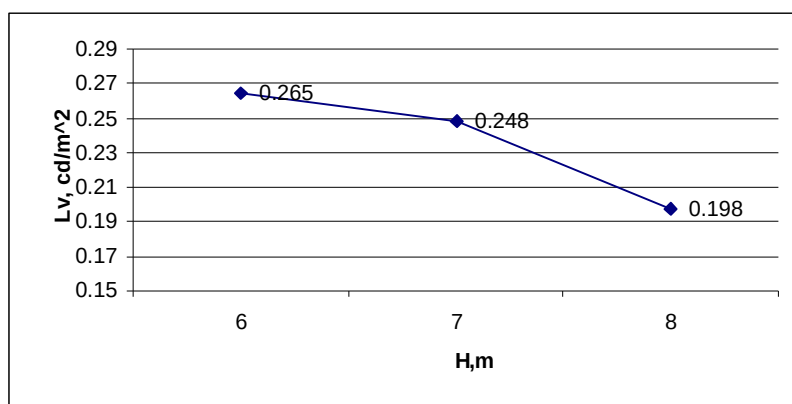
На таблица 2 и фигурите 6,7 и 8 са представени резултатите от изчисленията с второто светлоразпределение. С него са постигнати по-добри стойности за воалиращата яркост и заслепяването.

Таблица 2

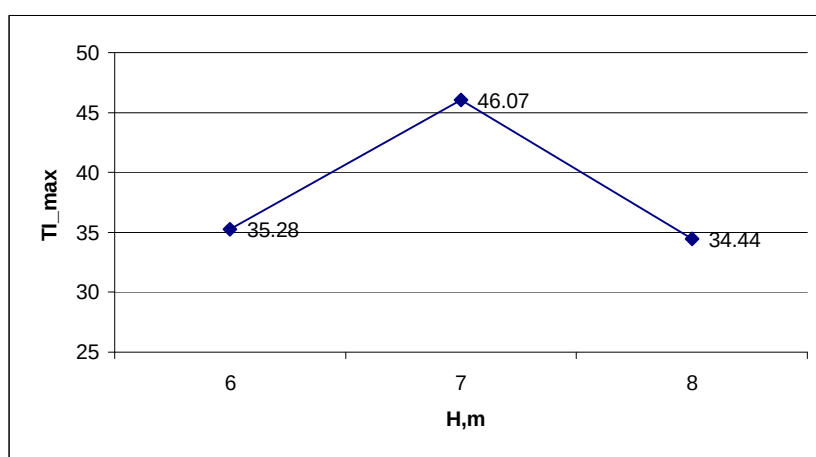
№	H, m	A, m	E_{h_sr}, lx	$L_{ij}, \text{cd/m}^2$	$L_t, \text{cd/m}^2$	TI max	STV
1	6	30	3.21	0.63	0	35.28	3.87
2	7	30	4.3	0.72	0	46.07	4.11
3	8	30	4.93	0.73	0	34.44	4.33



Фиг. 6. $STV = f(H)$



Фиг. 7. $L_v = f(H)$



Фиг. 8. $TI_{max} = f(H)$

В таблица 3 са показани резултатите от третото светлоразпределение. С него се постигат най-добри показатели.

№	H, m	A, m	E_{h_sr}, lx	$L_{ij}, \text{cd/m}^2$	$L_t, \text{cd/m}^2$	$L_v, \text{cd/m}^2$	TI_{max}	STV
1	8.5	30	4.56	0.64	0	0.163	25	4.1

3. Заключение

Според получените резултати и направените изследвания можем да направим следните изводи:

1. Възможно е да се реализира такъв осветител, с параметри КПД= 0.8 и MF=0.7, необходимият светлинен поток е 715 lm. За постигане на този поток са необходими 8 светодиода с светлинен добив 100lm/W. Общата мощност на осветителя включително загубите в драйвъра е 10W.
2. След многократно решаване на задачата е достигнато до светлоразпределение, което трябва да бъде оптимизирано.
3. Независимо от това, че показателят на заслепяване не отговаря на нормените изисквания ($TI_{max}=25$), STV е над очакваното.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ANSI Roadway Lighting, RP-8-00, 2005.
- [2] Василев, Хр., Улично светодиодно осветление кръгла маса „XIV Национална конференция с международно участие 10-12 юни 2010 г. BulLight 2010, Варна.
- [3] Василев, Хр., Ст. Стефанов, Оптимизиране на светлоразпределението на улични осветители по осветеност „XIII Национална конференция с международно участие 10-12 юни 2007 г- BulLight 2007, Варна.
- [4] Василев, Хр., Оптимизиране светлоразпределението на уличните осветители по видимост- Доклад на научна сесия на ВМЕИ „Ленин”, октомври 1981 г.
- [5] Василев, Хр., К. Велинов, Оптимизиране на параметрите на улични осветителни уредби - доклади на XII Национална конференция по осветление с международно участие Осветление’2004, 15 – 17 Юни 2004, Варна.
- [6] Василев, Хр., Ст. Стефанов, Оптимизиране на светлоразпределението на улични осветители по осветеност, доклади на „XIII национална конференция с международно участие Осветление’2007”, Варна.

Автори: проф. Христо Василев, гл. ас. Вълчан Георгиев, инж. Ива Драганова - ЕСЕОЕТ

МИНИМИЗИРАНЕ НА СВЕТЛИННИЯ ПОТОК НА УЛИЧНИ ОСВЕТИТЕЛИ ПРИ НОРМИРАНЕ ПО ОСВЕТЕНОСТ

Станимир Стефанов, Христо Василев

Резюме. В настоящия доклад са представени резултати свързани с минимизиране на светлинния поток на улични осветители, необходим за реализиране на нормените показатели при нормиране по осветеност съгласно БДС EN 13201. Оптимизациите са извършени при различни височини и светлини ситуации, за често срещано междустълбие на съществуващите улични осветителни уредби в градовете. За описване на светлоразпределителните криви е използвана експоненциална функция, съдържаща в израза си полиноми на Лежандър, а оптимизационните алгоритми са реализирани в матлаб-среда на базата на нелинейното оптимизиране, като за ограничителни условия се използват нормените изисквания регламентирани в БДС EN 13201.

MINIMIZING THE LIGHTING FLUX OF LUMINARIES FOR STREET LIGHTING SYSTEMS ESTIMATED BY ILLUMINANCE

Stanimir Stefanov, Hristo Vasilev

Abstract. The present survey presents the results of research about optimization of photometric curves, which purpose is to minimize the needed lighting flux to achieve the standard rates under illuminance regarding BDS EN 13201. Geometry and traffic situation which is made optimizations is the most frequently occur in the cities. The optimization is carried on using Matlab-function for nonlinear minimizing function-fmincon. The equations describing the photometric curves use an exponential function which power degree is formed by orthogonal polynomials of Legendre, and the constrain factors are formed on the basis of the methodology for calculation of illuminance regarding BDS EN 13201.

1. Въведение

Динамиката на цените на енергийните носители и на електрическата енергия в поска покачване води до търсене на решения за намаляване на потреблението на енергия във всички области на съвременния живот, като изключение не прави и уличното осветление. Без улично осветление бихме изпитвали силни затруднение при ориентирането в пространството и предвижването в населените места през тъмните части на денонощието, то е необходимост без която не можем, но е и значителен консуматор на електрическа енергия. Начин да се намали потреблението на електроенергия от уличните осветителни уредби са светлини източници с по-ниска консумация на

електрическа енергия и осветители притежаващи подходящо разпределение на светлинният поток в пространство, позволяващо достигането на регламентираните нормените нива за улично осветление с възможно най-малкия необходим за целта светлинен поток.

2. Изложение

В представеното изследване за оптимизиране на светлоразпределението е минимизиран светлинният поток, необходим за удовлетворят нормените нива при нормиране по осветеност за основни типове улици [3] съгласно БДС EN 13201.

За описване на светлоразпределителните криви е използвано уравнение (1) в основаващо се на полиноми на Лежандър от 9 ред [2], [5].

$$I(\gamma, C) = e^{(d_0(\gamma_i) + d_1(\gamma_i)C_j + d_2(\gamma_i)C_j^2 + d_3(\gamma_i)C_j^3 + d_4(\gamma_i)C_j^4 + d_5(\gamma_i)C_j^5 + d_6(\gamma_i)C_j^6 + d_7(\gamma_i)C_j^7)} \quad (1)$$

където:

- $d_p(\gamma_i)$ ($p=0,1,2,3,4,5,6,7$) са коефициенти изразени чрез ортогонални полиноми на Лежандър, като

$$d_p(\gamma_i) = q_{p1}S_1(T_i) + q_{p2}S_2(T_i) + \dots + q_{pm}S_m(T_i) \quad (2)$$

S_k е полином на Лежандър от ред k , q_{pk} са неизвестни коефициенти, чиито стойности определят формата на кривите и се изчисляват в процеса на оптимизация, а T_i е аргумент изчислен по

$$T_i = \frac{2\gamma_i - \gamma_1 - \gamma_n}{\gamma_1 - \gamma_n} \quad (3)$$

γ_1 и γ_n са първата и последната стойност на ъгъла γ

$$C_j = \frac{C_j}{\max(C)} \text{ се изменя в интервала } [0,1] \quad (4)$$

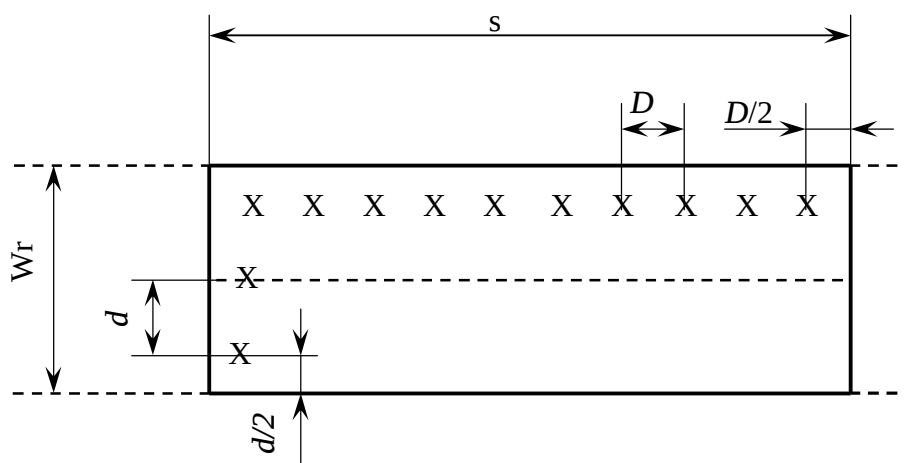
- i е показва номера на ъглите γ , а j е номера на „С-равнините” подредени според табличния ред в който следват.

Минимизирането на светлинният поток е извършено в MATLAB среда посредством функцията *fmincon* и създадени *Matlab* файлове за изчисляване на уличното осветлението според методологията при нормиране по осветеност дадена в [1].

Основна трудност при минимизирането на светлинният поток е полученото разпределение да бъде технически реализуемо. За това в ограничителните условия е зададено коефициента на усилване да е по-малък от

7, интензитета за 1000 lm условен светлинен поток на източника за $\gamma=0^\circ$ да е в границите на 150 cd и максималната разлика между два съседни интензитета по гама за 1000lm да не надхвърля 200cd единици. Крайните резултати – разпределението на светлинният поток и неговата минимална стойност при всяко изчисление са силно зависими от поставените ограничителни условия, в следствие на което могат да се получат многобройни комбинации удовлетворяващи нормените изисквания с близки по стойност светлинни потоци. Изследването е осъществено за често срещани основни класове улици [3] и светлинни ситуации, алтернативни на основните светлини ситуации при нормиране по яркост на улични осветителни уредби [1]. Разгледаните ситуации са за съществуващи осветителни уредби с междустълбие 30 метра. Оптимизирането на светлоразпределението е извършено за симетрично излъчващи спрямо надлъжната си равнина на симетрия осветители. Експлоатационният фактор е $MF=0,7$, а осветителите са разположени едностранно над бордюра, ненавлизащ в изчислителното поле, като в изчисленията участват общо 8 осветителя – четири преди и четири след изчислителното поле.

Координатите на изчислителните точки в улично платно се определят съобразно геометрията на изчислителното поле в съответствие с фиг. 1.



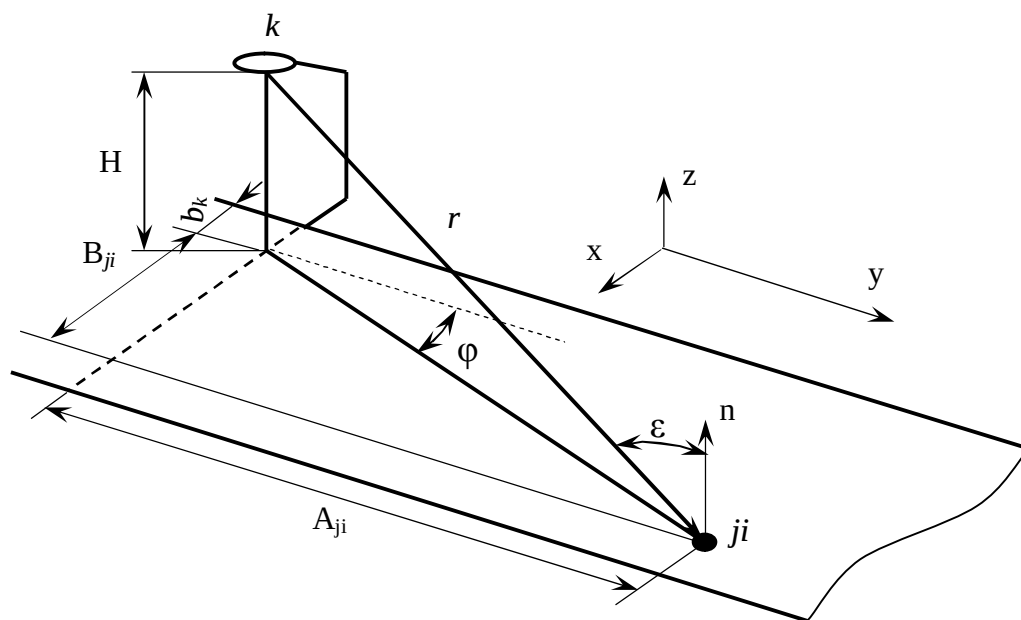
Фиг. 1. Разпределение на изчислителните точки в изчислителното поле за определяне на средната осветеност

$$D = \frac{S}{N}, \text{m} \quad d = \frac{W_r}{n}, \text{m} \quad (5)$$

- S - междустълбовото разстояние, м
- N - броя на точките в надлъжна посока.
- W_r е широчината на съответната зона, като външните редове отстоят на

$d/2$ от краищата на лентата

За намиране на хоризонталната осветеност E_{jik} във всяка от изчислителните точки се определят разстоянията от центъра на всеки светлинен източник до всяка изчислителна точка в изчислителното поле.



Фиг. 2. Геометрия за определяне на осветеност на точка от изчислителното поле
 bk -навлизане на осветителя в изчислителното поле, m ;
 A_{ji} -разстояние по оста y от осветителя до точка “ ji ”, m ;
 B_{ji} -разстояние по оста x от осветителя до точка “ ji ”, m
 H –височина на окачване на осветителя, m

За точка от центъра на всеки елементарен участък осветеността създавана от един осветител се определя според по следните формули според фиг.2.:

$$e_{jik} = \frac{I'(C_{jik}, \gamma_{jik}) \cdot \cos(\epsilon_{jik}) \cdot \Phi}{r_{jik}^2}, lx \quad (6)$$

където:

- $I'(C_{jik}, \gamma_{jik})$ е интензитета в посока на центъра на елементарния участък “ ji ”
- ϵ_{jik} е ъгълът които сключва падащия в центъра светлинен лъч с нормалата
- r_{jik} е разстоянието от центъра на осветителя до центъра на елементарния участък “ ji ”.

3. Светлини класове, нормени показатели, геометрия на изчислителното поле и получени резултати

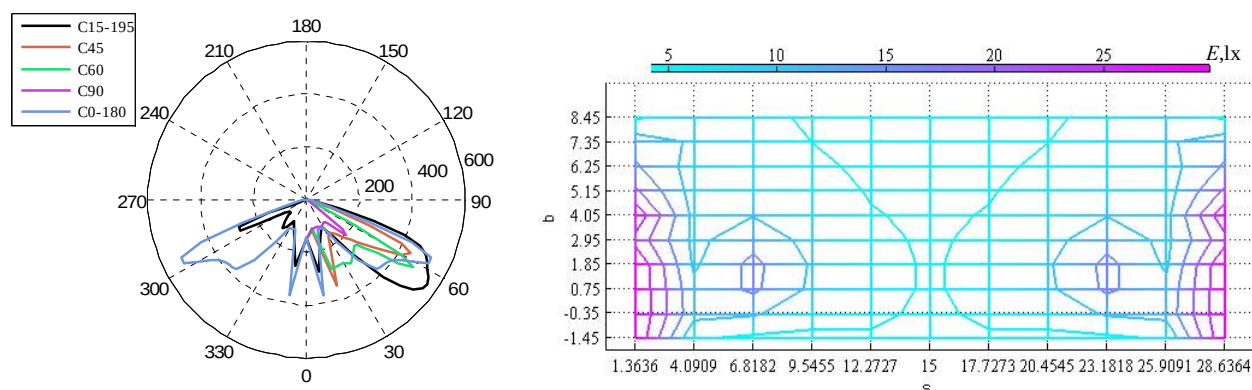
На следващите фигури са представени някои от светлоразпределителни криви и съответстващите им разпределения на осветеността в изчислителните полета, получени в резултат на извършено минимизиране на светлинния поток за основни типов улици с характерни светлини ситуации

Обслужваща улица със светлина ситуация $B2$ с едно двупосочно платно с по една лента за всяка посока на движение разделени с основни участници в движението МПС Светлинен клас $CE4$ алтернативен на $ME4b$ с трафик под

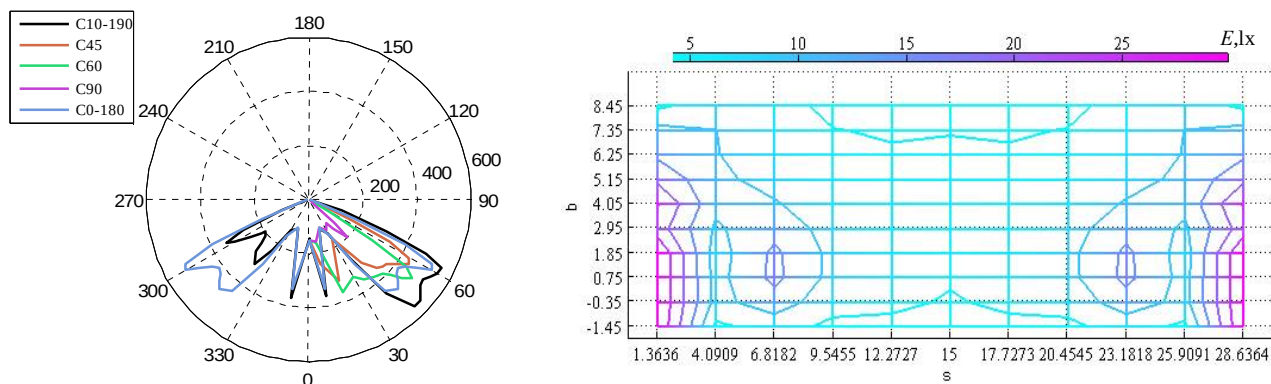
7000 единици, хоризонтална осветеност $E_{cp} = 10 \text{ lx}$ с обща равномерност на осветеността $U_0=0,4$.

Широчина на уличното платно- $b_{ул}=7\text{m}$, с по една лента за движение в всяка посока и широчина на тротоарите два метра от двете страни на уличното платно.

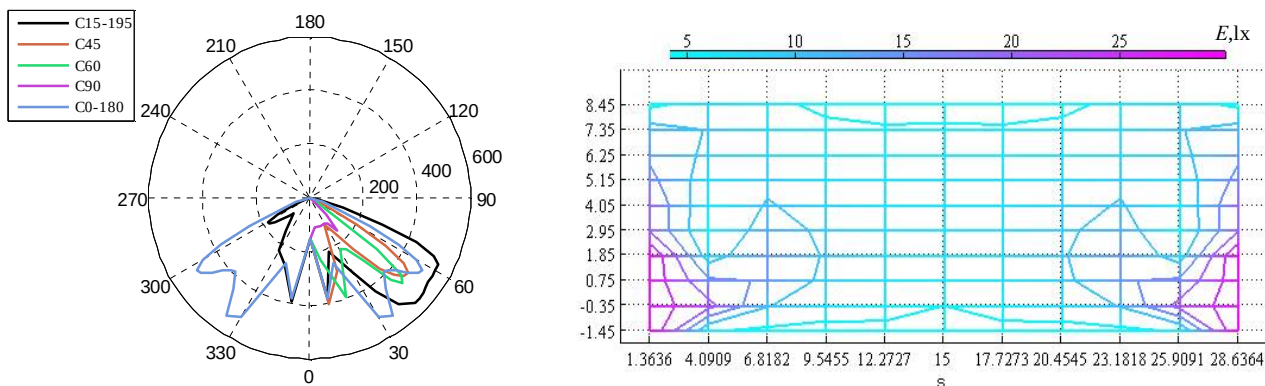
Осветителите са разположени едностранно над бордюра, ненавлизаш в изчислителното поле. Изчислителното поле обхваща уличното платно и тротоарните зони.



Фиг. 3. Светлоразпределителни криви и разпределение на осветеността в изчислителното поле за височина на окачване на осветителите $H=6\text{m}$

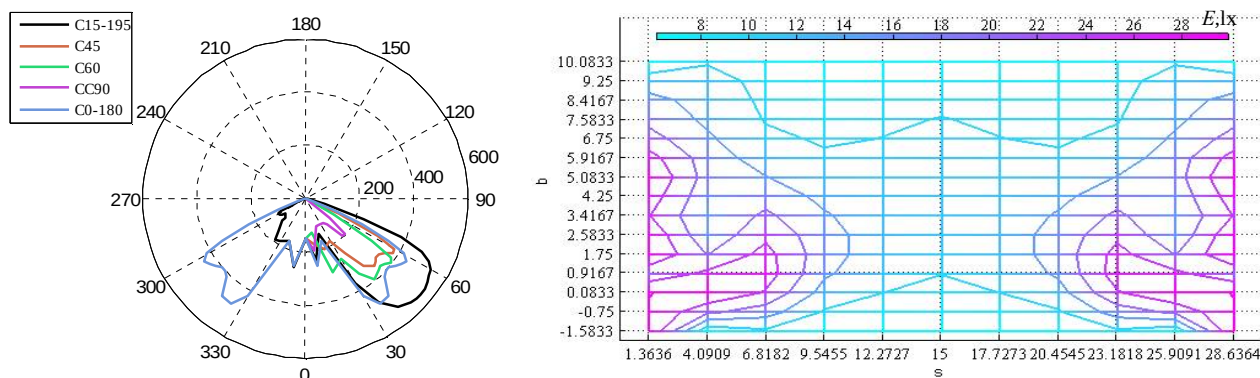


Фиг. 4. Светлоразпределителни криви и разпределение на осветеността в изчислителното поле за височина на окачване на осветителите $H=7\text{m}$



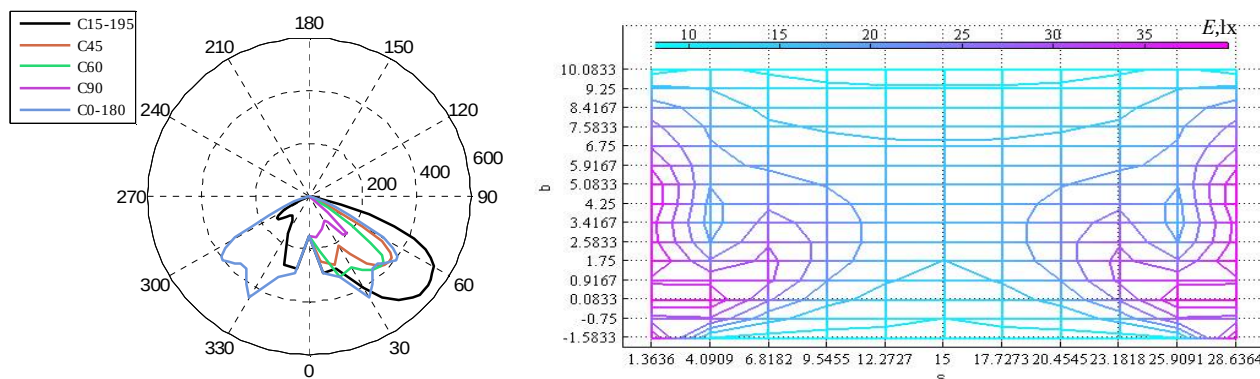
Фиг. 5. Светлоразпределителни криви и разпределение на осветеността в изчислителното поле за височина на окачване на осветителите $H=8\text{m}$

Главна улица със светлина ситуация **B1** с две дву-лентови платна за всяка посока на движение разделени от мантинела. Светлинен клас **CE3** алтернативен на **ME3c** с трафик над 7000 единици, вероятност от конфликтни зони и нормална трудност за ориентирание. Възможно наличие на паркирани автомобили. Широчина на уличното платно в едната посока - $b_{ул}=10,5m$ с три ленти за движение и широчина на тротоарите два метра. Средна хоризонтална осветеност $E_{cp} = 15 \text{ lx}$ с обща равномерност на осветеността $U_0=0,4$.



Фиг. 6. Светлоразпределителни криви и разпределение на осветеността в изчислителното поле за височина на окачване на осветителите $H=8m$

Главна улица със светлина ситуация **B1** с две тридулентови платна за всяка посока на движение разделени от мантинела. Светлинен клас **CE2** алтернативен на **ME2** с трафик над 7000 единици, висока вероятност от конфликтни зони, завишена трудност за ориентирание и възможна поява на паркирани автомобили. Широчина на уличното платно в едната посока - $b_{ул}=10,5m$ с три ленти за движение и широчина на тротоарите два метра. Средна хоризонтална осветеност $E_{cp} = 20 \text{ lx}$ с обща равномерност на осветеността $U_0=0,4$.



Фиг. 7. Светлоразпределителни криви и разпределение на осветеността в изчислителното поле за височина на окачване на осветителите $H=9m$

4. Анализ на получените резултати и изводи

Показаните на фигурите светлоразпределителни криви са мащабирани относно изходящият светлинен поток $\Phi_{изх}$ за 1klm условен светлинн поток на светлинния източник за осветител с $KПД=75\%$.

В Таблица 1са изчислени отношенията:

$$\kappa1_{E_{cp}} = \frac{\Phi_{изч.поле}}{E_{cp}.s.b} \quad \text{и} \quad \kappa2_{E_{cp}} = \frac{\Phi_{изх}}{E_{cp}.s.b} \quad (7)$$

даващи представа каква е стойността на светлинния поток с който се реализира 1-ца E_{cp} , за $1m^2$ улична площ при различните решения и класове улици. Изходящия светлинен поток $\Phi_{изх}$ и падащия върху изчислителното поле на уличното платно светлинен поток $\Phi_{из.поле}$ са при $MF=1$ (чист осветител), а “s.b”, m^2 е площта на изчислителното поле.

$$\text{Отношението} \quad \kappa_{изп\Phi} = \frac{\Phi_{из.поле}}{\Phi_{изх}}, \quad (8)$$

дава информация каква част от изходящия според фотометричното тяло от осветителя светлинен поток попада върху изчислителното поле. В тази формула е включен светлинния поток попадащ върху цялото изчислително поле обхващащо съответните участъци според геометриите на изчислителните схеми за уличното платно и тротоарите.

Таблица 1

n	Алтернативен светлинен клас	H, m	E_{cp} , lx	E_{min} , lx	U_0	$\Phi_{изх}$, lm	$\Phi_{изч.поле}$, lm	$\kappa1_{E_{cp}}$, lm/lx.m ²	$\kappa2_{E_{cp}}$, lm/lx.m ²	$\kappa_{изп\Phi}$
Обслужваща улица със светлинна ситуация B2 и светлинен клас CE4										
1	ME4b	6	10	4	0,4	4431	4048	1,23	1,34	0,91
2	ME4b	7	10	4	0,4	4356	4045	1,23	1,32	0,93
3	ME4b	8	10	4	0,4	4356	4096	1,24	1,32	0,94
Събирателна улица със светлинна ситуация B1 и светлинен клас CE3										
4	ME3c	6	15	6	0,4	6363	5490	1,36	1,57	0,86
5	ME3c	7	15	6	0,4	6097	5389	1,33	1,51	0,88
6	ME3c	8	15	6	0,4	5992	5322	1,31	1,48	0,89
Главна улица със светлинна ситуация B1 и светлинен клас CE3										
7	ME3c	6	15	6	0,4	8400	7613	1,35	1,49	0,91
8	ME3c	7	15	6	0,4	8036	7499	1,33	1,43	0,93
9	ME3c	8	15	6	0,4	7992	7493	1,33	1,42	0,94
Главна улица със светлинна ситуация B1 и светлинен клас CE2										
10	ME2	8	20	8	0,4	11529	10427	1,39	1,54	0,90
11	ME2	9	20	8	0,4	10850	10103	1,35	1,45	0,93
12	ME2	10	20	8	0,4	10675	10217	1,36	1,42	0,96

1. Както се вижда от фигурите и нормените изисквания за светлинните класове и типовете улици, за всяка конкретна ситуация е нужно характерно светлоразпределение удовлетворяващо точно определени нива.

2. Получените фотометрични тела са тип „full cut off”, като около 86%-96% от изходящия светлинен поток попада върху изчислителното поле, което показва много добра ефективност на светлоразпредлението. Едновременно с това се реализира ограничаване на светлинното замърсяване от неизлъчването на светлина в горната полусфера на получените фотометрични тела.

3. Максималният интензитет $I_{\max}$ в различните криви не е постоянен по месторазположение и варира в зоната $\gamma=55^{\circ}-62,5^{\circ}$ и $C=10^{\circ}-20^{\circ}$.

4. Не се наблюдава никаква закономерна тенденция при резултатите от решаването на оптимизационната задача за формата на кривите в зависимост от светлинната ситуация и геометрията на изчислителното поле.

5. Не се наблюдава никаква закономерна тенденция между височината на окачване и изходящият минимизиран светлинен поток (при разглежданите височини) за нарастване или намаляване на светлинния поток, но като че ли се проявява тенденции с нарастването на височината необходимия изходящ светлинен поток да намалява, което може да се обясни с по-малката „сплесканост” на формата на светлоразпределителните криви при по-големите височини и съответно по-малкият ъгъл, който сключва падащия светлинен лъч с нормалите в изчислителните точки и от там по-малки необходими стойности за интензитета в съответствие с произведението $I'(C_{jik}, \gamma_{jik}).\cos(\epsilon_{jik})^3$.

6. При разглеждане на разпределението на осветеността в изчислителното поле се забелязва че:

- че ниските нива на осветеност се реализират по крайните надлъжни изчислителни линии и съществува концентриране на по-ниски нива на хоризонталната осветеност в средните зони на изчислителните полета, независимо от класът на светлинната ситуация. Това показва, че в крайните страничните зони хоризонталната осветеност ще е под средната, но по-ниските нива на осветеност в тези зони не би следвало да са проблем, защото там движението се извършва единствено от пешеходци със скорости на придвижване под 5km/h.

- че по-високите нива на хоризонталната осветеност се реализират в средните зони на началният и крайният участък на изчислителното поле. Причина за това е, че основен принос в формирането на осветеностите имат основно най-близките до тези зони осветители поради по-малкият ъгъл който сключва падащия светлинен лъч с нормалите в изчислителните точки и ограниченията срещу заслепяване относно стойностите на интензитета за ъглите над 70 градуса по γ .

7. Недостатък на получените фотометрични тела е, че с тях могат да се удовлетворяват регламентираните нормени нива в много тесни граници на изменение на геометрията на осветителната уредба спрямо която са реализирани.

8. Структурата и подредбата на създадения и реализиран в Matlab-среда математически модел за минимизиране на изходящия светлинен поток позволява да се решават и други оптимизационни задачи, свързани както със светлоразпределението, качествените и количествените показатели, така и с геометриите на уличните осветителни уредби. Времето за решаване на конкретна задача зависи основно от зададените начални условия и изчислителните възможности на компютърната техника. Някой от решенията се достигат в рамките на 20-30 min при използване на компютърни конфигурации на основата на процесори Pentium IV 2,4GHz или симулиран двудрен Intel Mobile 3,06GHz с КЕШ=512MB и RAM = 1024MB. Максималното време за постигане до решение при минимизиране на светлиният поток по осветеност е било около 4 часа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 13201 – Part 1, Part 2, Part 3, Part 4.
- [2] Велинов, К., Хр. Василев, Влияние на геометричните параметри и нормативните ограничения върху оптималното светлоразпределение на уличните осветители. Осветление'2007 - XIII Национална конференция, Варна, Сборник доклади.
- [3] МРРБ, Наредба , №2 от 29 юни 2004г. на МРРБ, ДБ бр.86, 2004г. попр. бр.93, 2004.
- [4] Поршнеv, С. MATLAB 7 основы работы и программирования, Бином, Москва, 2006.
- [5] Стефанов, Ст., Минимизиране на светлинният поток на улични осветителни уредби за обслужваща, събирателна и главна улица нормирани по видимост, Годишник на ТУ-София, том 59/2009, книга 1.
- [6] CIE 140 – 2000, Road lighting calculations
- [7] CIE 13X – 1999, Guide to the lighting of urban areas
- [8] CIE 102 – 1993, Recommended file format for electronic transfer of luminaire photometric data, 1st Edition,.

Автори: гл.ас. инж. Станимир Стефанов, ТУ – София, ф-л Пловдив, кат. Електротехника, проф. д-р Христо Василев, ТУ – София, кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”

ОПТИМИЗИРАНЕ НА СВЕТОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ОСВЕТИТЕЛИ ЗА ПЕШЕХОДНИ ЗОНИ

Станислав Стефанов, Николай Бърдарски, Христо Василев

Резюме. В новите европейски норми за пешеходни зони се нормира средната полуцилиндрична осветеност с оглед доброто разпознаване лицата на пешеходците. Дефинирана е решена оптимизационна задача, при която с минимален светлинен поток се реализира експлоатационната стойност на средната полуцилиндрична осветеност и хоризонталната осветеност и тяхната равномерност, като се удовлетворява изискването за ограничаване на заслепяването.

OPTIMIZING THE LIGHTING DISTRIBUTION OF LUMINAIRE FOR PEDESTRIAN AREAS

Stanimir Stefanov, Nikolai Bardarski, Hristo Vasilev

Abstract. In the newest European standards is included average semi cylindrical illuminance like a tool to evaluate and improve face recognition of pedestrians in city zones. In this paper is definite optimization task in which is received average maintained semi cylindrical illuminance with minimum light flux. At the same time requirements of uniformity is observed and also glare is reduced. Result of solving this task is optimized light distribution curve.

1. Изложение

Характерно за натоварените пешеходни зони е изискването лицата на пешеходците да са добре видими и разпознаваеми. За да се направи количествена оценка на това изискване е необходимо да се изчисли полуцилиндричната осветеност в дадената точка. Идеята на този доклад е да се намери оптимизирана светлоразпределителна крива, при която имаме реализирана минимална нормена полуцилиндрична осветеност с минимален светлинен поток.

На фиг. 1 е показана изчислителна схема за определяне на полуцилиндричната осветеност. Полуцилиндричната осветеност, създавана от един осветител в дадена точка [1, 2], е

$$E_{sci} = \frac{I_i \cdot MF}{p h'^2} (1 + \cos b_i) \cdot \sin g_i \cos^2 g_i, lx \quad (1)$$

където:

- I_i, cd – интензитетът, падащ към наблюдаваната точка;

- h', m – разстоянието от светещата точка до хоризонталната равнина на наблюдение на височина 1,5 метра от уличното платно;

- β_i – ъгълът между вертикалната равнина, съдържаща вектора на интензитета, и посоката на наблюдение;

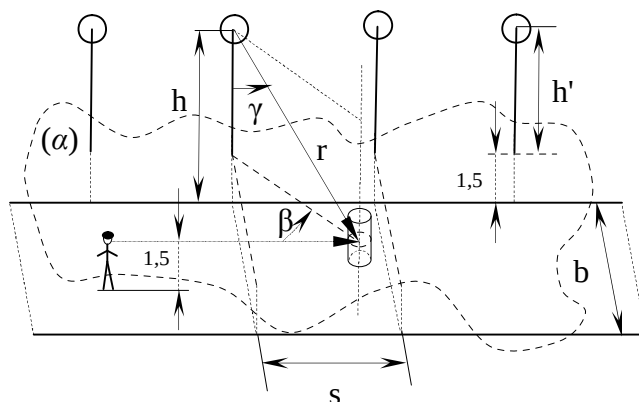
- γ_i – ъгълът между посоката на вектора на интензитета и вертикалната ос на полуцилиндъра;

- MF - експлоатационният фактор.

Сумарната полуцилиндрична осветеност в дадена точка е:

$$E_{sc\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{sci} \cdot lx \quad (2)$$

където n е броят на осветителите, създаващи осветеност в точката на наблюдение. Обикновено при уличното осветление с достатъчна за практиката точност n може да приема стойности 1, 2 или 3 в зависимост от геометрията на УОУ. В настоящото изследване е взето под внимание влиянието на първите 2 източника преди началото на изчислителното междустълбие



Фиг.1. Изчислителна схема

Заслепяващото въздействие на уредбата се определя по (3), съобразно фиг. 2.

То е оценено на база на показателя на заслепяване GR [3, 4], използван при нормирането на външни осветителни уредби, осигуряващи осветяване на открити работни площадки и външни обекти, в които се извършва трудова дейност. Съгласно [3, 4], показателя на заслепяването GR за осветителна уредба се изчислява за нейното начално състояние, когато тя има най-високи нива на светлинния поток с нови и чисти осветители. Той се определя по следния израз [3, 4]

$$GR = 27 + 24 \log(L_v / L_{ve}^{0,9}) \quad (3)$$

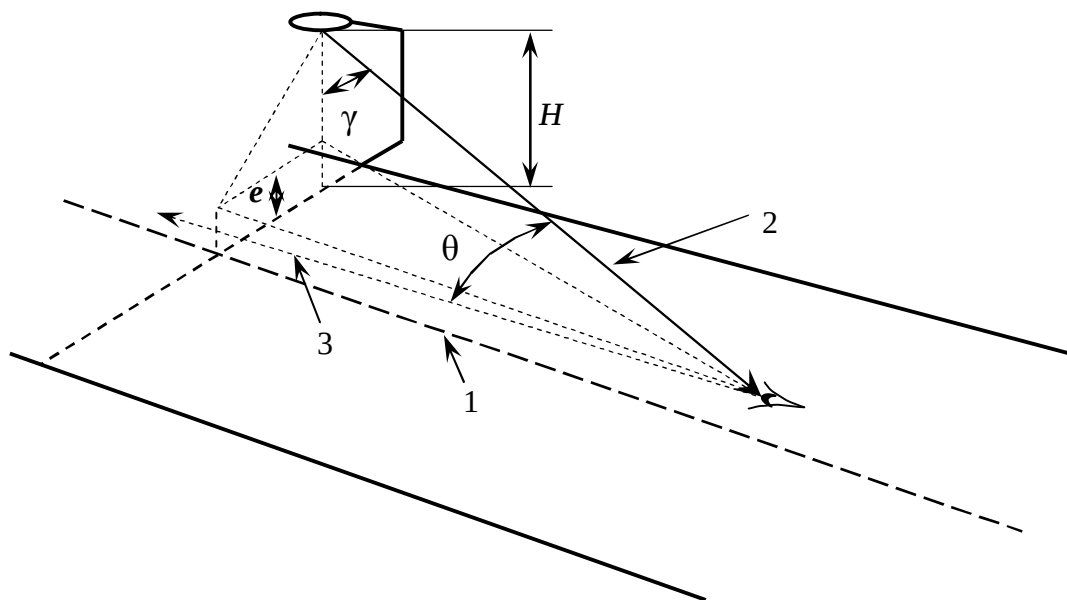
където

$$L_v = K \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{\theta_k^2}, \text{ cd/m}^2 \quad (4)$$

е воалиращата яркост, създавана от осветителите, влизащи в ползрението на наблюдателя, а $K=10$ при 23 годишен наблюдател според EN 13201-3:2003. За други възрасти K се определя по израза (5)

$$K = 9,86 \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{66,4} \right)^4 \right] \quad (5)$$

като в него с A е означена възрастта на наблюдателя.



Фиг. 2. Изчисляване на воалиращата яркост L_v

1 - линия на движение на наблюдателя; 2 - светлинен лъч към зеницата; 3 - зрителна ос;

H - височина на осветителя, m ; e - височина на наблюдателя, m

Осветеността E_k , създавана от k -тия осветител върху зеницата на наблюдателя по зрителната ос, е

$$E_k = \Phi_k \cdot I'_k(C_k, \gamma_k) \cdot \cos(\theta_k) / r_k^2, \text{ lx} \quad (6)$$

където:

- Φ_k - светлинния поток на източника в k -тия осветител, klm;
- $I'_k(C_k, \gamma_k)$ - стойността интензитета според светлоразпределителната крива в зависимост от ъглите C_k и γ_k на k -тия осветител, cd;
- θ_k - ъгъла, под който пада светлината от k -тия осветител в зеницата на наблюдателя спрямо зрителна ос, $^\circ$;
- r_k - разстоянието от зеницата на наблюдателя до осветителя, m ;
- n – броят осветители, влизащи в зрителното поле;
- L_{ve} - еквивалентната воалираща яркост, създавана от околната среда среда.

Съгласно [3, 4], при дифузно отразяващи земни настилки, тази яркост може да се изчисли по формулата

$$L_{ve} = 0,035.L_{av} = 0,035\rho E_{av} / \pi, \text{ cd/m}^2 \quad (7)$$

където:

- L_{av} е средната яркост в наблюдаваната зона
- E_{av} е средната хоризонтална осветеност на наблюдаваната зона
- ρ коефициент на дифузно отражение, който най-често $\rho=0,2$ [3]

Очите на наблюдателя се намират на височина 1,5 метра от повърхността на уличното платно, а зрителната ос е насочена на 2° надолу спрямо хоризонта. Наблюдателя се позиционира във всяка една точка от изчислителното поле с основна посока на наблюдение съвпадаща с надлъжната посока на предвижване по пешеходните зони. За определящ резултат се приема максималното ниво на показателя на заслепяване GR , който според [3] за пешеходци е $GR=55$.

Оптимизационните процедури са извършени в Матлаб-среда, на базата на нелинейни методи за оптимизиране, посредством матлаб-функцията **fmincon**, като за описване на светлоразпределителните криви е използвана експоненциална функция съдържаща полиноми на Лежандър до 9-ти ред [8], [9], [10]. Светлиния поток се изчислява по метода на зоналните потоци от полученото при оптимизационните процедури светлоразпределение.

Целевата функция е светилният поток на фотометричното тяло на осветителя

$\Phi_{изх} = \text{минимум}$
при ограничителни условия

$$\left| \begin{array}{l} GR \leq 55 \\ E_{scmax} \leq 25lx \\ E_{scmin} \geq 5lx \\ U_0 \geq 0,4 \\ [I(C, \gamma)] \leq [I_{огр}] \\ K_y \leq 7 \end{array} \right. \quad (8)$$

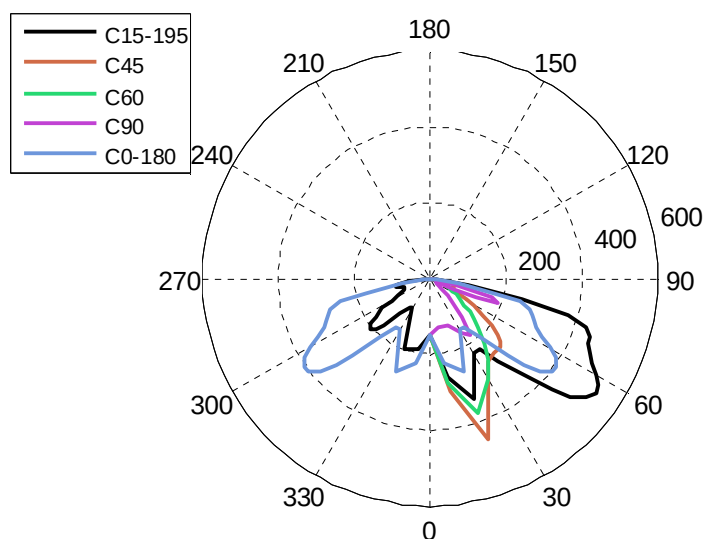
където $[I_{огр}]$ са ограничения за разликата между две съседни стойности на интензитета за 5° по "C" и „ γ ” да не надхвърля 150cd при 1klm условен светлинен поток на източника, а K_y е коефициента на усилване на оптичната система. Оптимизационната задача се решава при зададени стойности на следните параметри:

- експлоатационен фактор $MF=0,7$;
- коефициента на полезно действие на оптичната система – 0,8;
- височина на окачване H , m;
- ширина на алеята b , m;
- междустълбово разстояние s , m;
- обща равномерност на хоризонталната осветеност $U_0=0,4[1]$;

- минимална полуцилиндрична осветеност в главното направление на движение на пешеходците $E_{scmin}=5 \text{ lx}$ [1];
- едностранно осветяване на уличното платно с осветители, разположени на 0,5 m от бордюрите, като изчислителното поле обхваща едно междустълбие от пешеходната алея. Изчислителните точки са разположени на разстояние $s/10$ в надлъжна и на $b/5$ в напречна посока една от друга.

2. Резултати

$H=6\text{m}$; $b=5\text{m}$; $s=15\text{m}$; $K_y=6,68$; $E_{scmin}=5\text{lx}$; $E_{scmax}=25\text{lx}$; $E_{hav}=30\text{lx}$; $U_0=0,54$;
 $\Phi_{изх.осв}=6039\text{lm}$; $\Phi_{св.изт}=7549\text{lm}$; $GR_{max}=37,9$



Фиг. 3. Светлоразпределителни криви

Таблица 1

Полуцилиндрична осветеност E_{sc}, lx											
Изходни условия междустълбие $s=15\text{m}$, ширина $b=5\text{m}$, височина на стълба $h=6\text{m}$											
метри	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15
0.5	15.8	20.0	18.6	25.0	24.9	19.1	13.8	10.3	8.0	6.3	5.0
1.5	15.0	18.7	20.3	24.9	23.7	18.9	14.6	11.4	9.0	7.2	5.7
2.5	14.6	15.2	17.0	18.8	17.3	14.7	12.4	10.5	8.9	7.3	5.9
3.5	10.4	10.8	11.3	11.4	10.5	9.6	8.9	8.4	7.7	6.7	5.7
4.5	6.4	7.2	7.0	6.5	6.0	5.8	5.9	6.0	6.0	5.6	5.0

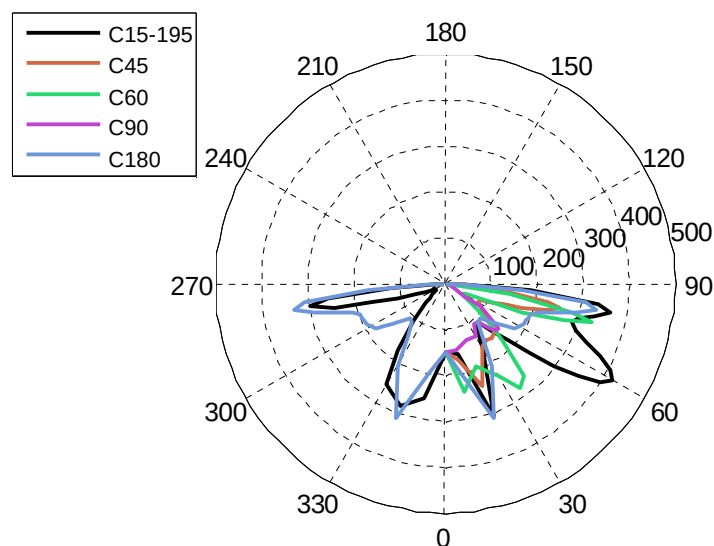
Таблица 2

Хоризонтална осветеност E_h, lx											
Изходни условия междустълбие $s=15\text{m}$, ширина $b=5\text{m}$, височина на стълба $h=6\text{m}$											
метри	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15
0.5	49.7	53.5	29.3	27.9	32.7	35.1	32.7	27.9	29.3	53.5	49.7
1.5	40.2	47.6	31.3	30.8	34.5	36.2	34.5	30.8	31.3	47.6	40.2
2.5	31.7	34.7	28.1	28.8	30.9	31.7	30.9	28.8	28.1	34.7	31.7
3.5	27.2	25.5	22.6	23.0	23.6	23.7	23.6	23.0	22.6	25.5	27.2
4.5	18.1	17.5	16.2	16.0	15.9	15.8	15.9	16.0	16.2	17.5	18.1

Таблица 3

Индекс на заслепяване GR											
Изходни условия междустълбие $s=15m$, ширина $b=5m$, височина на стълба $h=6m$											
метри	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15
0.5	33.1	34.0	34.7	35.5	36.5	37.6	37.9	36.2	33.5	33.4	32.8
1.5	33.3	34.2	34.8	35.4	35.9	36.5	36.6	35.4	33.3	32.8	32.6
2.5	32.1	32.8	33.1	33.1	33.1	33.0	32.9	32.4	31.4	31.2	31.5
3.5	29.9	30.1	29.9	29.3	28.6	28.2	28.1	28.3	28.4	28.8	29.3
4.5	26.7	26.6	25.8	24.7	23.7	23.2	23.5	24.2	25.1	25.9	26.4

$H=5m$; $b=5m$; $s=15m$; $K_y=5,25$; $E_{scmin}=5lx$; $E_{scmax}=25lx$; $E_{hav}=21,4lx$; $U_0=0,4$;
 $\Phi_{изх.осв}=5638lm$; $\Phi_{св.изт}=7048lm$; $GR_{max}=49,5$



Фиг. 4. Светлоразпределителни криви

Таблица 4

Полуцилиндрична осветеност E_{sc}, lx											
Изходни условия междустълбие $s=15m$, ширина $b=5m$, височина на стълба $h=5m$											
метри	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15
0.5	15.9	14.2	16.7	25.0	21.9	15.0	10.4	8.0	6.5	5.7	5.0
1.5	24.6	16.1	18.0	25.0	22.6	16.0	11.3	8.5	6.9	5.9	5.2
2.5	24.2	13.7	12.1	15.2	15.7	13.2	10.4	8.3	6.9	6.0	5.2
3.5	11.0	7.2	6.8	8.3	9.7	9.6	8.7	7.6	6.6	5.8	5.2
4.5	6.8	5.2	5.0	5.7	6.7	7.2	7.1	6.7	6.1	5.5	5.0

Таблица 5

Хоризонтална осветеност E_h, lx											
Изходни условия междустълбие $s=15m$, ширина $b=5m$, височина на стълба $h=5m$											
метри	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15
0.5	46.3	36.6	16.6	16.0	19.7	21.5	19.7	16.0	16.6	36.6	46.3
1.5	30.5	24.5	16.0	18.3	23.6	26.0	23.6	18.3	16.0	24.5	30.5
2.5	44.5	28.8	16.9	17.6	21.2	23.0	21.2	17.6	16.9	28.8	44.5
3.5	36.4	25.2	14.0	13.2	15.0	16.0	15.0	13.2	14.0	25.2	36.4
4.5	19.1	13.0	8.8	8.6	9.4	9.9	9.4	8.6	8.8	13.0	19.1

Таблица 6

Индекс на заслепяване GR											
Изходни условия междустълбие $s=15m$, ширина $b=5m$, височина на стълба $h=5m$											
метри	0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15
0.5	46.4	46.6	46.9	47.4	48.0	48.8	49.5	48.9	47.1	46.6	46.4
1.5	45.3	45.5	45.9	46.4	47.0	47.8	48.3	47.6	46.0	45.4	45.3
2.5	43.4	43.7	44.0	44.3	44.7	45.0	45.0	44.3	43.5	43.4	43.4
3.5	41.2	41.4	41.6	41.8	41.9	41.8	41.5	41.0	40.8	40.9	41.0
4.5	38.8	39.0	39.0	39.0	39.0	38.8	38.5	38.3	38.3	38.5	38.6

3. Заключение

1. Оптимизационната задача е решена за височини на осветителното тяло над пешеходната зона 6, 5, 4 и 3,5 метра за широчини на алеята съответно 5, 5, 4 3,5 метра.

2. От получените светлоразпределителни криви с най-удачна форма за практическа реализация се оказват кривите от фиг. 3., получени при височина на осветителя 6 метра.

3. Най-ниска стойност, относно минимизирания изходящият светлинен поток се постигна за височина на осветителя 5 метра.

4. От таблиците със стойностите на полуцилиндричната осветеност в изчислителните точки се вижда, че най-ниските нива се реализират в края на изчислителното междустълбие по направление на главната посока на движение на пешеходците, а най-високите нива на заслепяване се реализират в средната зона в близост до страната по която са разположени осветителите. Това разпределение на полуцилиндричната осветеност и заслепяването може да окаже неблагоприятно влияние върху зрителните условия в зоните с по-ниски стойности на полуцилиндричната осветеност отстоящи на 5-7 метра от тях по направлението на предвижване.

5. С така получените светлоразпределителни криви, най-високите нива на полуцилиндрична осветеност се реализират в средните зони, като почти съвпадат със зоните в които се реализират най-високите нива на заслепяване, което от своя страна благоприятства зрителните условия за наблюдател намиращ се в началната зона на изчислителното поле и наблюдаващ обект разположен в средната зона.

6. Реализираната средната стойност на хоризонталната осветеност при височина 6 метра - $30lx$ е значително по-висока от тази при височина 5 метра - $21,4lx$, при изходящи потоци съответно $6039lm$ и $5638lm$, което би могло да се обясни с по-малкия ъгъл спрямо нормалата, под който сключват светлинните лъчи спрямо повърхността на пешеходната зона и по-голямата концентрираност на светлинния поток върху нея.

7. Реализираните стойности на показателя на заслепяването GR са видимо по-ниски от нормираната за пешеходци в [3] и [4].

8. Получените светлоразпределителни криви за височини на окачване 4 и 3,5 метра са със значителни пикове във своята форма , което на практика ги прави невъзможни за практическо реализиране, но биха могли да бъдат използвани като основа за реализиране на по-гладки криви при проектирането на осветители с изходящ светлинен поток близък до получения.

9. Въвеждането на допълнителни изисквания за минималната полуцилиндрична осветеност, повишаване на равномерността, повишаването на минималната полуцилиндрична осветеност в посока различна от главното направление на движение и др. при всички случаи ще увеличи необходимия светлинен поток, от там и мощността на съответния светлинен източник.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 13201 – Road lighting – Part 1; Part 2; Part 3; Part 4.
- [3] CIE 129-1998, Guide for lighting exterior work areas.
- [4] CIE DS 015/E:2002, Lighting of work places – outdoor work places.
- [5] CIE 13X – 1999, Guide to the lighting of urban areas.
- [6] CIE 102 – Recommended file format for electronic transfer of luminaire photometric data, 1st Edition, 1993.
- [7] INDALUX ES – Lighting engineering 2002.
- [8] Велинов, К., Хр. Василев, Влияние на геометричните параметри и нормативните ограничения върху оптималното светлоразпределение на уличните осветители, Осветление'2007 - XIII Национална конференция Варна, Сборник доклади.
- [9] Стефанов, Ст., Минимизиране на светлинният поток на улични осветителни уредби за обслужваща, събирателна и главна улица нормирани по видимост, Годишник на ТУ-София, том 59/2009, книга 1.
- [10] Поршнев, С. MATLAB 7 основы работы и программирования, Бином, Москва, 2006.
- [11] БДС EN60598-1 – ОСВЕТИТЕЛИ, Част 1 – Общи изисквания и изпитвания.
- [12] Гуторов, М., Основы светотехники и источники света.
- [13] Василев, Н., И. Василева, Архитектурно, художествено и рекламно осветление.

Автори: гл.ас. инж. Станимир Стефанов - ТУ – София, ф-л Пловдив, кат. Електротехника, инж. Николай Бърдарски - „ЕЛКО” ООД – гр. Плевен, проф. д-р Христо Василев - ТУ – София, кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”

ПРИЛОЖЕНИЯ НА МОЩНИ СТАБИЛИЗАТОРИ НА ТОК И НАПРЕЖЕНИЕ В ЛАБОРАТОРИЯТА И ПРАКТИКАТА

Петър Матов, Ивайло Долапчиев

Резюме. Тази работа представя резултатите от изследването и практическото приложение на устройства разработени на базата на стабилизатори на ток и напрежение. Създаденият заместител на акумулаторна батерия симулира поведението ѝ по време на заряд и се използва при лабораторно изследване на ветрогенератори. Разработеният ограничител на захранващото напрежение редуцира пиковите повишения на захранващите напрежения в мрежата 24V, от която се захранва системата за таксуване на пътници в трамвайните мотриси.

PRACTICAL AND LABORATORY APPLICATIONS OF POWER CURRENT AND VOLTAGE STABILIZERS

P. Matov, I. Dolapchiev

Abstract. This work presents results from investigation and practical application of devices, designed on the base of current and voltage stabilizers. In order to substitute real battery when it is charged an electronic simulator is designed. It is used in laboratory experimental set-up for wind-driven generators investigations. Another, voltage control device is designed to restrict the accidental growth of supply voltage in 24V power net that supplies the passenger charging system in trams.

1. Увод

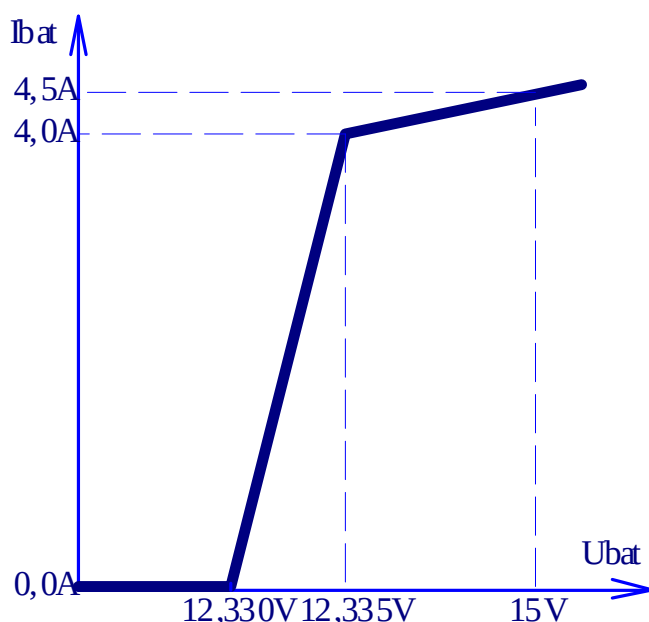
В постояннотоковите вериги съгласуването на възможностите на източниците с потребностите на консуматорите се извършва чрез токови и напрежителни стабилизатори [1]. Това са устройства, които се включват между източника на енергия и консуматора и изпълняват ролята на буфер. Когато входното въздействие е по-голямо от необходимото за консуматора, те поемат разликата върху себе си. При по-ниско входно въздействие стабилизаторите не влияят на енергийния обмен. Посочения принцип на действие е заложен при изграждането на класическите стабилизатори на ток и напрежение.

В настоящата работа се представят устройства, които са изградени на базата на стабилизатори на ток и напрежение и имат различно приложение. Създадения заместител на акумулаторна батерия има типично лабораторно приложение, докато ограничителя на напрежение се използва при захранването на системата за таксуване на пътници в трамвайните мотриси.

2. Лабораторен заместител на акумулаторна батерия

Изследването на малки ветрогенератори, които работят върху товар акумулаторна батерия се затруднява поради липсата на възможност да се регулира в желаната степен и достатъчно продължително зарядния процес на батерията. За преодоляване на посочените проблеми при изследването на ветрогенератори е разработен заместител, който симулира повторяемо поведението на акумулаторна батерия по време на зареждането ѝ.

Заместителят представлява товарно устройство със силно нелинейна характеристика на зависимостта между тока през него и напрежението на клемите му - фиг.1. Устройството е проектирано така, че при захранването му с напрежение надвишаващо 12V, характеристиката му $I(U)$ приблизително повтаря изменението на тока на зареждане I_{bat} и напрежението на клемите U_{bat} на една оловна акумулаторна батерия (АБ).

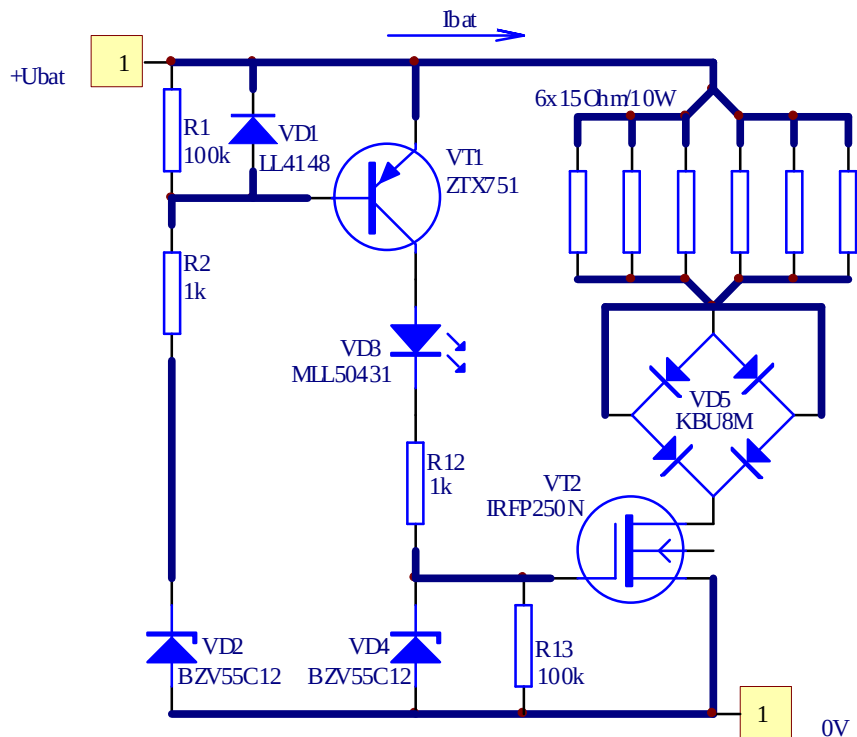


Фиг. 1. Характеристика ток-напрежение на заместителя на 12-волтова оловна акумулаторна батерия

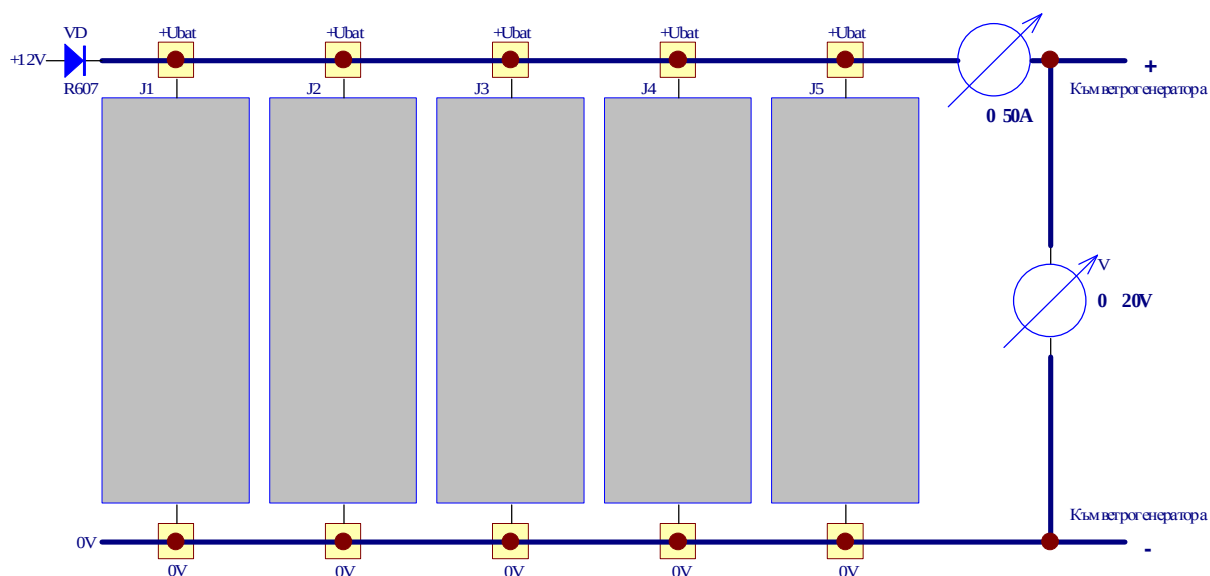
Стръмността в характеристиката от около 1A/mV е постигната с помощта на мощен аналогов стабилизатор. Той е реализиран с един биполярен и един MOS транзистор, свързани както е показано в схемата на *фиг.2*. Прагът от 12,33V се определя от ценовия диод VD2. При работа на генератора с малка мощност (до ~10W) постъпилата енергия от генератора се разсейва като топлина от мощния MOS транзистор VT2. По-големите мощности (до 50-60W) се разсейват от товарните резистори на заместителя 6x15Ω/10W.

Номиналната електрическа мощност на лабораторния ветрогенератор (~300W [2]) е значително по-голяма от посочените възможности на заместителя. Това налага включване в паралел на няколко товарни устройства J1÷J5 - *фиг.3*. За още по-добро приближение в имитацията на акумулаторна батерия, на общите шини $+U_{bat}$ и 0V се подава напрежение 12V от маломощен

източник. След диода VD напрежението на шините е около 11,7V, съответстващо на разрежена батерия. Напрежението и тока от ветрогенератора се измерват чрез показаните на схемата волтметър и амперметър. Произведениято от техните показания позволяват да се определи електрическата мощност на ветрогенератора при различни скорости на вятъра.



Фиг. 2. Принципна електрическа схема на аналогов стабилизатор, симулиращ работа на акумулаторна батерия по време на заряд

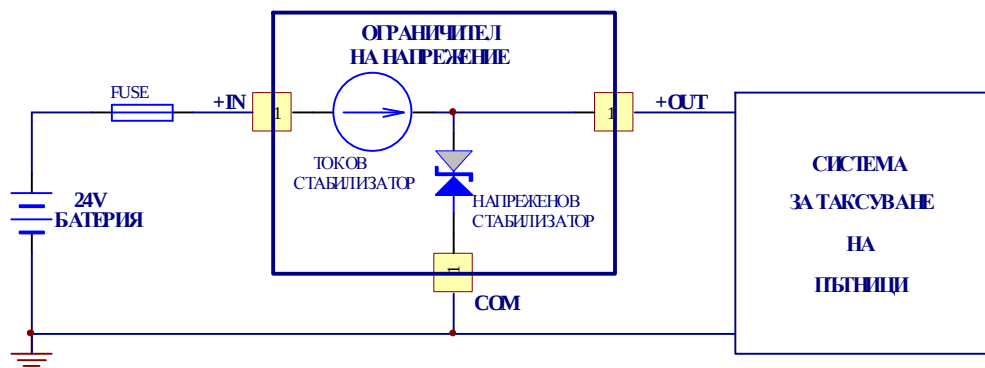


Фиг. 3. Схема на паралелното свързване на няколко аналогови стабилизатори в заместител на акумулаторна батерия по време на заряд и измервателни уреди към него

3. Ограничител на захранващо напрежение

Ограничителят на захранващото напрежение ОН е предназначен да елиминира повишаването на захранващото напрежение в мрежа 24V на трамваите към Системата за таксуване на пътници. Те се дължат на комутационните процеси, съпровождащи включването и изключването на консуматори, акумулаторна батерия и заряден преобразувател.

Системата за таксуване на пътници съдържа валидатори на електронни карти, автомат за продажба на билети и компютър. Всички апарати на тази система получават захранване от акумулаторната батерия 24V през един общ стопяем предпазител. Всяко продължително повишаване на захранващото напрежение над 36V води до изгаряне на елементи от апаратите на Системата за таксуване или на общия стопяем предпазител. Ограничителят на напрежение се свързва между предпазителя и апаратите на Системата, така че покачванията на напрежението над $32 \div 33V$ да се поемат от него. Това ограничение отговаря на изискванията на [3] и се постига чрез мощен стабилизатор на напрежение, захранен през стабилизатор на ток - фиг. 4.



Фиг. 4. Принципна схема на включване на ограничителя на напрежение

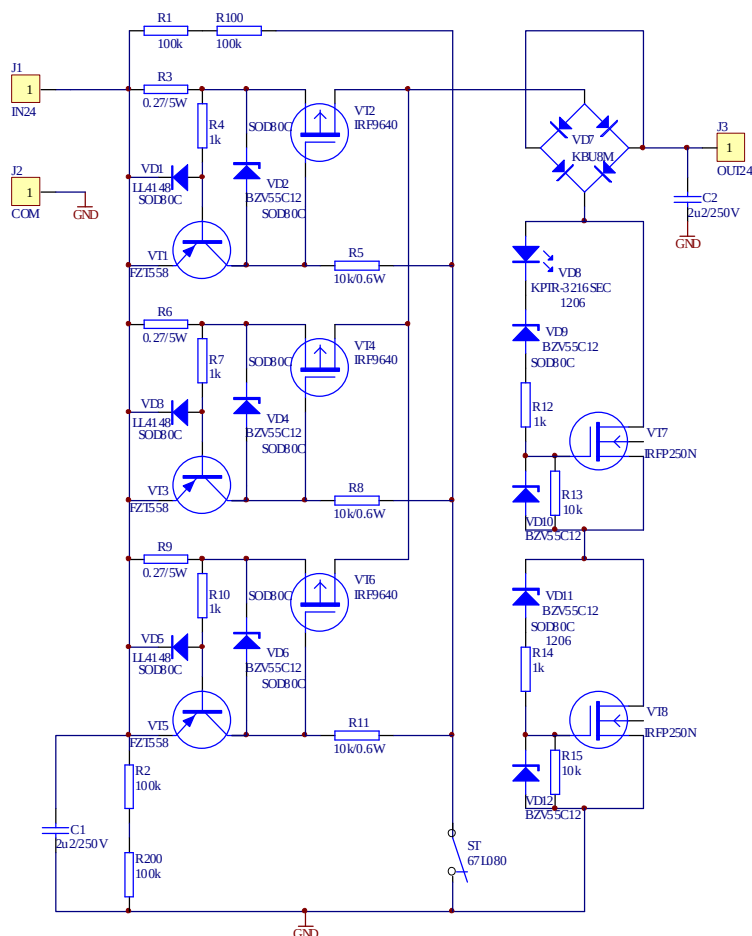
Електрическата схема на ограничителя на напрежение е показана на *фиг.5*. Стабилизаторът на ток е изграден с транзисторите VT1÷VT6 и нискоомните резистори R3, R6 и R9. Стабилизаторът на ток може да се самоизключва чрез температурно зависимия ключ ST.

Стабилизаторът на напрежение се състои от диодите VD8 ÷ VD12 и транзисторите VT7, VT8. Диодите на моста VD7 предпазват ограничителя от погрешно включване към напрежение с обратна полярност и всички комбинации на неправилно свързване или частично липсващи външни връзки. Кондензаторите C1 и C2 поемат част от енергията на електромагнитните вентили и спирачки в трамвая, предизвикващи краткотрайни високоволтови смущения при всяка комутация.

Ограничителят на напрежение има поведение, което се определя от моментната стойност на входното захранващо напрежение и моментната стойност на тока на Системата за таксуване. Когато те са в нормални граници (под 33V и под 2A) ограничителят е пасивен ("прозрачен"), напрежението на неговия изход е по-малко от входното с около 1V, а отделяната в него мощност е около 2W. При покачване на входното напрежение над 33V изходното

напрежение към системата се запазва, токът нараства и разликата се поема от ограничителя.

При намаляване на съпротивлението на товара токът му се увеличава. Увеличението на товарния ток се ограничава на около 8А. Токът остава със същата големина и при по-нататъшно намаляване на товарното съпротивление до нула (късо съединение във веригите на Системата за таксуване).



Фиг. 5. Електрическа схема на ограничителя на напрежение

Преминаването на устройството в режим на ограничение, поради повишаване на захранващото напрежение или надвишаване на допустимите стойности на тока е съпроводено с повишаване на температурата на ограничаващите транзистори. В зависимост от големината на отделяната мощност повишаването на температурата на охлаждащия транзисторите радиатор с крайни размери става по-бавно или по-бързо. При достигане на температури над 80°C ограничителят прекъсва напълно веригата си вход - изход, токът (респективно мощността) се нулира, а температурата на радиатора на транзисторите започва да спада. След изстиване под 55°C Ограничителят възстановява свойствата си и температурата може отново да нарастне до 80°C. Цикълът е с период на повторение 10÷20 минути и продължава до премахване на причината за отделяне на повишената мощност. Този начин на действие предпазва апаратите на Системата за таксуване на пътници от повреди и запазва работоспособността на Ограничителя.

4. Експериментална проверка и електрически показатели

Разгледаните устройства са изследвани многократно в лабораторни условия, при което са установени техните основни електрически показатели.

Заместител на акумулаторна батерия:

1. Напрежение на сработване – 12.33V
2. Заряден ток – 4.5A
3. Максимална консумирана мощност – 60W

Ограничители на напрежение:

1. Работен ток – няколко ампера, определени са от моментната консумация на Системата за таксуване на пътници
2. Ограничение по ток – $8A \pm 1A$
3. Входни и изходни напрежения:
 - с неограничена продължителност: $10V \leq U_{BX} \leq 33V$ и $U_{ИЗХ} = U_{BX} - 1.5V$;
 - с продължителност до 1s: $33V \leq U_{BX} \leq 100V$ и $U_{ИЗХ} \leq 32 \pm 1.5V$;
 - с продължителност над 1s: $33V \leq U_{BX} \leq 100V$ и $0V \leq U_{ИЗХ} \leq 33V \pm 1.5V$ (устройството се включва и изключва периодично от термичната защита (ST), като предпазва себе си и консуматорите от повреди;
 - с обратна полярност: до 1000V - не работи.

Практическата експлоатация на заместителя на акумулаторна батерия започва през пролетта на 2010 година в „Лаборатория по хидроенергетика и хидравлични турбомашини” на Техническия Университет – София. Свързаните по посочената на *фиг.3* схема заместители се използват за лабораторни упражнения и за изследване работата на различни конструкции на витла за ветрогенератори при променящи се условия на обдухване.

Ограничители на напрежение и ток по схемата от *фиг.5* се монтират от началото на 2009 година в трамвайни мотриси на Столичния градски транспорт. Инсталираните повече от 100 броя ограничители се експлоатират при екстремните температури на зимния и летния сезон. За целия период на работата си устройствата потвърждават проектните си характеристики и осигуряват надеждно захранване на Системата за таксуване на пътници.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sinclair I. R., J. Dunton, “Practical Electronics Handbook”, Elsevier, 2007.
- [2] <http://www.wsetech.com/pdfs/manual-350-eng-4jd.pdf>, AEOLUS 300 - Wind Turbine Generator, User's Manual, 2007.
- [3] БДС EN 50155:2007, Железопътна техника, Електронни устройства, използвани в подвижния железопътен състав, т.5.1.1.1 Вариации на захранващото напрежение.

Автори: Петър Матов, д-р, доцент, кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Ивайло Долапчиев, д-р, гл. ас., кат. ”Обща електротехника”

ИМПЕДАНСИ НА КОНТАКТНИ МРЕЖИ В МНОГОПЪТНИ УЧАСТЪЦИ

Петър Матов, Георги Георгиев

Резюме. В работата е изследвано влиянието на измененията на коловозното развитие в железопътни гари върху импеданса на контактната мрежа и точността на работа на цифрови указатели на мястото на късо съединение, използващи този импеданс за изчисляване на разстоянията до повредите. Отчетени са схемните и конструктивните особености на контактната мрежа и релсовия път, а също така и алгоритъма на работа на цифровите указатели.

IMPEDANCES OF OVERHEAD CONTACT LINES IN MULTITRACK ZONES

Petar Matov, Georgi Georgiev

Abstract. In this work it is investigated the influence of railway station track number changes over the impedance of overhead contact net and the exactness of digital pointers which use this impedance to calculate the distance between substation and faults. The schematics and construction particularities of the overhead contact lines, of the rail track and the digital pointers' algorithm are considered.

1. Въведение

През последните години в някои малки и второстепенни железопътни гари у нас се извършва значително редуциране на коловозното развитие с цел намаляване на разходите за поддръжка на контактна мрежа и релсови пътища. Изменението на броя коловозите води до промяна и в конфигурацията на контактната мрежа (броя на паралелно свързаните проводници и броя на релсите), а оттам и на импеданса ѝ.

Промяната в импеданса се отразява на правилната работа на указателите на мястото на късо съединение (ЦУМКС) [1]. Цифровите указатели на мястото на късо съединение изчисляват автоматично разстоянията l_{kc} от тяговата подстанция до аварията по параметрите на аварийните режими в контактната мрежа – напрежения U_{kc} на късо съединение и токове I_{kc} на късо съединение с две последователни операции делене (1) и (2):

$$Z_{kc} = \frac{U_{kc}}{I_{kc}}, \quad (1)$$

$$l_{kc} = \frac{Z_{kc}}{z_0} \Rightarrow \frac{[\Omega]}{[\Omega/km]} \Rightarrow [km]. \quad (2)$$

Намерената след първото делене стойност $Z_{kc} [\Omega]$ е импедансът на веригата с късо съединение. Той се дели на линейния импеданс $z_0 [\Omega/km]$, който е приет за константна величина и е специфичен за всеки извод от подстанцията към контактната мрежа. Изменението на броя на коловозите може да повлияе на точността на показваното от ЦУМКС разстояние. Очевидна е разликата между действителното l_{kc} и изчисленото с второто делене разстояние l_{kc1} при различие между специфичния линеен импеданс на контактната мрежа z_{01} и заложената в апарата константа z_0 . Изчисленото разстояние l_{kc1} ще бъде равно на действителното l_{kc} само при равенство на заложения z_0 и действителния z_{01} линеен импеданс:

$$l_{kc} z_{01} = Z_{kc1}, \quad (3)$$

$$l_{kc1} = \frac{Z_{kc1}}{z_0}. \quad (4)$$

При друга стойност (z_{02}), контактната мрежа със същата дължина l_{kc} ще има друг импеданс Z_{kc2} , а изчисленото със z_0 разстояние l_{kc2} ще се различава от действителното:

$$l_{kc} z_{02} = Z_{kc2}, \quad (5)$$

$$l_{kc2} = \frac{Z_{kc2}}{z_0}. \quad (6)$$

След делене (6) на (5) следва, че полученото по изчислителен път разстояние l_{kc2} е пропорционално на новия линеен импеданс z_{02} :

$$l_{kc2} = l_{kc} \frac{z_{02}}{z_0}. \quad (7)$$

От (7) се вижда, че за да има равенство между изчисленото l_{kc2} и действителното l_{kc} разстояние до мястото на късо съединение е необходима пренастройка на специфичния линеен импеданс, така че z_0 в апарата да се изравни с новия линеен импеданс z_{02} .

Тежестта на гаровите коловозни развития върху импеданса на контактна мрежа с късо съединение в най-отдалечената си от тяговата подстанция точка (в секционния пост) се увеличава при увеличаване на броя m и дължините l_i на гаровите коловози и намалява при увеличаване на дължината на фидерна зона с фиксиран брой гари n . Във фидерна зона с дължина l_{max} , без гарово коловозно развитие, максималният импеданс Z_{max} на съответната й контактна мрежа е

$$Z_{max} = z_0 l_{max}. \quad (8)$$

При наличие на няколко гари n с дължини l_i и по-малки линейни импеданси z_{0i} във фидерна зона със същата дължина l_{max} , импедансът на контактната мрежа Z ще бъде по-малък от Z_{max} :

$$Z = \sum_1^n z_{0i} l_i + z_0 \left(l_{max} - \sum_1^n l_i \right). \quad (9)$$

Намалението ΔZ може да се намери от разликата $Z_{max} - Z$:

$$\Delta Z = Z_{max} - Z = z_0 l_{max} - \left(\sum_1^n z_{0i} l_i + z_0 \left(l_{max} - \sum_1^n l_i \right) \right) = \sum_1^n z_0 l_i - \sum_1^n z_{0i} l_i. \quad (10)$$

Средните линейни импеданси за фидерна зона в двата случая са съответно

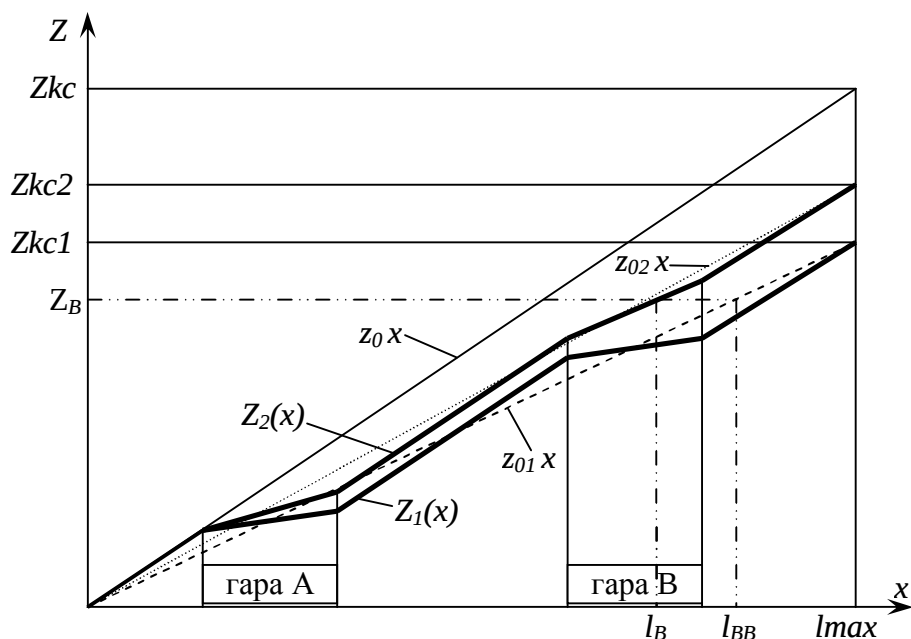
$$\frac{Z_{\max}}{l_{\max}} = z_0 \quad \text{и} \quad (11)$$

$$z_{01} = \frac{Z_{kc1}}{l_{\max}} = \frac{\sum_1^n z_{0i} l_i + z_0 \left(l_{\max} - \sum_1^n l_i \right)}{l_{\max}}. \quad (12)$$

Промяната в линейните импеданси до z_{0j} на още няколко гари m , вследствие на изменение на броя на коловозите им, ще промени и средния линейен импеданс на фидерната зона до z_{02} :

$$z_{02} = \frac{Z_{kc2}}{l_{\max}} = \frac{\sum_1^n z_{0i} l_i + \sum_1^m z_{0j} l_j + z_0 \left(l_{\max} - \sum_1^n l_i - \sum_1^m l_j \right)}{l_{\max}}. \quad (13)$$

Зависимостите на импедансите на веригите с късо съединение (при две гари във фидерна зона, с и без намаляване на броя на коловозите им) са начупени прави линии и изглеждат така, както примерно е показано на *фиг.1*:



Фиг. 1. Зависимости на импедансите на късо съединение от разстоянието преди (индекс 1) и след намаление (индекс 2) на броя на коловозите с контактни мрежи в гарите

Възприетият начин (11) на изчисление на средна стойност за линейен импеданс с максималната дължина намалява отклоненията на показанията на ЦУМКС спрямо действителните разстояния, особено при наличие на гари. Употребата на една единствена константа улеснява реализирането на изчислителен алгоритъм в ЦУМКС, без необходимост от точно съобразяване с конкретната инфраструктура и локалните линейни импеданси. Както се вижда от *фиг.1*, текущият импеданс $Z_1(x)$ (долната плътна линия) обвива линейната зависимост $z_{01}x$, отклоненията му от тази зависимост са знакопроменливи и, вследствие на това, сравнително малки. Промяната на знака може да липсва (например ако участъкът започва с гара).

2. Проблем

След намаляване на броя на коловозите в двете гари, едно късо съединение в гара В на разстояние l_B ще бъде съпроводено от импеданс Z_B , съгласно горната плътна линия (*фиг.1*). Изчисленото разстояние l_{BB} със стария специфичен линеен импеданс z_{01} ще бъде по-голямо от l_B (*фиг.1*):

$$l_{BB} = \frac{Z_B}{z_{01}}. \quad (14)$$

Възниква въпросът дали разликите между двете разстояния на практика са толкова значителни, че да се налага корекция на специфичния линеен импеданс в ЦУМКС до новата стойност z_{02} ? За да се намери отговор е необходимо:

- да се определят специфичните линейни импеданси на включените във фидерната зона гари преди и след редуцията на коловозните им развития,
- да се изчисли количественото им участие в общите импеданси и
- да се въведе и приложи критерий за оценка.

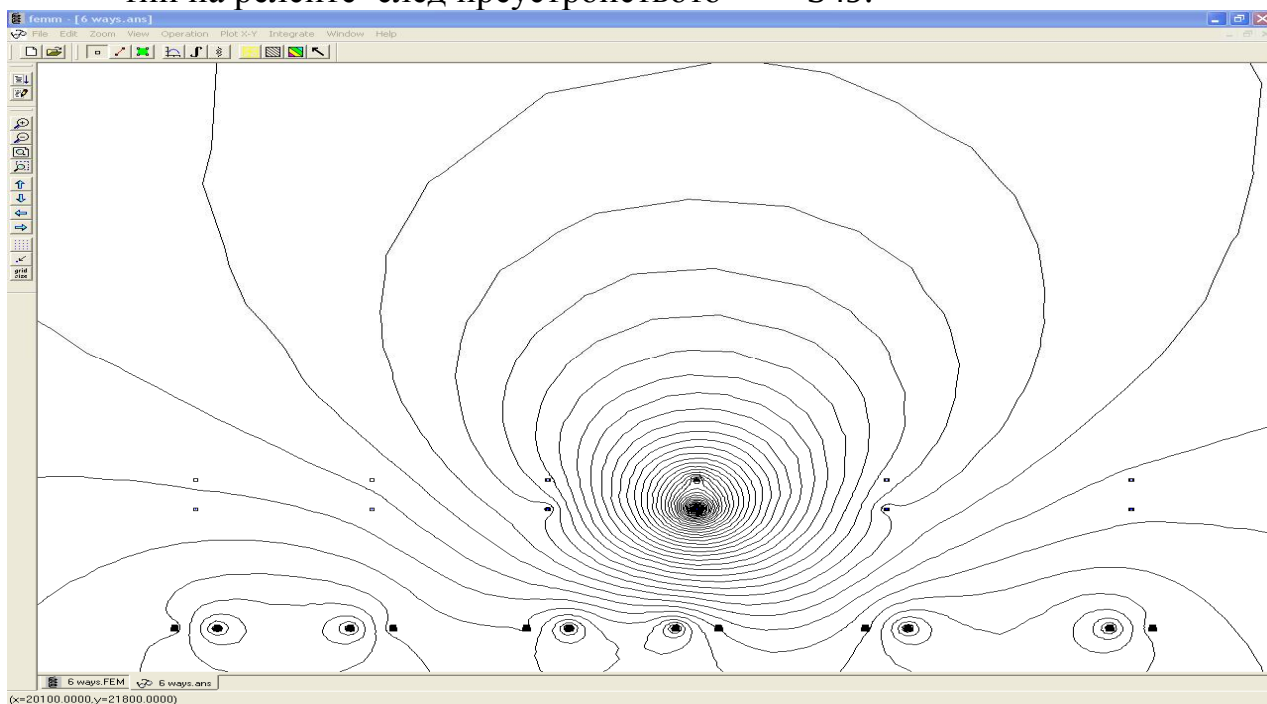
Тук е разгледана фидерната зона Величково-Синдел с дължина 22 km на извод „Албена” от тягова подстанция „Величково”. В тази зона, на разстояние 7 km от тяговата подстанция се намира гара „Нова Шипка”, чиито електрифицирани коловози са намалени през 2009/2010 г. от 6 на 2. За изчисленията е прието, че четирите елиминирани коловози са били еднакво дълги - 1000m, като всичките са били съединени в паралел и захранвани от извод „Албена”.

3. Изследване и резултати

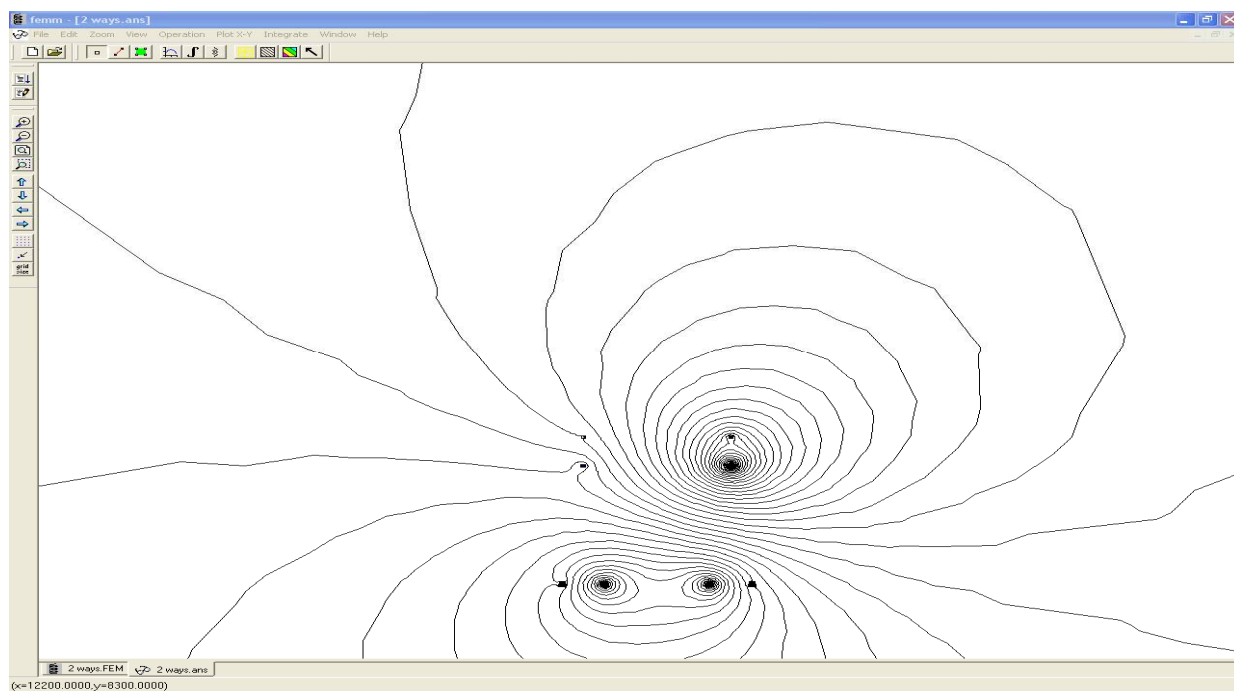
Изследването, в резултат на което се вижда разликата в специфичните линейни импеданси на контактната мрежа на гарата при къси съединения, преди и след редуцирането на броя коловози в гара “Нова Шипка”, е направено с програмата FEMM [2] – *фиг.2* и *фиг.3*. Приети са следните разстояния, сечения и материали [3]:

- междурелсие - 1435mm;
- изчислително разстояние между носещо въже и контактен проводник - 1400mm;
- разстояние между контактен проводник и „глава релса” - 5700mm;
- разстояния между осите на шестте коловоза броени отляво надясно по *фиг.2* – 5900mm, 5900mm, 5000mm, 6350mm, 8200mm;
- сечения на медния контактен проводник над коловози 1, 2, 5, и 6 – 85 mm²;
- сечения на медния контактен проводник над коловози 3 и 4 - 100 mm²;
- носещото въже е биметално StCu със сечение - 50 mm²;
- тип на релсите – S49 , релсова стомана с линейна маса 49.4 kg/m и сечение 6300 mm²;
- разстояние между осите на двата коловоза след преустройството 5000mm;

- сечения на медния контактен проводник над коловози 3 и 4 след преустройството - 100 mm^2 ;
- носещото въже над коловози 3 и 4 след преустройството - биметално StCu със сечение 50 mm^2 ;
- тип на релсите след преустройството – S49.



Фиг. 2. Електромагнитно поле от ток в контактната мрежа на път 4 и шест гарови коловоза. Специфичният линейен импеданс е $z_{06} = 0.222 + j0.440 \text{ } \Omega/\text{km}$



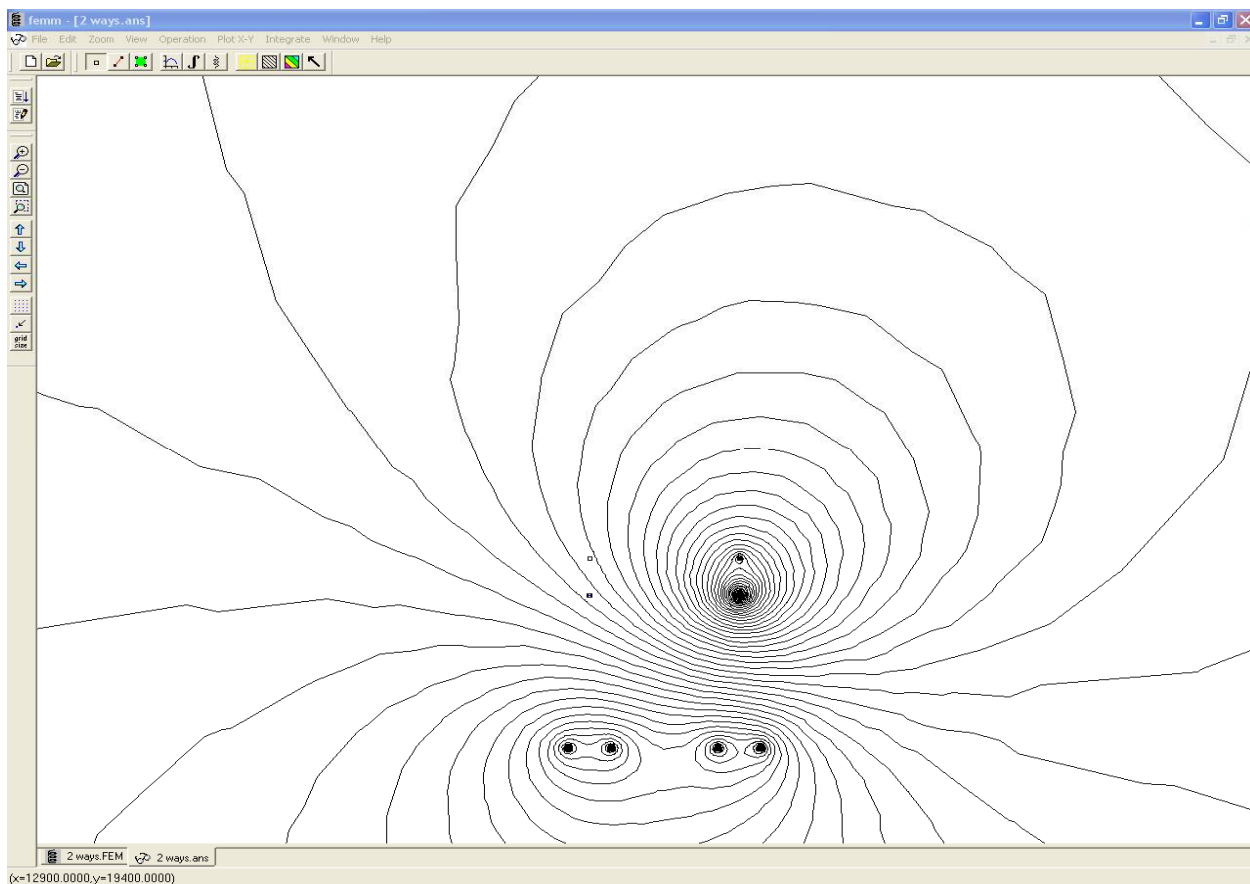
Фиг. 3. Електромагнитно поле от ток в контактната мрежа на път 4 и два гарови коловоза. Специфичният линейен импеданс е $z_{02} = 0.279 + j0.573 \text{ } \Omega/\text{km}$

В показаните симулационни модели са отчетени особеностите на релсовите вериги в гари и открит път: за някои осигурителни инсталации и

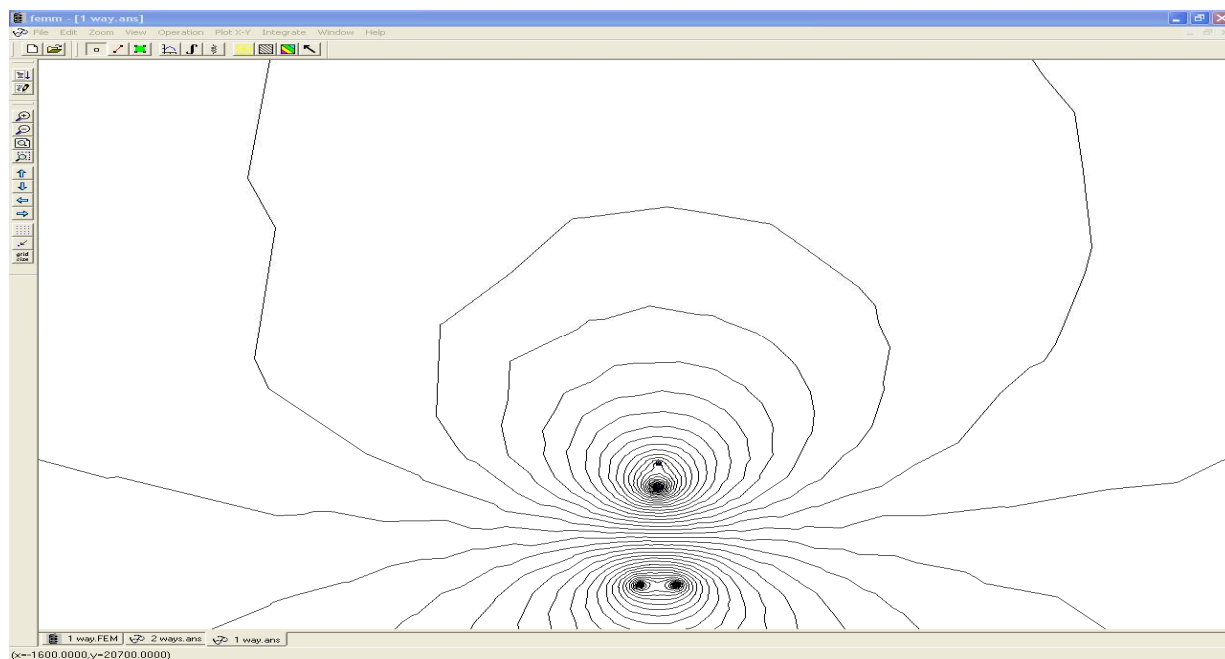
маршрутни централизации, работещи с постоянен ток е прието едната от двете релси на гаровите коловози да се изолира от тяговата мрежа за променлив ток („еднонишкова релсова верига” [4]). По този начин токовете на товара или на къси съединения преминават само през вторите релси. При наличие на влак или влакове втората релса шунтира първата чрез вагонните колооси по дължината на влака. Изборът на релсите, които да провеждат променливия ток на късо съединение, тук не е съобразяван с конкретното изпълнение на гара Нова Шипка преди и след реконструкцията ѝ. В открит път с един (или два) коловоза, двете (или четирите) релси се свързват в паралел чрез груповите заземления.

Друга особеност на коловозното развитие е, че на фидерната зона на извод „Албена” принадлежат още две други гари, а също така и двупътни, и еднопътни участъци в открит път [5,6]:

- ТПС „Величково” и непосредствено до нея - гара „Величково” с 5 коловоза и дължина 1000 m;
- открит път с дължина 6 km и два коловоза до гара „Нова Шипка”;
- гара „Нова Шипка” (от шест на два коловоза) с дължина 1000 m;
- открит път с дължина 10 km и два коловоза до гара „Юнак”;
- гара „Юнак” със 7 коловоза, с дължина 1 km и с три гарови контактни мрежи в паралел;
- открит път с дължина 5 km и един коловоз до гара „Синдел”.



Фиг. 4. Електромагнитно поле на контактни мрежи в междугарие (два коловоза в открит път). Специфичният линеен импеданс е $z_{02} = 0.228 + j0.495 \Omega/\text{km}$



Фиг. 5. Електромагнитно поле в контактна мрежа в междугарие (един коловоз в открит път). Специфичният линеен импеданс е $z_{01} = 0.273 + j0.594 \Omega/\text{km}$

В табл. 1, в съответствие с фиг.2, 4 и 5, е показано количественото участие на импедансите на различните отсечки от фидерната зона Величково-Синдел преди редуцията на коловозното развитие. Прието е трите гари да имат еднакви линейни импеданси.

Таблица 1

Участък	Дължина на участъка	Обща дължина	Линеен импеданс на участъка	Импеданс на участъка	Общ импеданс
-	km	km	Ω/km	Ω	Ω
ТПС Величково –г. Величково	0	0	-	0	0
г. Величково	1	1	$0.222 + j0.440$ <i>фиг.2</i>	$0.222 + j0.440$	$0.222 + j0.440$
г.Величково - г.Нова Шипка	6	7	$0.228 + j0.495$ <i>фиг. 4</i>	$1,368 + j2.970$	$1.590 + j3.410$
г.Нова Шипка	1	8	$0.222 + j0.440$ <i>фиг.2</i>	$0.222 + j0.440$	$1.812 + j3.850$ $ Z = 4.255$
г.Нова Шипка - г.Юнак	10	18	$0.228 + j0.495$ <i>фиг. 4</i>	$2.280 + j4.950$	$4.092 + j8.800$
г.Юнак	1	19	$0.222 + j0.440$ <i>фиг.2</i>	$0.222 + j0.440$	$4.314 + j9.240$
г.Юнак - г.Синдел	4	23 $= l_{\max}$	$0.273 + j0.594$ <i>фиг. 5</i>	$1.092 + j2.376$	$5.406 + j11.616$ $= Z_{1\max}$

Средният линеен импеданс на цялата фидерна зона се намира от деленето на максималния общ импеданс $Z_{1\max}$ на максималната обща дължина $l_{\max}$:

$$z_{01} = \frac{5.406 + j11.616}{23} = 0.235 + j0.505 \Omega/\text{km} \quad |z_{01}| = 0.557 \Omega/\text{km} \quad (15)$$

В табл. 2, в съответствие с фиг.2, 3, 4 и 5, е показано количественото участие на импедансите във фидерната зона Величково-Синдел след редукцията на коловозното развитие.

Таблица 2

Участък	Дължина на участъка	Обща дължина	Линеен импеданс на участъка	Импеданс на участъка	Общ импеданс
-	km	km	Ω/km	Ω	Ω
ТПС Величково –г. Величково	0	0	-	0	0
г. Величково	1	1	$0.222 + j0.440$ <i>фиг.2</i>	$0.222 + j0.440$	$0.222 + j0.440$
г.Величково - г.Нова Шипка	6	7	$0.228 + j0.495$ <i>фиг. 4</i>	$1,368 + j2.970$	$1.590 + j3.410$
г.Нова Шипка	1	8	$0.279 + j0.573$ <i>фиг.3</i>	$0.279 + j0.573$	$1.869 + j3.983$ $ Z = 4.3997$
г.Нова Шипка - г.Юнак	10	18	$0.228 + j0.495$ <i>фиг. 4</i>	$2.280 + j4.950$	$4.149 + j8.933$
г.Юнак	1	19	$0.222 + j0.440$ <i>фиг.2</i>	$0.222 + j0.440$	$4.371 + j9.373$
г.Юнак - г.Синдел	4	23 $= l_{\max}$	$0.273 + j0.594$ <i>фиг. 5</i>	$1.092 + j2.376$	$5.463 + j11.749$ $= Z_{1\max}$

Новият среден линеен импеданс се намира от максималния общ импеданс в най-долната и най-дясна клетка на таблицата и максималната обща дължина:

$$z_{02} = \frac{5.463 + j11.749}{23} = 0.238 + j0.511 \Omega/\text{km} \quad |z_{02}| = 0.563 \Omega/\text{km} \quad (16)$$

Модулите на двата линейни импеданса (15) и (16) се различават помежду си незначително:

$$|z_{01}| = 0.557 \Omega/\text{km} \quad (17)$$

$$|z_{02}| = 0.563 \Omega/\text{km} \quad (18)$$

Късите съединения на осми километър, непосредствено след г. Нова Шипка, преди и след нейната реконструкция, се проявяват с импеданси $Z_1 = 1.812 + j3.850 \Omega$ и $Z_2 = 1.869 + j3.983 \Omega$, съгласно табл.1 и табл.2. Модулите на тези импеданси са, съответно, $|Z_1| = 4.2551 \Omega$ и $|Z_2| = 4,3997 \Omega$. От тези стойности, след делене на некоригирания в ЦУМКС линеен импеданс $|z_{01}|$ се получават разстояния до мястото на късо съединение преди реконструкцията

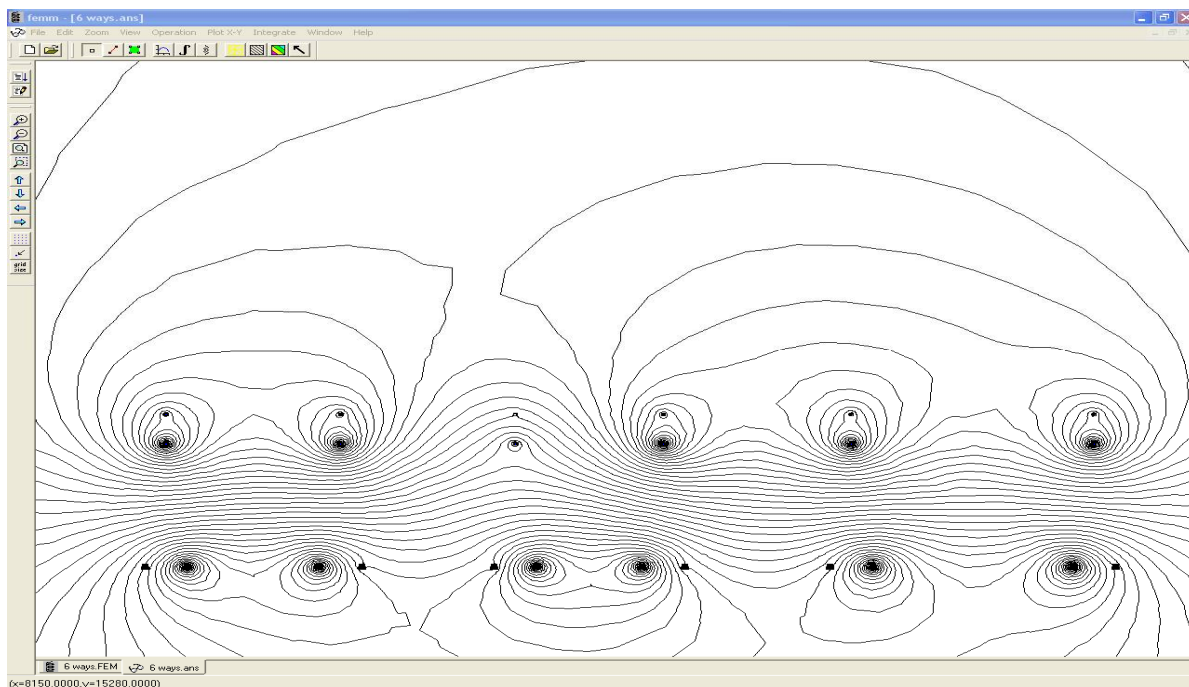
$$l_{kc1} = \frac{4.2551}{0.557} = 7.639 \text{ km} \quad (19)$$

и след нея

$$l_{kc2} = \frac{4.3997}{0.557} = 7.899 \text{ km} . \quad (20)$$

Ако се приеме за критерий разликите да имат допустима стойност от най-много 1000 m, т.е. равни на разрешаващата способност 1km на ЦУМКС, то тук разликата от 260 m между двата резултата (19) и (20) е сравнително малка и не налага пренастройване с новия линеен импеданс $0.563 \Omega/\text{km}$.

Представлява интерес и изкуствената ситуация, в която пет от шестте гарови коловозни контактни мрежи (преди реконструкцията на гарата) са били свързани в паралел – фиг. 6.



Фиг. 6. Електромагнитно поле на 5 (от всичко 6) гарови контактни мрежи, свързани в паралел. Специфичният линеен импеданс е $z_{05} = 0.065 + j0.149 \Omega/\text{km}$

Таблица 3

Участък	Дължина на участъка	Обща дължина	Линеен импеданс на участъка	Импеданс на участъка	Общ импеданс
-	km	km	Ω/km	Ω	Ω
ТПС Величково – г. Величково	0	0	-	0	0
г. Величково	1	1	$0.222 + j0.440$ <i>фиг.2</i>	$0.222 + j0.440$	$0.222 + j0.440$
г.Величково - г.Нова Шипка	6	7	$0.228 + j0.495$ <i>фиг. 4</i>	$1,368 + j2.970$	$1.590 + j3.410$
г.Нова Шипка	1	8	$0.065 + j0.149$ <i>фиг.6</i>	$0.065 + j0.149$	$1.655 + j3.559$ $ Z = 3.925$
г.Нова Шипка - г.Юнак	10	18	$0.228 + j0.495$ <i>фиг. 4</i>	$2.280 + j4.950$	$3.935 + j8.509$
г.Юнак	1	19	$0.222 + j0.440$ <i>фиг.2</i>	$0.222 + j0.440$	$4.157 + j8.949$
г.Юнак - г.Синдел	4	23 $= l_{max}$	$0.273 + j0.594$ <i>фиг. 5</i>	$1.092 + j2.376$	$5.249 + j11.325$ $= Z_{1max}$

Модулът на максималния импеданс Z_{1max} е $|Z_{1max}| = 12.4823 \Omega$. От предположението, че с него е определян линейния импеданс z_{05} преди преустройството

$$z_{05} = \frac{|Z_{1\max}|}{I_{\max}} = \frac{12.4823}{23} = 0.5427 \Omega/\text{km}, \quad (21)$$

и след това именно той е заложен в ЦУМКС, то преди реконструкцията късото съединение в края на гара Нова Шипка (8km) ще бъде изчислено и показано на разстояние

$$l_{kc1} = \frac{3.9250}{0.5427} = 7.232 \text{ km}, \quad (22)$$

а след реконструкцията:

$$l_{kc2} = \frac{4.3997}{0.5427} = 8.107 \text{ km}. \quad (23)$$

Разликата от 875 m между двата резултата от (23) и от (22) е по-малка от наложеното по-горе ограничение от 1000m. Разликата между показанието 8.107 в (23) и мястото на късо съединение (8-ми километър) е още по-малка, така че и в този случай не е необходимо да се прави пренастройка на ЦУМКС.

4. Заключение

Определени са по изчислителен път специфични линейни импеданси на включена във фидерна зона малка гара преди и след редуцията на коловозното ѝ развитие, изчислени са количествените им участия в общия импеданс на цялата фидерна зона, въведен е критерий за оценка на необходимостта от пренастройка на цифровите указатели на мястото на късо съединение.

Незначителните отклонения на показанията на ЦУМКС спрямо зададеното разстояние до най-чувствителното за грешки място на късо съединение са доказателство, че при редуция на коловозното развитие на малки гари не се налага промяна в настройките им.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Матов, П., Ив.Ангелов, Цифров указател на мястото на късо съединение – ЦУМКС-2, сп.”Железопътен транспорт” №3, стр.36-38, София, 1996г.
- [2] FEMM 4.2, 02Nov2009, David Meeker, dmeeker@ieee.org
- [3] Йорданов, С., Гара Нова Шипка – коловозно развитие, Железопътна секция Варна, 2009г.
- [4] Христов, Хр., Електрически централизации, Техника, София, 1978г.
- [5] ДП НК”ЖИ”, Karta.dwg, VIII.2009, За служебно ползване.
- [6] ДП НК”ЖИ”, Технически таблици и нормативи, Приложение към книжка-разписания 14.12.2008-12.12.2009, София, За служебно ползване.

Автори: Петър Матов, д-р, доцент, Георги Георгиев, бакалавър инж., кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ПЛОСЪК СПИРАЛОВИДЕН ВИХРОВОТОКОВ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ С НЕФЕРОМАГНИТНА СРЕДА

Стефан Стайков, Ивайло Долапчиев

Резюме. Тази работа представя резултатите от изследване на взаимодействието на електромагнитно поле на нов тип вихротоков преобразувател (ВТП) с плоска неферомагнитна среда. Представени са измененията на компонентите на пълното съпротивление на преобразувателя в зависимост от специфичната проводимост на средата и наличието на повърхностни дефекти в нея. Резултатите от изследването са приложими за контрол на специфична проводимост за целите на дефектоскопията.

STUDY ON THE INTERACTION OF FLAT SPIRAL EDDY CURRENT TESTING PROBE AND NONFERROMAGNETIC MEDIUM

Stefan Staykov, Ivailo Dolapchiev

Abstract. This work presents the results from investigation on the interaction of the electromagnetic field of a novel eddy current testing probe and flat non-ferromagnetic mediums. The changes in probes impedance components are presented in respect to conductivity of the mediums and the presence of surface cracks in tested specimens. The presented results are applicable in nondestructive determination of material conductivity in the field of electromagnetic NDT.

1. Увод

Електромагнитния вихротоков контрол на проводящи среди е базиран на определяне промяната на параметрите на преобразувателя (ВТП) под влияние на вихровите токове индуктирани в средите, вследствие на проникването в тях на променливо електромагнитно поле създадено от преобразувателя. Реакцията на вихровите токове променя параметрите на ВТП. Промяната зависи от електрофизичните свойства на обекта и от наличието на дефекти от различен тип в неговата структура.

Освен класическите ВТП с концентрирани намотки се разработват нови типове ВТП, базирани на съвременни тънкослойни технологии, които се използват при създаването на тънкослойни трансформатори [1,2,3]. Последните са изследвани аналитично в [4], където са представени формули за изчисляване на пълното им съпротивление. Тези трансформатори използват високочестотни електромагнитни полета, което ги прави приложими главно в микроелектрониката при разработване на нови източници на захранване.

Целта на настоящата работа е да бъде изследван ВТП с една спираловидна намотка, която е разположена в една равнина и се захранва с ток с относително ниска честота (до няколко kHz). Изследването е направено по числен път чрез метода на крайните елементи [5], а резултатите са представени като абсолютни стойности на активното съпротивление и индуктивността на ВТП

2. Числен анализ на ВТП

За изследванията е използван ВТП с 20 навивки, вътрешен радиус $r_1=5mm$, външен радиус $r_2=34.5mm$ и ефективна стойност на захранващия източник на ток $I=10mA$. Влиянието на специфичната проводимост σ на плоска неферомагнитна среда върху параметрите на допиращ ВТП е определено при захранването му с променлив ток с честота $f = 1, 2, 5, 10, 20$ и $50kHz$. Използваните стойности на проводимостта на средата σ са: $\sigma = 10, 20, 30, 40, 50$ и $60 MS/m$. Параметрите на ВТП – съпротивление и индуктивност са определяни с помощта на програмния продукт FEMM [5] посредством енергията на електромагнитното поле $\tilde{W}_m$ и формулите:

$$R = -\frac{\omega}{I^2} \text{Im}(\tilde{W}_m) \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{I^2} \text{Re}(\tilde{W}_m) \quad (2)$$

където I е ефективната стойност на тока а ω е кръговата му честота. Резултатите от числения анализ са представени в Таблица 1, а на фиг. 1 са показани графично зависимостите $R=f(L)$ съобразно възприетия начина на представянето им във вихровотоковия контрол.

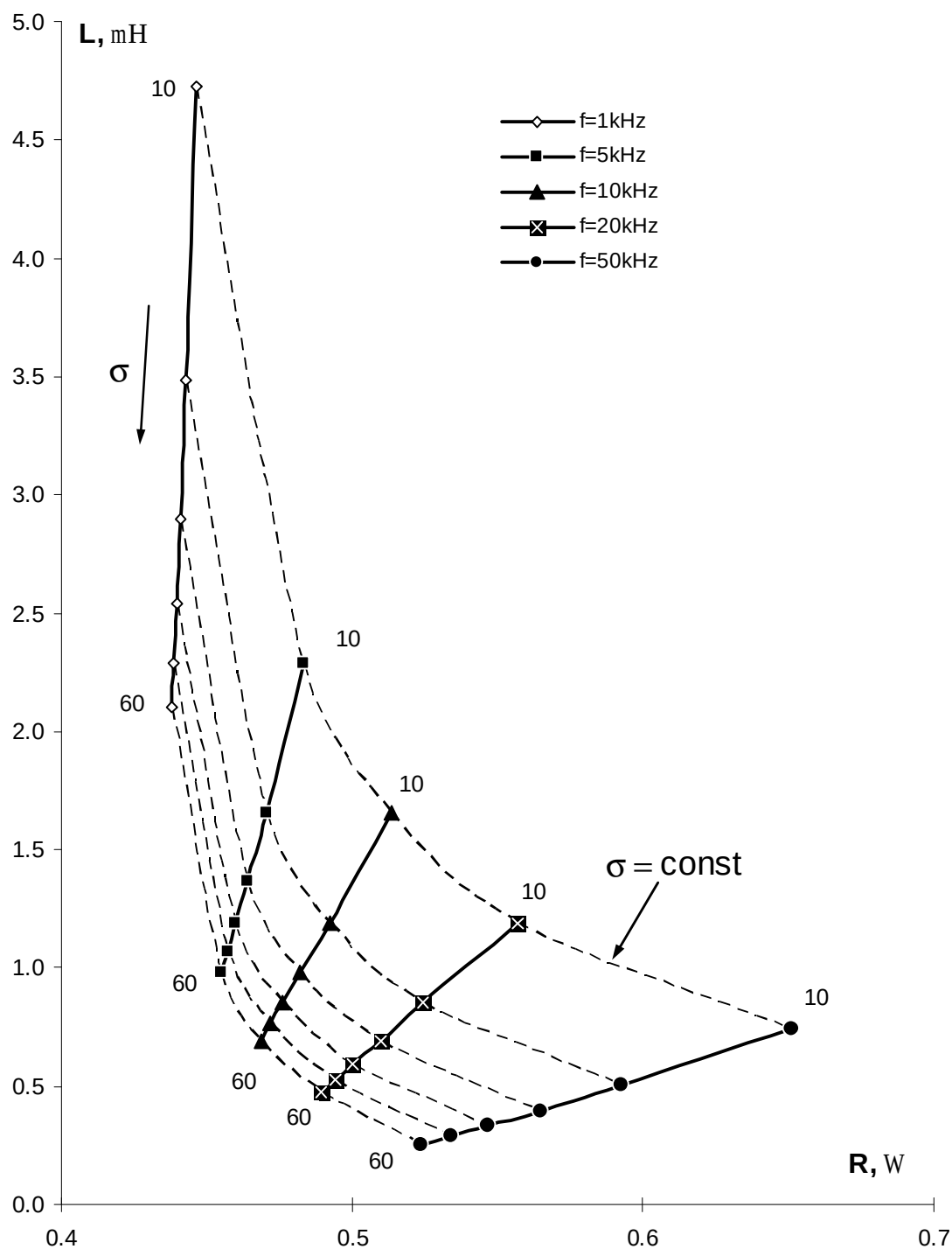
Таблица 1

	$f = 1 \text{ kHz}$		$f = 5 \text{ kHz}$		$f = 10 \text{ kHz}$		$f = 20 \text{ kHz}$		$f = 50 \text{ kHz}$	
σ	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
MS/m	Ω	μH	Ω	μH	Ω	μH	Ω	μH	Ω	μH
10	0.446	4.726	0.484	2.289	0.513	1.656	0.557	1.192	0.651	0.740
20	0.443	3.484	0.471	1.656	0.492	1.192	0.525	0.851	0.593	0.504
30	0.441	2.899	0.464	1.367	0.482	0.981	0.510	0.694	0.565	0.397
40	0.440	2.539	0.460	1.192	0.476	0.851	0.501	0.597	0.547	0.331
50	0.439	2.290	0.457	1.071	0.472	0.762	0.494	0.528	0.534	0.287
60	0.438	2.104	0.455	0.981	0.469	0.690	0.489	0.477	0.524	0.255

Изследването на възможностите на ВТП за откриване на повърхностни дефекти в неферомагнитни среди е проведено при проводимост на основата $\sigma_{\text{осн}} = 25MS/m$ и честота $f = 10kHz$. Наличието на дефекти, се моделира чрез участващи от средата с нулева проводимост и размери: широчина – $0.2mm$ и

дълбочина 5мм. Дефектите са концентрични и са разположени непосредствено под нечетен брой навивки на ВТП. Изчислените с (1) и (2) параметри на ВТП се нормират посредством чрез (3), където R_0 и L_0 са параметрите на ВТП при липса на дефект в средата:

$$R^* = \frac{R}{R_0}, \quad L^* = \frac{L}{L_0} \quad (3)$$



Фиг. 1. Влияние на σ върху параметрите на изследвания ВТП

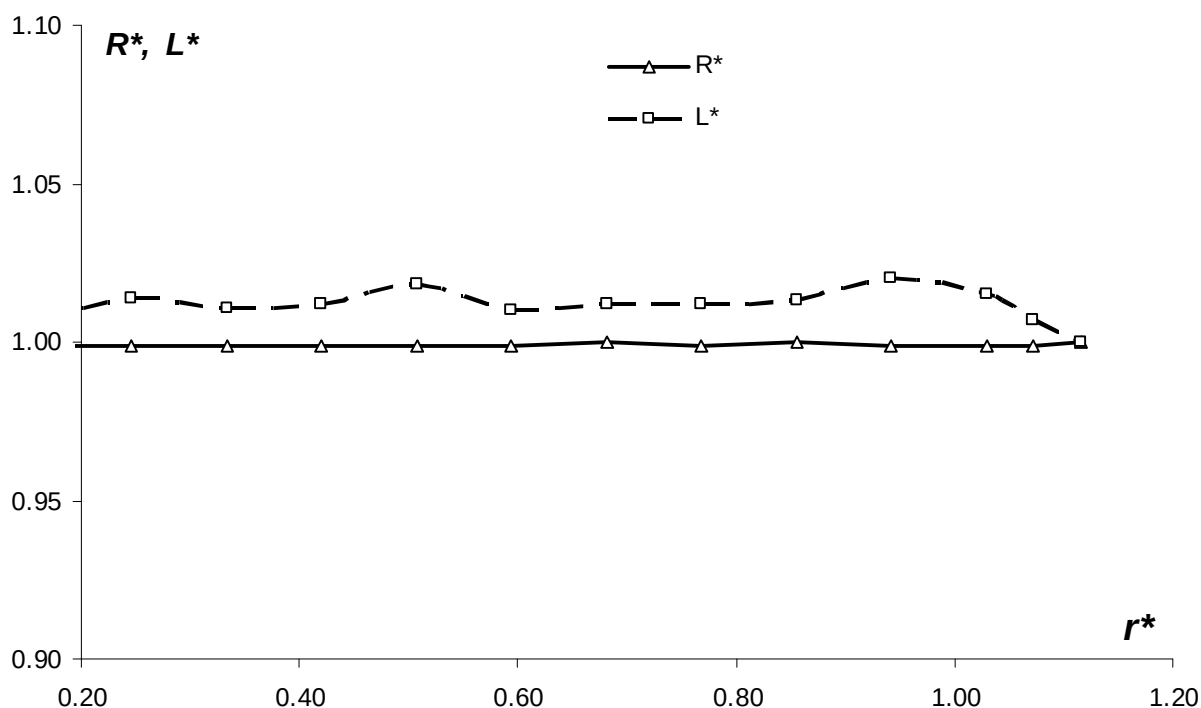
Относителното разположение на дефект с радиус $r_{ДЕФ}$ се нормира чрез (4) спрямо външния радиус на преобразувателя - r_2 :

$$r^* = \frac{r_{ДЕФ}}{r_2} \quad (4)$$

Този подход позволява определянето на влиянието на дефектите върху параметрите на ВТП. Резултатите от изследването са представени в таблица 2, а на фиг. 2 са показани графическите зависимости $R^*=f(r^*)$ и $L^*=f(r^*)$. Следва да се отбележи че последните три резултата в таблицата са полагани когато дефекта е разположен извън външния радиус на ВТП.

Таблица 2

r^*	0.160	0.246	0.333	0.420	0.507	0.594	0.681	0.768	0.855	0.942	1.029	1.072	1.116
R^*	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	0.999	1.000	0.999	0.999	0.999	1.000
L^*	1.007	1.014	1.011	1.012	1.018	1.010	1.012	1.012	1.013	1.020	1.015	1.007	1.000



Фиг. 2. Влияние на разположението на дефекта върху параметрите на ВТП

3. Анализ на получените резултати и изводи

Резултатите в таблица 1 и графичната им интерпретация на фиг. 1 позволяват да се направи заключението, че регистрираните абсолютни изменения на параметрите имат коренно различен характер от този на традиционните ВТП. При ниски честоти (от 1 до 5 kHz) се наблюдава, че измененията на проводимостта σ водят само до промяна на индуктивността на

преобразувателя, при това изменението е линейно. С увеличаването на честотата характеристиките стават нелинейни, което е характерно и за класическите ВТП.

Що се отнася до възможността плоския спираловиден ВТП да се използва за целите на дефектоскопията, то резултатите от таблица 2 и фиг. 2 еднозначно определят практически нулевата чувствителност на ВТП към повърхностни дефекти от типа използван в изследването, независимо от разположението му. Това определя този тип ВТП като неприложим в областта на вихровотоковата дефектоскопия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dowel, P. L., "Effect of Eddy Current in Transformer Windings", Proc. IEEE, vol.113, №8, Aug. 1966, pp.1387-1354.
- [2] Yamaguchi, K., Ohnuma S. et all, Mukhopadhyay S.C., Yamada S., and Iwandra M., "Characteristics of a Thin Film Microtransformer with Circular Spiral Coils", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 22, 1993, pp.2232-2237.
- [3] Yamada, S., Katou M., Iwandra M., and Daeson F.P., "Defect Images by Planar ECT Probe of Meander-mesh Coils", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol 32, №5, 1996, pp.4956-4958.
- [4] William, G. H., Duffy M.C., O'Reilly S. and O'Mathuna S., "Impedance Formulas for Planar Magnetic Structures with Spiral Windings", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, №2, 1999, pp.271-278.
- [5] Meeker, D., *Finite Element Method Magnetism*, v.3.4, *User's Manual*, 2002.

Автори: Стефан Стайков – доц. д-р, Ивайло Долапчиев - доц. д-р в кат. „Обща Електротехника”

ХОДОГРАФИ НА ПЛОСЪК СПИРАЛОВИДЕН ВИХРОВОТОКОВ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ

Стефан Стайков, Ивайло Долапчиев

Резюме. Тази работа представя резултатите от изследванията на взаимодействието на вихротоков преобразувател (ВТП) с плоска спираловидна намотка и неферомагнитна и феромагнитна среда. Резултатите са представени във вид на ходографи на внесените параметри на пълното съпротивление на преобразувателя. Анализът е проведен числено с прилагане на метода на крайните елементи. Установено е, че ходографите на този преобразувател се различават коренно от тези на класическите ВТП. Представените особености разкриват нови възможности за провеждане на безразрушителен контрол на проводящи среди.

IMPEDANCE PLANE DIAGRAM OF A FLAT SPIRAL EDDY CURRENT TESTING PROBE

Stefan Staykov, Ivailo Dolapchiev

Abstract. This work presents the results from the investigation on the interaction between a flat spiral eddy current testing probe and ferromagnetic and non-ferromagnetic specimens. The results are depicted as an impedance plane diagrams regarding to the relative values of probe's impedance components. The conducted numerical analysis is based on the application of the Finite Element Method. It is established that their diagrams are totally different in comparison to the diagrams of the classical probes. The presented peculiarities of these probes develop new potentialities in nondestructive testing of conductive materials.

1. Увод

Известните класически типове ВТП с концентрирани намотки, вече са с изчерпани възможности за събиране и анализ на информация за електрофизичните параметри на проводящите обекти и за откриване на повърхностни и подповърхностни дефекти в тях. Това налага създаването на такива типове ВТП, които да притежават нови качества различни от тези на класическите, с което да се разширят възможностите на електромагнитния вихротоков контрол и неговото приложение.

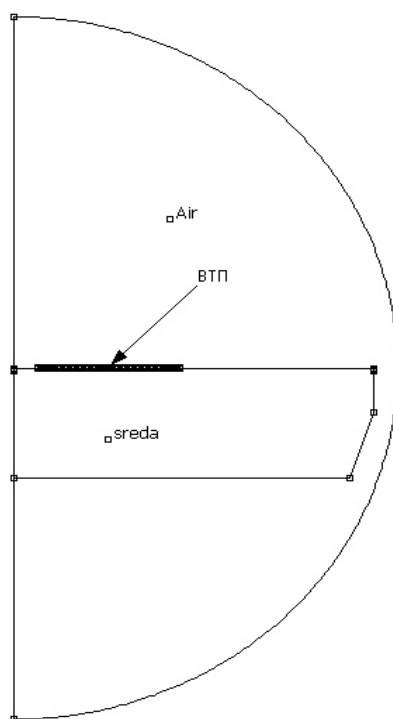
В литературата са известни изследвания на такива типове ВТП с плоски намотки [1,2] приложими за вихротоков контрол. В работа [3] са изложени възможностите на плоските ВТП, и там са изследвани приложенията им в различни области на контрола. Създавани са изчислителни модели на различни

типове плоски ВТП и е провеждан числен анализ на създаденото от тях електромагнитно поле, базиран на уравненията на Максвел. Представените в работата резултати се отнасят за честота на захранващите напрежения от стотици килохерца до десетки мегахерца. Тези резултати са приложими обаче главно за т.н. микро трансформатори за високи честоти, използвани в някои захранващи източници в микроелектрониката [4].

В настоящата работа, авторите представят резултатите от изследванията на взаимодействието на тези ВТП, с плоски неферромагнитни и ферромагнитни среди с различни електрофизични параметри. Проведения числен анализ позволява да се построят кривите на изменението на компонентите на тяхното пълно съпротивление (т.н. ходографи), при относително ниски честоти и промяна на някои от електрофизичните свойства на проводящите среди.

2. Числено определяне на ходографите

Определянето на внесените параметри на ВТП се базира на решаването на двумерна, ососиметрична квазистационарна полева задача. Решението е получено посредством прилагането на метода на крайните елементи и използването на програмния пакет FEMM v.3.4 [5]. На фиг. 1 е представена геометрията на използвания изчислителен модел, където анализираната област от пространството е с безкрайни граници. ВТП има параметри: вътрешен диаметър $d_1=10\text{mm}$, външен диаметър $d_2=75\text{mm}$ и дебелина на плоския проводник $\delta=0.1\text{mm}$. Броят на навивките в намотката е 20, ефективната стойност на тока в проводника е 10mA , а честотата му взема следните стойности: 1, 5, 10 и 20kHz .



Фиг. 1. Геометрия на изчислителния модел

ВТП преобразува консумираната енергия от източника $\tilde{W}$ на синусоидален ток в енергия на електромагнитното поле $\tilde{W}_m$

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{U} \tilde{I}^*}{j\omega} = \tilde{W}_m = \left(L - j \frac{R}{\omega} \right) I^2 \quad (1)$$

От израза за електромагнитна енергия $\tilde{W}_m$ се определят параметрите на пълното съпротивление на ВТП по формулите:
където I е ефективната стойност на тока през ВТП а ω е кръговата му честота.

$$R = -\frac{\omega}{I^2} \operatorname{Im} \left(\tilde{W}_m \right), \quad L = \frac{1}{I^2} \operatorname{Re} \left(\tilde{W}_m \right) \quad (2)$$

За да е възможно сравняването на получените резултати с тези на класическите ВТП, по формули (2) са изчислени внесените относителни активно R_{BH}^* и реактивно X_{BH}^* съпротивления:

$$R_{BH}^* = \frac{R - R_0}{X_0}, \quad X_{BH}^* = \frac{X - X_0}{X_0} \quad (3)$$

където R_0 и X_0 са параметрите на ВТП определени за същия изчислителен модел в който липсва проводяща среда.

А. Ходографи на плосък ВТП при неферромагнитна среда

Резултатите от численото решение на полевата задача, получени при поставяне на ВТП върху плоска неферромагнитна среда са представени в таблица 1. Специфичните проводимости на средите, за които е проведен анализа са: $\sigma = 10, 20, 30, 40, 50$ и 60 MS/m . За всяка среда анализа е проведен при честота на възбудителния ток $f = 1, 5, 10$ и 20 kHz . Наборът ходографи $R_{BH}^* = f(X_{BH}^*)$ при параметър σ е показан на *фиг.2*.

Б. Ходографи на плосък ВТП при ферромагнитна среда

Резултатите от численото решение на полевата задача, получени при поставяне на ВТП върху плоска ферромагнитна среда със специфична проводимост $\sigma = 8 \text{ MS/m}$ са представени в таблица 2. Относителната магнитна проницаемост на средите, за които е проведен анализа са: $\mu_r = 5, 10, 20, 50, 100$. Анализът е проведен при честота на възбудителния ток $f = 1, 5, 10$ и 20 kHz . Наборът ходографи $R_{BH}^* = f(X_{BH}^*)$ при параметър μ_r е показан на *фиг.3*.

3. Анализ на получените резултати и изводи

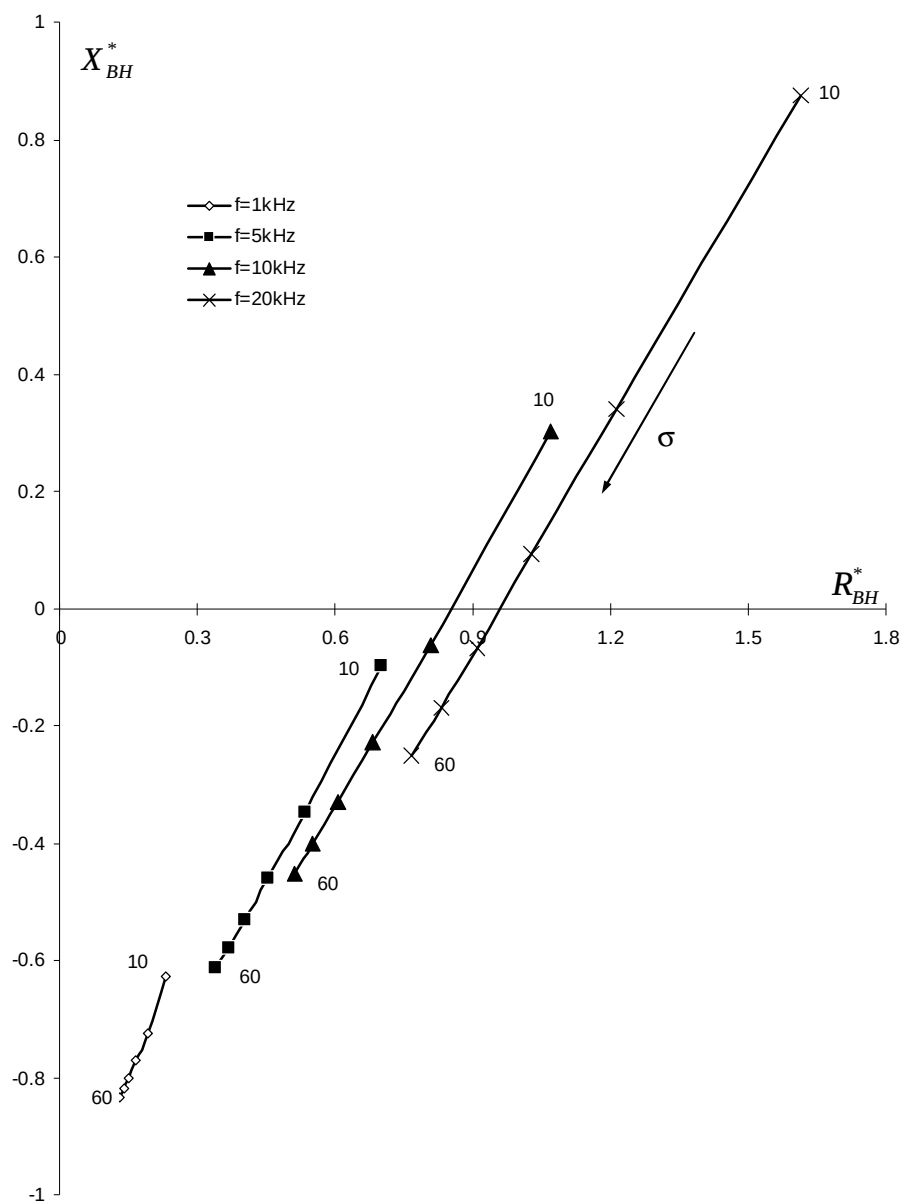
На базата на получените ходографи от фиг. 2 и фиг. 3 може да се направи сравнителен анализ между тях и ВТП от класическия тип [6]. Установява се, че общия характер на ходографите на плоския спираловиден ВТП се различава съществено от тези на класическите ВТП. Това се дължи главно на факта, че реакцията на вихровите токове в средата се възприема от всички навивки в намотката на ВТП, което повишава значително чувствителността на преобразувателя към електрофизичните свойства на изследвания обект.

Таблица 1

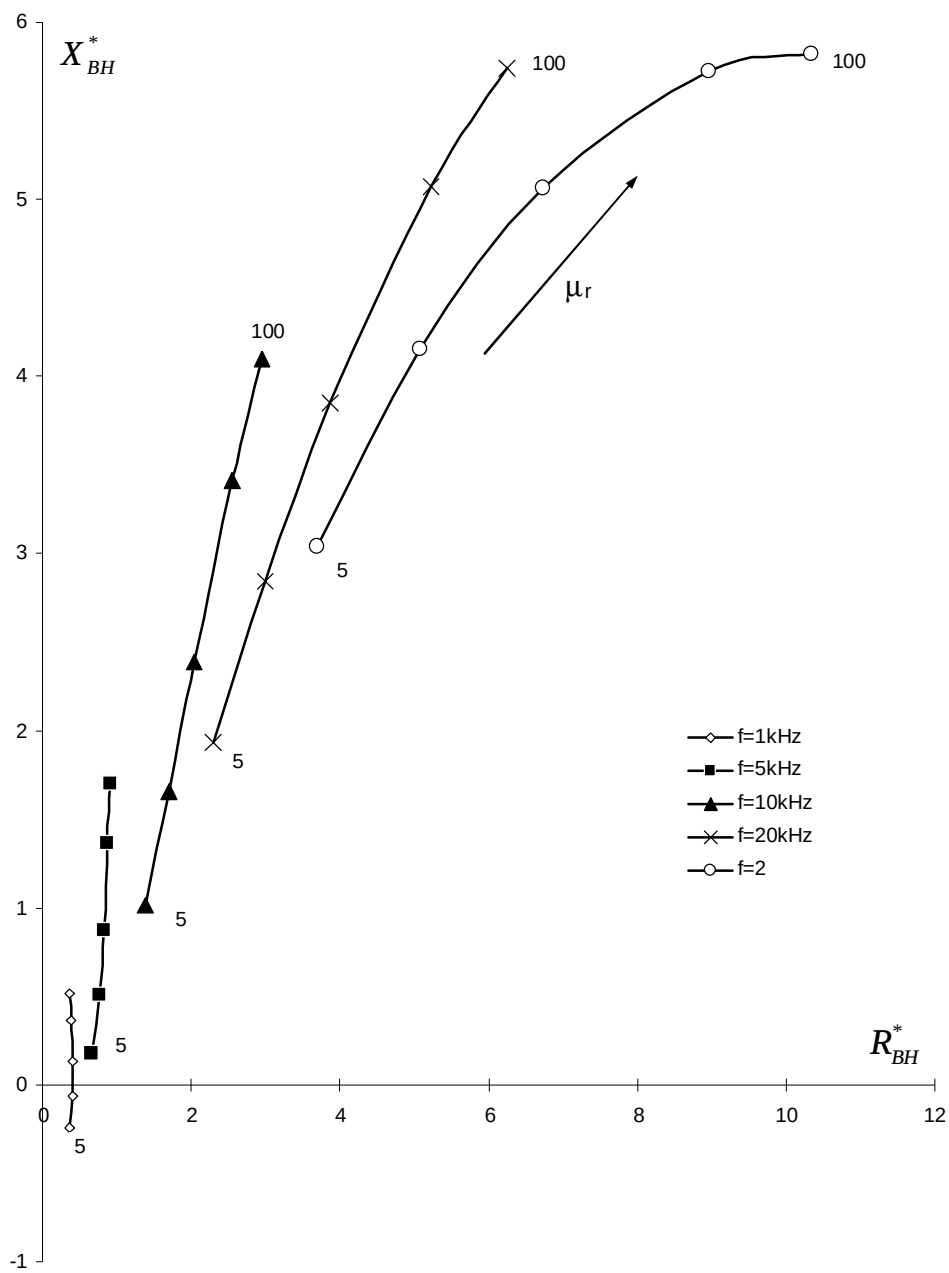
	$f = 1 \text{ kHz}$		$f = 5 \text{ kHz}$		$f = 10 \text{ kHz}$		$f = 20 \text{ kHz}$	
σ	R_{BH}^*	X_{BH}^*	R_{BH}^*	X_{BH}^*	R_{BH}^*	X_{BH}^*	R_{BH}^*	X_{BH}^*
MS/m	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.2320	-0.6273	0.7000	-0.0993	1.071	0.3028	1.6141	0.8750
20	0.1916	-0.7258	0.5347	-0.3481	0.8080	-0.0620	1.2122	0.3393
30	0.1678	-0.7719	0.4533	-0.4608	0.6825	-0.2279	1.0256	0.092
40	0.1515	-0.8002	0.4032	-0.5310	0.6061	-0.3300	0.9104	-0.068
50	0.1402	-0.8202	0.3682	-0.5785	0.5522	-0.4007	0.8302	-0.1690
60	0.1302	-0.8340	0.3406	-0.6136	0.5134	-0.4533	0.7676	-0.2504

Таблица 2

	$f = 1 \text{ kHz}$		$f = 2 \text{ kHz}$		$f = 5 \text{ kHz}$		$f = 10 \text{ kHz}$		$f = 20 \text{ kHz}$	
μ_r	R_{BH}^*	X_{BH}^*	R_{BH}^*	X_{BH}^*	R_{BH}^*	X_{BH}^*	R_{BH}^*	X_{BH}^*	R_{BH}^*	X_{BH}^*
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0.368	-0.244	0.668	0.176	1.376	1.018	2.287	1.932	3.706	3.038
10	0.394	-0.060	0.760	0.507	1.698	1.654	2.992	2.846	5.075	4.151
20	0.400	0.129	0.827	0.871	2.047	2.391	3.867	3.853	6.725	5.068
50	0.379	0.365	0.880	1.364	2.557	3.411	5.220	5.075	8.973	5.725
100	0.356	0.517	0.907	1.706	2.959	4.103	6.236	5.740	10.350	5.825



Фиг. 2. Влияние на σ върху параметрите на изследвания ВТП



Фиг. 3. Влияние на μ_r върху параметрите на изследвания ВТП

Изследваното взаимодействие на този тип ВТП с неферромагнитна среда показва че ходът на ходографа е много близък до линейната зависимост. Освен това изчислените стойности на внесените параметри се изменят в много широки граници - R_{BH}^* варира от 0 до 1.5, а X_{BH}^* се изменя от -0.7 до +1. Последното означава че внесената индуктивност сменя знака си. Това се наблюдава при честоти 10 и 20 kHz. Подобно явление е ново в практиката на вихровотоковия контрол и следва да бъде обект на следващи изследвания.

При изследването на неферромагнитна среда също така, се установяват резултати, различаващи се съществено от тези за класическите ВТП. Докато при класическите ВТП внесеното относително реактивно съпротивление X_{BH}^* се изменя от -1 до +1 то тук то варира от 0 до +5. Подобно изменение се наблюдава и при изменението на R_{BH}^* , което се променя от 0 до +10 и също при честоти от 10 и 20 kHz. Очевидно е, че преобразувателите от този тип притежават приблизително еднаква чувствителност, както по отношение на изменението на R_{BH}^* , така и по отношение на X_{BH}^* .

В резултат на изследването може да се направи извода, че плоските ВТП предвид повишената си чувствителност са приложими за контрол на специфична проводимост на неферромагнитни среди и на относителната магнитна проницаемост на ферромагнитни среди.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yamada, S., Katou M., Iwandra M., and Daeson F.P., "Eddy current testing probe composed on planar coils", IEEE Transactions on Magnetics, vol 31, №6, 1995, pp.3185-3187.
- [2] Mukhopadhyay, S. C., Yamada S., and Iwandra M., "Evaluation of near surface material properties using planar mesh type coils with post-processing from neural network model" International Journal on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VI), IOS Press, vol 23, 2002, pp.181-188.
- [3] Mukhopadhyay, S. C., "Novel high performance planar electromagnetic sensor", Ndt.net, Aug 2005, vol 10, №8.
- [4] Wong, F. U., Junwei L.U., "High Frequency Planar Transformer with Helical Winding Structure", IEEE Transactions on Magnetics, vol 36, №5, 2000.
- [5] Meeker, D., Finite Element Method Magnetics, v.3.4, User's Manual, 2002.
- [6] Цветков, Д. Н. и др., "Електромагнитна дефектометрия", Техника, София, 1981.

Автори: Стефан Стайков – доц. д-р, Ивайло Долапчиев - доц. д-р в кат. „Обща Електротехника”

ИЗМЕРВАНЕ НА ЧАСТИЧНИ РАЗРЯДИ С PDS100 ПРИ ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИЛОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Георги Щерев, Петър Манчев

***Резюме.** В доклада се разглежда и анализира връзката между частичните разряди и качеството на електроизолационните материали и системи. Измерването на частичните разряди позволява да се направи диагностика не само на диелектричните материали, но и на електрическите системи, намиращи се в експлоатация. От проведения анализ могат да се направят изводи за стареенето на електрическата изолация, което дава възможност да се прогнозира остатъчният живот на електросъоръженията.*

MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGES WITH PDS100 IN INVESTIGATION OF POWER TRANSFORMERS

Georgi Shterev, Petar Manchev

***Abstract.** In the present paper the connection between the partial discharges and the quality of the electrical insulation materials and systems is examined and analyzed. The measurement of the partial discharges allows diagnosing of not only dielectric materials but also of the working electrical systems. From the analysis, conclusions for the aging of electrical insulation can be made, which gives an opportunity to predict the remaining life of the electrical appliances.*

1. Въведение

Неплановите изключвания на силовите трансформатори оказват неблагоприятен икономически ефект върху работата на съоръженията от електрическата мрежа. Затова е необходимо да се направи точна диагностика за текущото състояние на конкретния трансформатор. Едновременно с нарастване на средния живот на трансформаторите въведени в експлоатация, нараства и необходимостта от измервателна информация за тяхното работно състояние. Съществуват различни методи (в това число и честотни), с и без изключване на трансформатора от напрежение, позволяващи да се извършва диагностика на трансформаторите в експлоатационни условия. Чрез тях се постига максимално ниво на работоспособност за трансформаторите и оптимизиране на средствата им за поддръжка.

Изпитване без изключване на трансформатора от напрежение може да се провежда за дълъг интервал от време, при това резултатите лесно могат да се архивират. Така се достига до анализиране на множество параметри на трансформатора, от които зависи неговата дълготрайност. Аналитичното

изследване и обработване на тези резултати позволява ранното откриване на повреди.

Другата група от методи – изпитване с изключване на напрежението се провеждат тогава, когато е наложително прекъсване на електрическото захранване, т.е. когато се провежда профилактичен ремонт или когато трансформаторът вече показва видими признаци за повреда.

2. Измерване на частични разряди без изключване на напрежението

През последните години се провеждат многократни изпитвания за частични разряди на устройства за високо напрежение. Тяхното развитие и усъвършенстване се осъществява от конструкторите, като се прилагат съществени подобрения в сензорните технологии, в измервателните методи, в създаването на множество нови алгоритми за обработка и оценка на резултатите от измерванията при частични разряди.

Все повече при съвременните методи за изследване на частични разряди в силовите трансформатори без изключване от напрежението, се прилагат акустични измервания, при които се използват специални сензори базирани на пиезоелектрическият ефект. Частичните разряди произвеждат електромагнитни емисии в обхвата от 10 MHz до 1500 MHz , в зависимост от изолационните средства.

Използването на тези методи води до локализиране на източника на частичен разряд, като понякога поради високото шумопоглъщане от изолацията на проводниците и от магнитопровода на трансформатора, чувствителността на метода не винаги е голяма.

Обикновено за изследванията по други методи на измерване са нужни множество от сензори, при което се усложнява измерването и последващото събиране и обработване на измервателната информация. Енергия на разряда не може да се определи точно, защото е почти невъзможно да е извършат калибрационни процедури. Поради тези причини електрическите измервания на частичен разряд са за предпочитане, тъй като позволяват това измерване на разрядите и в някои случаи локализируют частичния разряд.

Акустичните измервания на частични разряди могат да се разделят на две групи – *широко-* и *тясно- спектрни*. Тясно спектрните се характеризират с основна честота и тяхната честотна лента е между 9 и 30 kHz , докато широко спектрните имат честотен спектър между 100 и 1000 MHz . Тясно спектрните измервания, благодарение на основната си честота, позволяват изчистване на шума, но често е нужно да се избере основна честота от няколко мегагерца, за да има по-добро филтриране на шума. В *IEC 60270* е регламентирана максимална основна честота от 1 MHz .

Измерването във високочестотния обхват позволява да се направи извод единствено за това, че има частични разряди, но не и за техния конкретен заряд, защото при високи честоти няма достатъчна точност (за обхват от 50 MHz до

1000 MHz, точността на излъчваната честота е ± 100 KHz) Локализирането на частичния разряд, както и характеристиката за типа на частичния разряд, базирана на оценката на така наречения φ -q-n модел или t-q-n модел е трудно и може да бъде направено само от специалист с богат опит в тази област. Затова и широкообхватните измервания на частичен разряд са за предпочитане при изпитване без изключване на съоръжението от напрежение. Изследванията са показали, че честотата от около 10 MHz е подходяща за локализиране на източници на частичен разряд, използвайки методи за разпознаване на конкретния модел на поведение на разряда. Този честотен обхват е дефиниран като ултра- висок честотен обхват, което е и практически метод при откриване на частични разряди. Използвайки метода с ултра- висок честотен обхват, сигналите за честотен разряд могат да бъдат разпознати с намотки на Роговски, монтирани на шиносъединителните прекъсвачи; капацитивни делители или измервателни стъпала, обикновено интегрирани в прекъсвачите.

При извършване на широкоспектърни измервания в близост до трансформатора (на място), влияние върху измерването оказват много външни фактори. Затова е необходимо те да се изчистят, чрез използване на различни програмни средства, изпълняващи ролята на филтър в алгоритмите.

RFS (сканирането на честотите) улавя и обработва главно нивото на електромагнитните сигнали, излъчени в някаква честотна лента и ги обединява в пълна картина за избрания честотен обхват. Тази информация се използва за определяне наличието на частичен разряд и за това в каква среда съществува той.

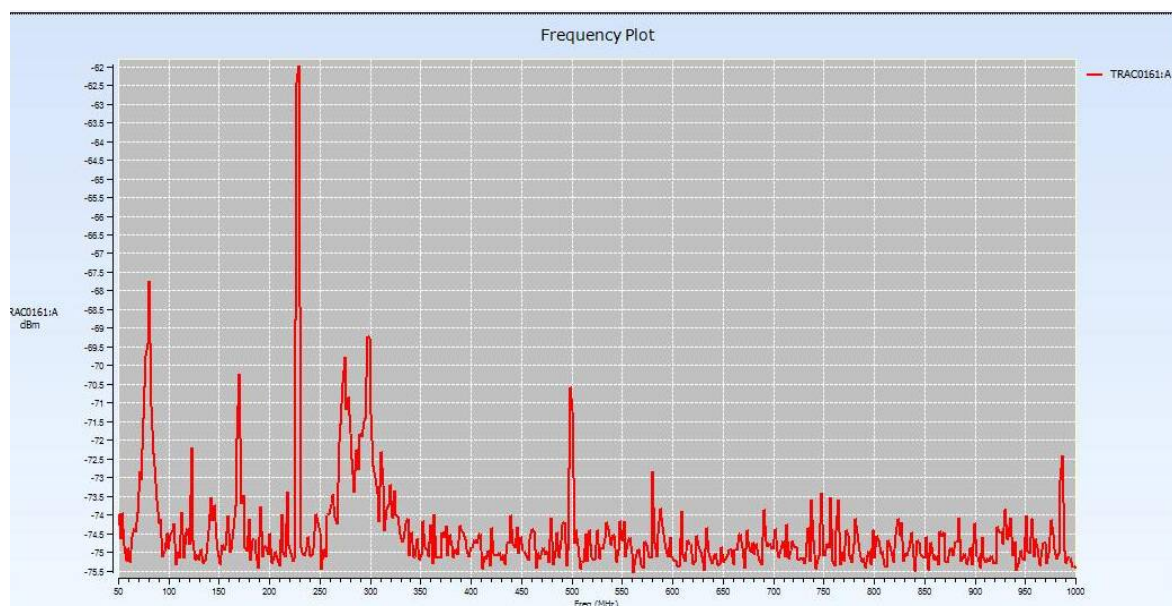
В следващите редове е описан опита на авторите при използването на честотен метод за измерване на частичен разряд с уреда PDS 100 (*Partial Discharge Surveyor User Guide*). Прилагането на този честотен метод с посочения уред позволява да се откриват и регистрират частични разряди за максимални разстояния до 6 m от обекта на изследване.



Фиг. 1

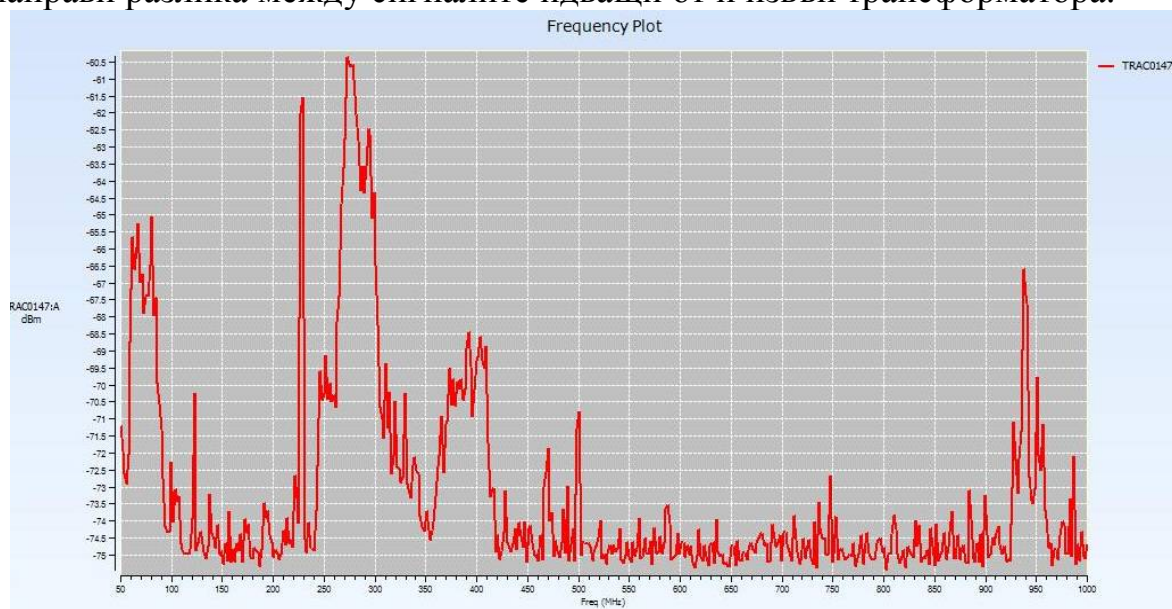
На фиг. 1 . е показан външния вид на уреда PDS 100. Той е преносим и използва високочестотен метод за сканиране на честотните излъчвания от повечето компоненти в една подстанция. Неговото предназначение е да улавя и обработва електромагнитните сигнали излъчвани от частичните разряди.

На фиг. 2 е показана базовата линия за изпитване на трансформатор под напрежение. В текущия случай измерването е направено на входно работно напрежение 20KV и е записано в обхвата от 50 MHz до 1000 MHz.



Фиг. 2

Програмно в уреда са подтиснати периодичните импулсни шумове, което е извършено например с адаптивни корелационни алгоритми или филтри за отрязване на честотни диапазони. Полученият сигнал съдържа единствено сигнали на частични разряди и импулси имащи стохастичен характер, причинени от явлението „корона“ (за интервала $50\text{ MHz} \div 250\text{ MHz}$) Поради това, че тези сигнали много си приличат, е трудно те да бъдат разделени, затова много често се използват разпознаващи методи и тогава ясно може да се направи разлика между сигналите идващи от и извън трансформатора.

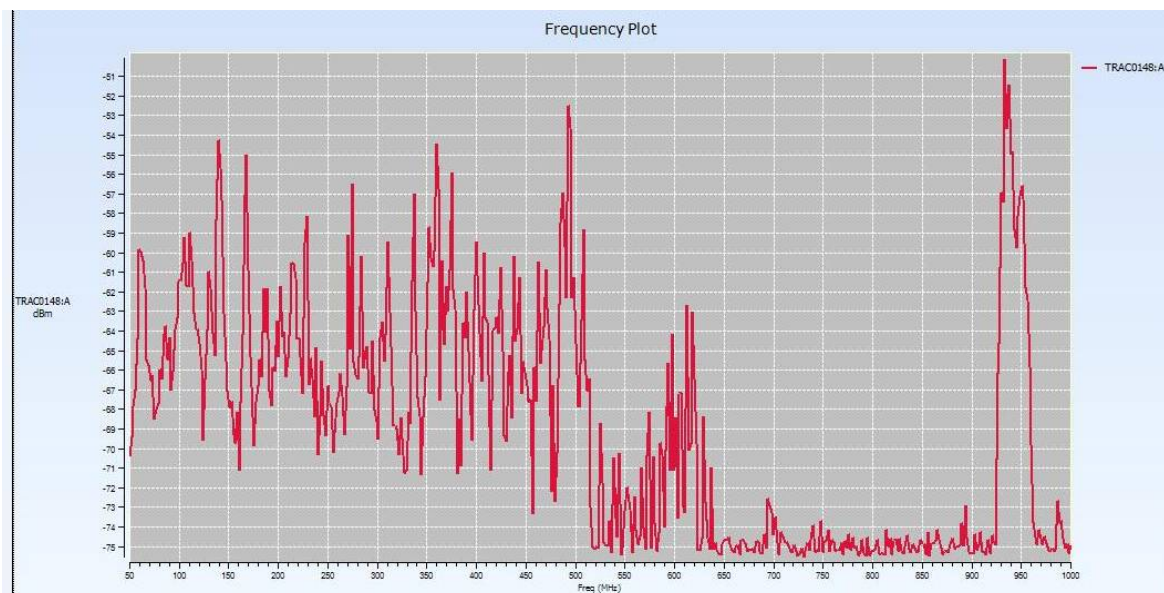


Фиг. 3. Базова линия 2

На фиг. 3 е показана друга базова линия, която за честота над 400 MHz има чисто ниво на шума.

На фиг. 4 е показано измерване на 20 KV трансформатор под напрежение с условното наименование „Обект 1“. Височината на амплитудата, широчината на сигналите, повдигането на излъчванията (за интервала $50\text{ MHz} \div 510\text{ MHz}$) дават основания за безпокойство, тъй като това е признак за

предстояща повреда. Действително, след три месеца непрекъсната работа, този трансформатор бе подменен от поддържащия персонал.



Фиг. 4. Обект 1

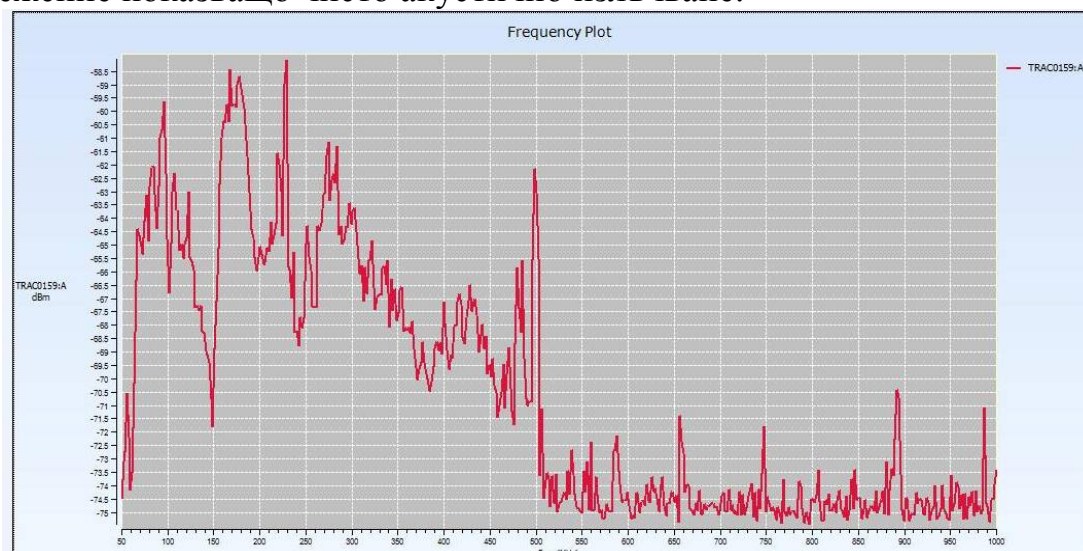
На фиг. 5 и фиг. 6 са показани графиките на два 20 KV трансформатора под напрежение с условното наименование „Обект 2” и „Обект 3”. По-неблагоприятен режим на работа е трансформаторът от „Обект 3”.

На фиг. 7 е показана графиката на „Обект 4” (ОРУ 220 KV). Този трансформатор дефектира във фаза А и беше подменен с друг. За големината на пораженията от настъпилото събитие има и снимков материал.

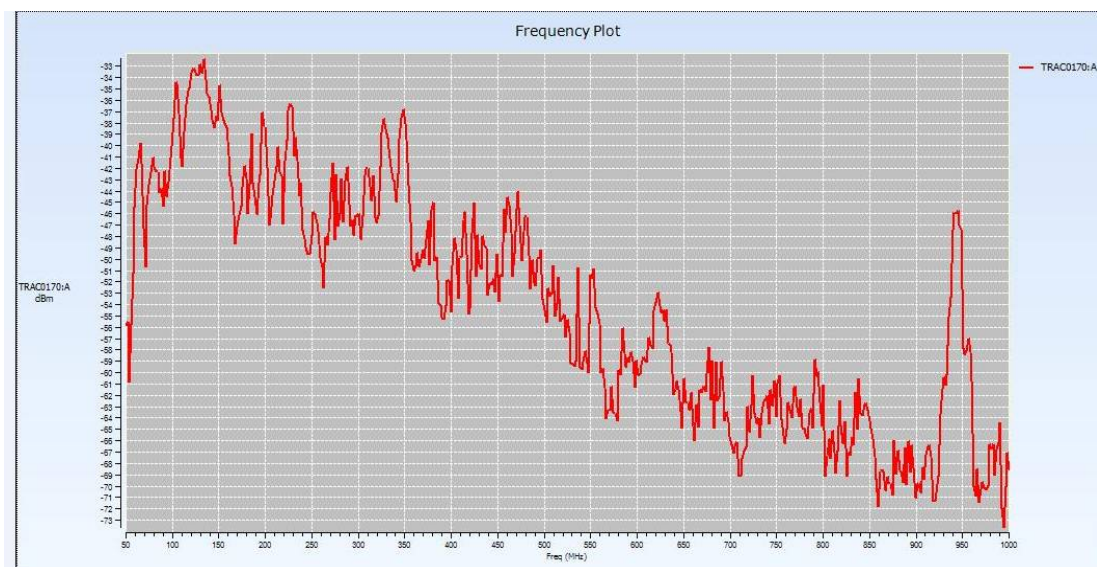
На фиг. 8 е показана графиката на „Обект 5” (ОРУ 220 KV). Случаят е подобен на „Обект 4”.

На фиг. 9 е показано измерване на „Обект 6” ОРУ 400KV под напрежение. Пиковите импулси са от стохастични изменения и не регистрират частичен разряд.

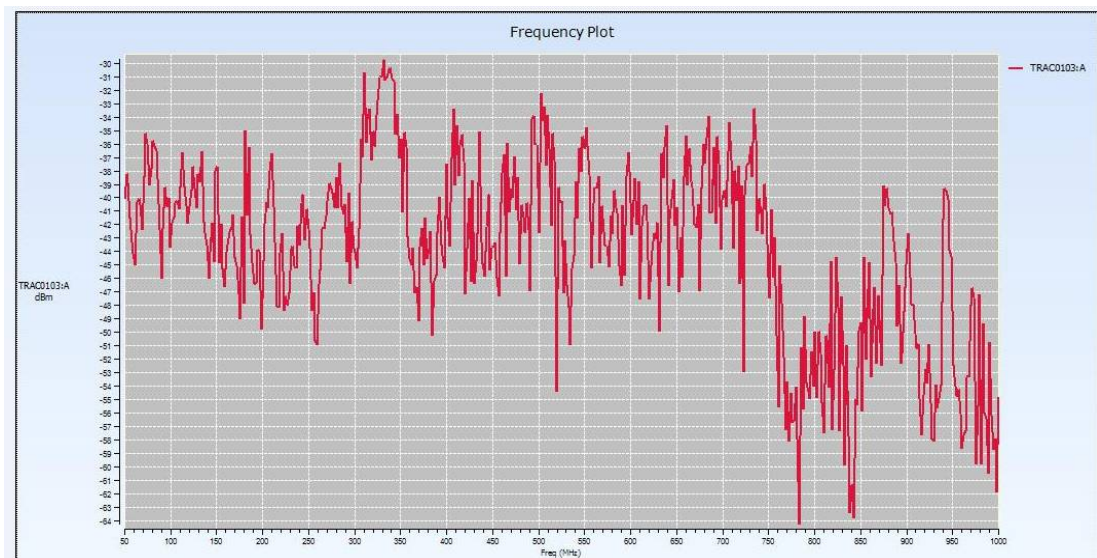
На фиг. 10 е показано измерване на „Обект 7” ОРУ 110 KV под напрежение показващо чисто акустично излъчване.



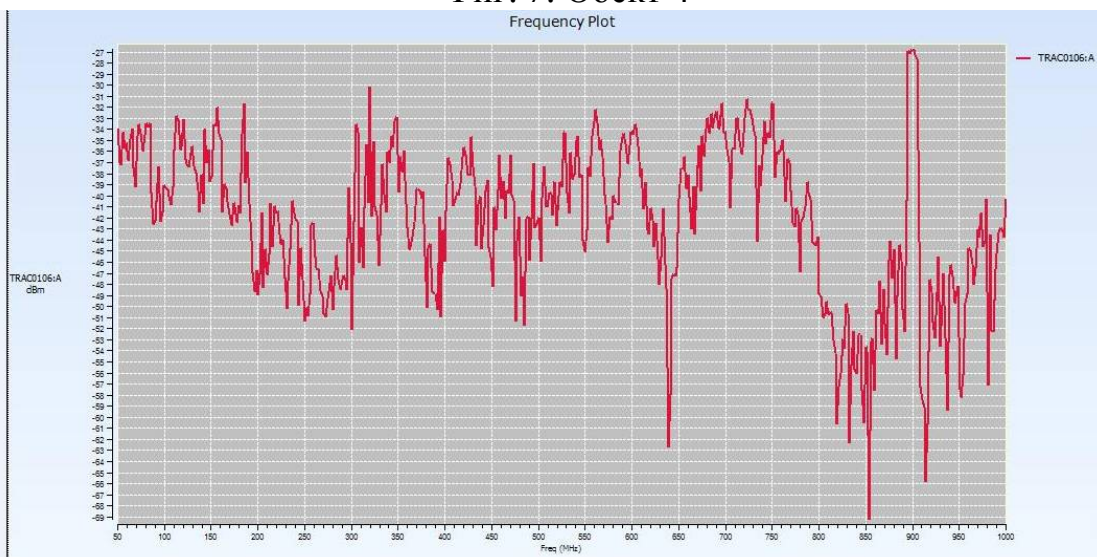
Фиг. 5. Обект 2



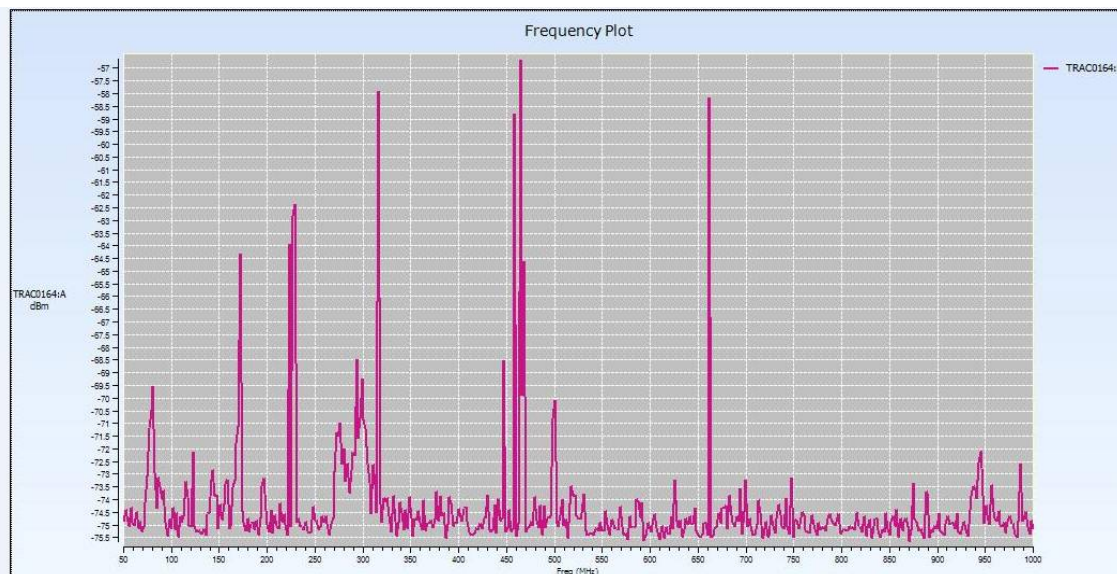
Фиг. 6. Объект 3



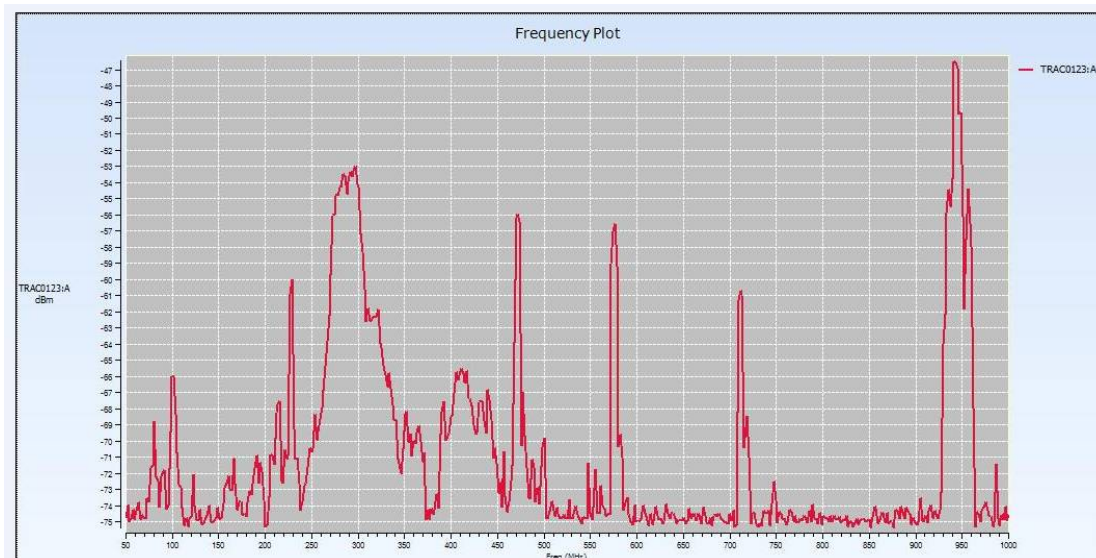
Фиг. 7. Объект 4



Фиг. 8. Объект 5



Фиг. 9. Обект 6



Фиг. 10. Обект 7

В края на краищата от целия обхват ($50 \text{ MHz} \div 1000 \text{ MHz}$) остават единствено частичните разряди. Тези сигнали могат да бъдат оценявани чрез използването на различни модели за разпознаване с цел установяване на техния произход. Тази фаза обаче се провежда при отсъствие на напрежение, понеже в анализа на данните влизат много и различни фактори.

3. Диагностика, посредством комбиниране на методи за измерване на характеристиката на изолацията в процеса на експлоатация с и без изключване на съоръжението от напрежение

Количеството измервателна информация получено при изпитване без изключване на напрежението се увеличава многократно. Актуален е въпроса как да се интегрира информацията получена при мониторинга в процеса на планов ремонт на трансформатора. Комбинацията от резултати с и без изключване на трансформатора от напрежение е много мощно средство за

икономически обоснован и пълен анализ на състоянието на трансформатора. Допълнителната информация получена при изпитвания, когато съоръжението не е под напрежение, след откриване на аномално състояние, е информация която си струва да бъде анализирана. Когато става въпрос за откриване на частични разряди с изключване на съоръжението от напрежение, те могат да се направят по същите методи, както и без изключване на напрежението, но е по-трудно поради разликата в измервателната техника при определяне на заряда на частичния разряд. Това изпитване се провежда в добре контролирана системна среда, използвайки методи като многоканални записващи устройства за частични разряди и

Изпитванията с изключване на напрежението предоставят мощен инструмент, позволяващ получаване на допълнителна информация за състоянието на трансформатора, която досега не е възможно да бъде интегрирана в система за контрол без изключване на напрежението при изпълнение на критериите за стабилност, надеждност и ефективност на разходите.

4. Заключение

I. Опитът на авторите показва, че честотният метод *RFS* и *PDS 100* уреда предлагат няколко основни предимства:

- Бързо, лесно и евтино (без консумативи) използване на уреда;
- Добра чувствителност за откриване на активността (енергията) на частичния разряд;
- Освобождаване от външни шумове (филтриране), чрез установяване (определяне) на основните линии (нива) и чрез програмно заложили филтри;
- Определяне на риска, базиращ се на нивото и честотата на активността на частичния разряд (*PD activity*);
- Локализиране на частичните разряди чрез проучване (изследване);
- Уредът *PDS 100* е и средство за проверка на безопасност за оперативния персонал при влизане в работната област на трансформатора;
- Резултатите от уреда могат да бъдат използвани и при вземане на решения, съвместно с резултатите от предишни изследвания.

II. Изследването на състоянието на трансформатори в експлоатация, при комбинирано използване на методи с и без изключване на напрежението, значително намалява риска от големи повреди. По този начин се осигурява надеждна работа на захранването, при оптимално използване на активната част.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ръководство за работа с уред за откриване на частичен разряд – *Partial Discharge Surveyor Guide 100*, Doble, 2010.

- [2] Костов, М., Измерване на характеристиките на електрическата изолация в експлоатационни условия, С., 2009.
- [3] Ahmed, N. H. and N. N. Srinivas, Detroit Edison Company, „On-Line Partial Discharge Detection In Transformers”, „Electricity Today Magazine”; volume 21, No. 2, March 2009.
- [4] FISO Technologies, Inc., An Overview of Fico’s Fiber Optic direct Winding Temperature Measurement System For High Voltage Transformers, 2009.
- [5] Glodjo, Ah., Ron Mueller, Michael Brown, Sharon Walsh, Use of Fiber Optic in Transformers, Field Experience With Multipoint Internal Temperature Measurements Of Converter Transformers, 2004.
- [6] Pudlo, G., S. Tenbohlen, M. Linders, G. Krost, Member, IEEE; IEEE/PES Transmission and Distribution Conference 2002.
- [7] Yokohama, Integration of Power Transformer Monitoring and Overload Calculation into the Power System Control Surface, 2002.
- [8] Tenbohlen, S., D. Uhde, J. Poittevin, ALSTOM T&D; U. Sundermann RWE Energie AG; Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On- and Off-line Methods: Results, Examples and Future Trends, 2000.

Автори: доц. д-р Георги Щерев – кат. „Електротехника”, ТУ-София, ф-л Пловдив, Петър Манчев - р-л отдел „Електроизмервателни уреди”, “Симак индустриал” ЕООД

ХАРДУЕРНА РЕАЛИЗАЦИЯ НА ИМПЕДАНСНО РЕЛЕ ЗА ТЯГОВИ МРЕЖИ 25kV

Иван Ангелов

***Резюме.** Представено е хардуерно решение на цифрово импедансно реле за защита на изводите в тягови подстанции за променлив ток с работно напрежение 25kV.*

HARDWARE IMPLEMENTATION OF IMPEDANCE RELAY FOR TRACTION NETWORKS 25kV

Ivan Angelov

***Abstract.** Presented is a hardware solution for digital impedance relay to protect the outputs in traction substations for 25kV AC operating voltage.*

1. Въведение

В тяговите подстанции експлоатирани у нас като основен елемент на защитата се използва реле тип РТС. Използва се както за защита на изводите на ТПС, така и на прекъсвачите в СП. Релето РТС, в комбинация с реле за време, се задейства от различна големина на тока в зависимост от процентното съдържание на трети хармоник. Големите токове на късо съединение в се изключват от токова отсечка. При използване на времереле със зависимо от тока закъснение (РВТ), закъснението е в зависимост от големината на тока [1].

Трети хармоник в тока има при работата на токоизправителните електрически локомотиви. Вече в експлоатация у нас има по – съвременни електрически локомотиви с електронни преобразуватели, при които работният ток е почти синусоидален и няма висши хармоници. Без висши хармоници в тяговия ток релето РТС няма селективност при големи товарните токове. Налага се да се използва релейна защита, която да реагира на параметрите на тяговата мрежа и товара. Това са така наречените импедансни защиты.

Производителите на оборудване предлагат различни видове съвременни цифрови импедансни защиты. Например фирмата „Сименс“ има защита тип 7SA511 [2]. Или друга от фирмите „Арева“ – своето устройство за защита на тягови мрежи – MiCOM P438 [3].

Споменатите цифрови защиты са с много богати възможности. Много „интелигентни“, като, за тягови мрежи, могат да пазят и от откаляване (прегриване) на контактния проводник при големи товарни токове.

Ако искаме да използваме тези релета за модернизация на старите тягови подстанции има един съществен недостатък. Трябва да се подмени цялата

релейна защита за да се използват пълните възможности на тези цифрови защиты.

За модернизация на съществуващите тягови подстанции, с минимална преработка, е разработено цифрово импедансно реле за тягови прежи 25kV.

2. Блокова схема на импедансно реле

На фигура 1 е показана блоковата схема на импедансно реле за тягови мрежи 25kV.



Фиг. 1

Някои от използваните съкращения на фигура 1 са:

ADC – Аналого цифров преобразувател (АЦП). В случая е 10 битов АЦП вграден в микрокомпютъра;

RAM – част от оперативната памет на микрокомпютъра, за временно съхранение на данни измерени по време на аварийна ситуация;

EEPROM – енергонезависима памет за съхраняване на архив от аварийните събития. Допълнителна външна памет;

RTC – часовник за реално време, вграден в микрокомпютъра.

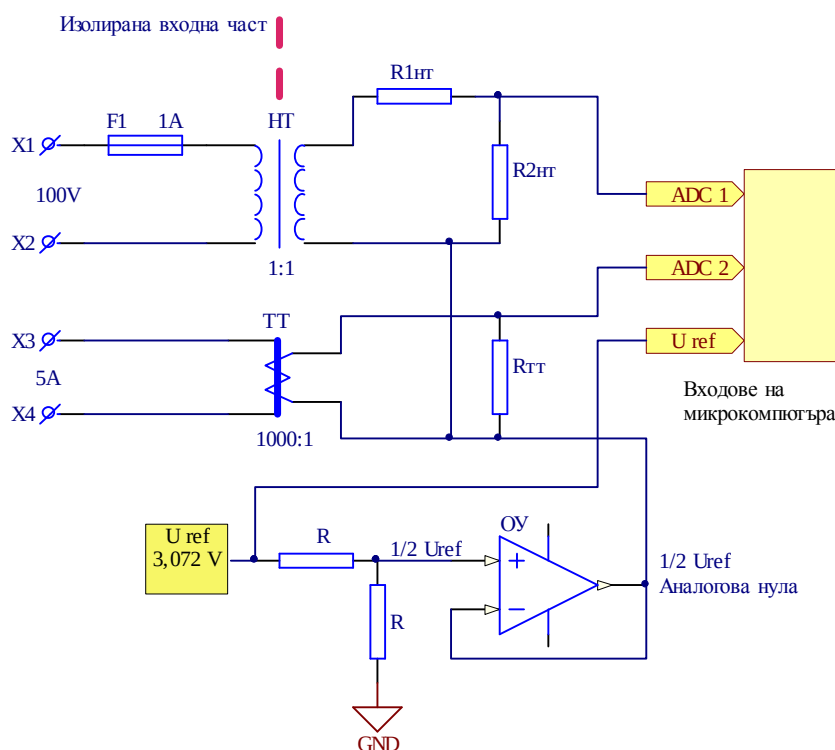
3. Входни вериги за измерване на U и I

Импедансното реле трябва да бъде свързвано към съществуващите токови и напреженови трансформатори в тяговите подстанции. Напреженов вход 100V и токов вход 5A. За галванично изолиране от входните вериги на токовия вход има токов трансформатор с преводно отношение 1000:1, а на напреженовия

вход трансформатор с преводно отношение 1:1. На фигура 2 е показана принципната схема на входните измервателни вериги.

Вграденият АЦП измерва еднополярни напрежения от 0 до опорното напрежение U_{ref} . Опорното напрежение може да бъде максимално 3.3V, колкото е захранващото напрежение на микрокомпютъра. При 10 битов АЦП имаме 1024 стъпки на преобразуване. Избрал съм на всяка стъпка АЦП да измерва по 3mV. Така за опорно напрежение е необходимо $U_{ref} = 1024 * 0.003V = 3.072V$. Това опорно напрежение се получава от точен стабилизатор.

Входните сигнали са двуполярни и трябва да бъдат измервани като такива. За измерване на двуполярни сигнали с наличното АЦП е необходимо да се отмести нулата на аналоговите сигнали точно на $\frac{1}{2}$ от опорното напрежение. За целта с делител от еднакви по стойност точни резистори R се получава половината опорно напрежение. Тази $\frac{1}{2} U_{ref}$ се буферира с операционен усилвател ОУ и се използва за нулев потенциал на аналоговите входове.



Фиг. 2

По този начин входните сигнали се измерват двуполярно до стойност $\pm$ половината опорно напрежение. Могат да се измерват входни напрежения от +1.5V до -1.5V спрямо нулевия потенциал.

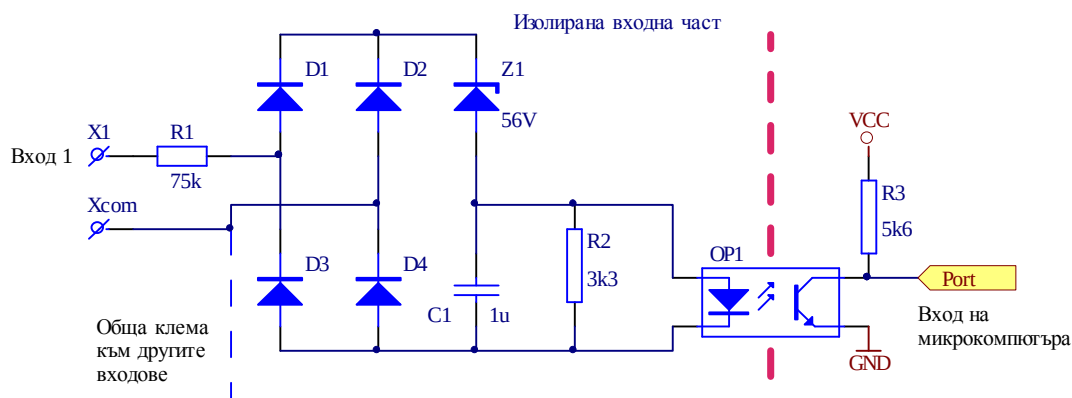
Делителят на напреженивия трансформатор ($R_{1HT} - R_{2HT}$) е пресметнат така, че при 100V ефективна стойност на входа на HT, на вход ADC1 да има 1.41V пиково напрежение.

Съответно върху товарния резистор на токовия трансформатор TT се получава пикова стойност 1.41V при ефективна стойност на тока в измервателната верига, по време на късо съединение, 58.9A. Тази стойност на тока в измервателната верига съответства на ток около 7000A на извода на тяговата подстанция.

Така подобрите входни вериги позволяват измерване на тока и напрежението без препълване на АЦП при всички режими на работа.

4. Дискретни входове

При конструиране на импедансното реле са предвидени четири входа. Предназначени са за следене състоянието на блок-контакти на прекъсвачите в подстанцията. Входовете са галванично изолирани от вътрешните вериги на импедансното реле и могат да работят както с общ минус, така и с общ плюс. Принципната схема на един от входовете е показана на фигура 3.



Фиг. 3

За осигуряване на задействане само при наличие на входно напрежение, в границите на работните стойности, и за нечувствителност към смущения е използван ценеровия диод Z1. Така във входната верига на оптоизолатора започва да протича ток при входно напрежение над 58V. Задействането на входа на микрокомпютъра става при входни напрежения над 120V. Кондензатора C1 предотвратява задействане на входа при кратковременни смущения. Най – често такива се индуцират в проводниците при комутации във веригите на релейната защита.

Първият вход е за следене състоянието на прекъсвача на изхода. Втори вход е за състоянието на прекъсвача на трансформатора, а останалите два са допълнителни и за момента не се използват.

5. Релейни изходи

За управление на помощни релета, изключвателни бобини или сигнализация са предвидени четири релейни изхода. Три от тях са с нормално отворени контакти, а един е с нормално затворен контакт. Принципната схема на релейните изходи е показана на фигура 4.

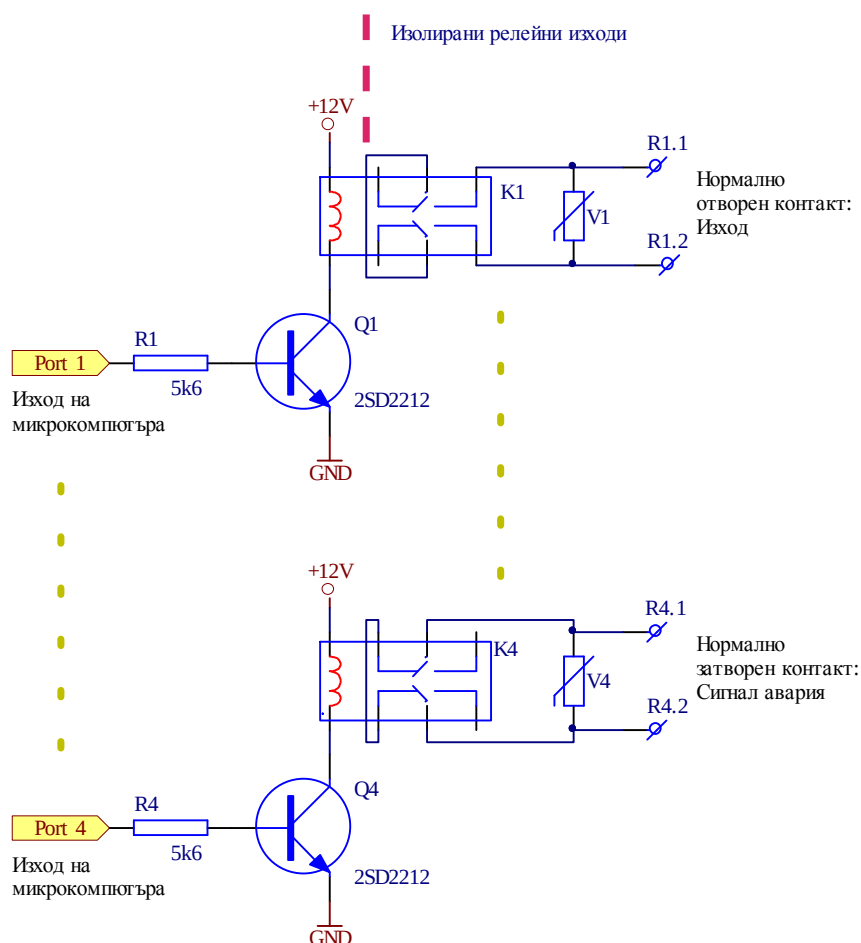
Релетата са с бобини за 12V и работят с напрежение от вградения захранващ блок. Управляващите транзистори, тип 2SD2212, са специално конструирани за управление на индуктивни товари. Имат вградена защита от пренапрежение при изключване и са с голям коефициент на усилване.

Друга особеност са веригите управлявани от контактите на релетата. Те са постоянно токови при работно напрежение 220V. Максималният работен ток

е 100mA. За по – лесно прекъсване на веригата са свързани по два контакта последователно. Електрическата дъга при изключване се прекъсва на две места, с по – малки последствия върху контактите. За защита на контактната система от пренапрежения са предвидени варисторите V1 до V4.

Първото реле K1 е за подаване на сигнал за изключване на прекъсвача на извода.

Второто реле K2 е за изключване на прекъсвача на трансформатора, а третото реле K3 е допълнително и за момента не се използва.



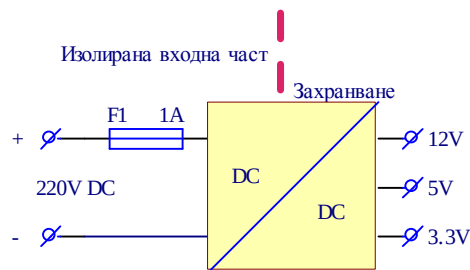
Фиг. 4

Четвъртото реле K4 е с нормално затворени контакти. При нормална работа на импеданското реле то стои постоянно задействано (включено). Ако възникне някакъв проблем в работата на импеданското реле, може да се изключи K4, и да подаде сигнал за авария. Отделно ако отпадне захранването на импеданското реле или се повреди захранващия му блок, то K4 ще се изключи и ще сигнализира за авария.

6. Захранване 220V DC

Блокова схема на захранващия блок е показана на фигура 5.

Захранващият блок на импеданското реле трябва да осигури необходимите за електрониката напрежения и галванично изолиране на микрокомпютъра от външното захранване.



Фиг. 5

За входно напрежение се използва постоянното оперативно напрежение 220V от акумулаторна батерия в тяговата подстанция.

Необходимите изходни напрежения са 12V, 5V и 3.3V. Максималната мощност на захранващия блок е 8W.

6. Изводи

Разработената конструкция на импедансно реле позволява то да бъде монтирано в съществуващите променливотокови подстанции за напрежение 25kV, без да се налага основна промяна на схемите им или цялостна преработка на релейната защита.

Използват се заложените в измервателните вериги напреженови и токови трансформатори.

Експериментален образец на импедансното реле е монтиран в тягова подстанция на НКЖИ и до момента работи почти три години.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Матов, П., М. Ганов, Резултати от изпитвания на релейна защита на двупътни ЖП участъци. Сп. Железопътен транспорт, 05/1994г., стр. 9-11.
- [2] SIEMENS, Siprotec 7SA511 – Numerical Distance Protection Relay, Instruction Manual, Siemens AG 1995, <http://www.siemens.com/>
- [3] AREVA, MiCOM P438 – Railway Catenary Protection Device, Technical Data Sheet, <http://www.areva-td.com/>

Автор: Иван Ангелов, гл.ас. инж. катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически факултет.

АЛГОРИТЪМ НА РАБОТА НА ИМПЕДАНСНО РЕЛЕ ЗА ТЯГОВИ МРЕЖИ 25kV

Иван Ангелов

Резюме. Разгледан е алгоритъма по който работи импедансно реле за тягови мрежи 25kV. При изключване на отдалечени от подстанцията къси съединения е въведено зависещо от тока времезакъснение.

ALGORITHM OF WORK OF THE IMPEDANCE RELAY FOR TRACTION NETWORKS 25kV

Ivan Angelov

Abstract. Here is presented algorithm of work of the impedance relay for traction networks 25kV. When interrupt far short circuit is introduced depending on the current delay.

1. Въведение

В една от тяговите подстанции на НКЖИ е монтиран експериментален образец на импедансно реле за тягови мрежи 25kV [2]. Тук е описан алгоритъма по който работи това импедансно реле.

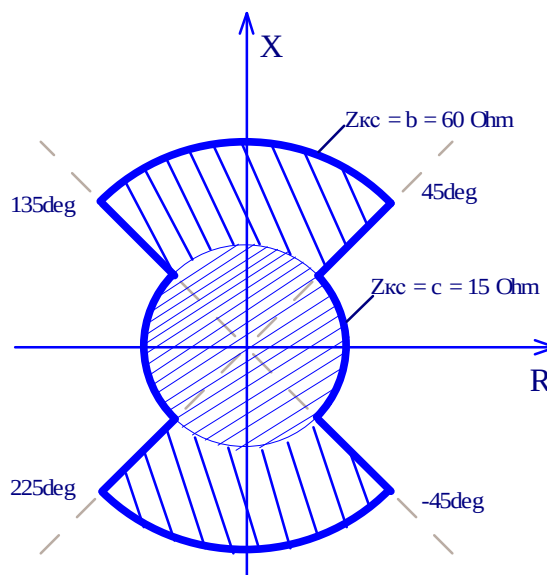
При изключване на отдалечени от подстанцията къси съединения се използва зависещо от големината на тока времезакъснение [1].

2. Условия на изключване по импеданс

На фигура 1 е показана R-X диаграмата по която изключва импедансното реле. Ако пресметнатия импеданс попадне вътре в заштрихованите зони следва изключване на извода към който е релето.

При импеданс под 15 ома се попада в зона **с** и релето изключва извода без времезакъснение – като токова отсечка. При импеданс под 60 ома и ъгъл на вектора над 45 градуса се попада в зона **б**, при което релето изключва като максимално токова защита (МТЗ) с времезакъснение.

Времезакъснението се определя според големината на тока на късо съединение по (1)



Фиг. 1

$$t_{(s)} = 0.5 * \ln \left(\frac{3200}{I(A)} \right) \quad (1)$$

Оттук за различни токове на късо съединение, попадащи в зона **b**, са пресметнати необходимите закъснения. Резултатите са показани в Таблица 1.

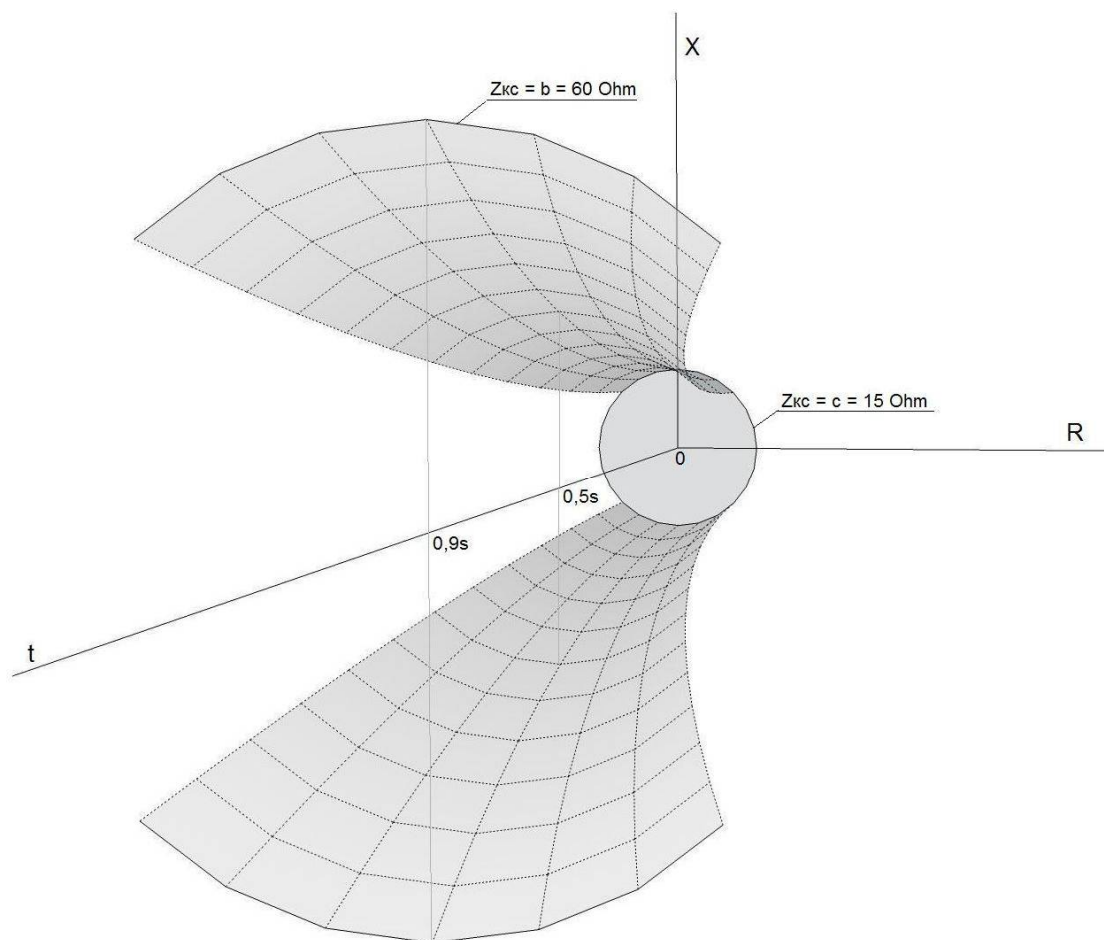
Таблица 1

I_{kc}	A	500	1000	1500	2000	2500	3000
δt	s	0.928	0.582	0.379	0.235	0.123	0.032

От резултатите показани в таблицата се вижда следното: при ток на късо съединение 3000A или по – голям извода се изключва без времезакъснение; При ток на късо съединение 500A закъснението е 0.9s.

Ако на R-X диаграмата от фигура 1 се покаже и времезакъснението t за зона **b** се получава триизмерна R-X-t диаграма показана на фигура 2.

Ако импеданса попадне някъде по фуниевидните повърхности на фигура 2, изключването на късото съединение е с времезакъснение от 0 до 0.9 секунди според големината на тока.

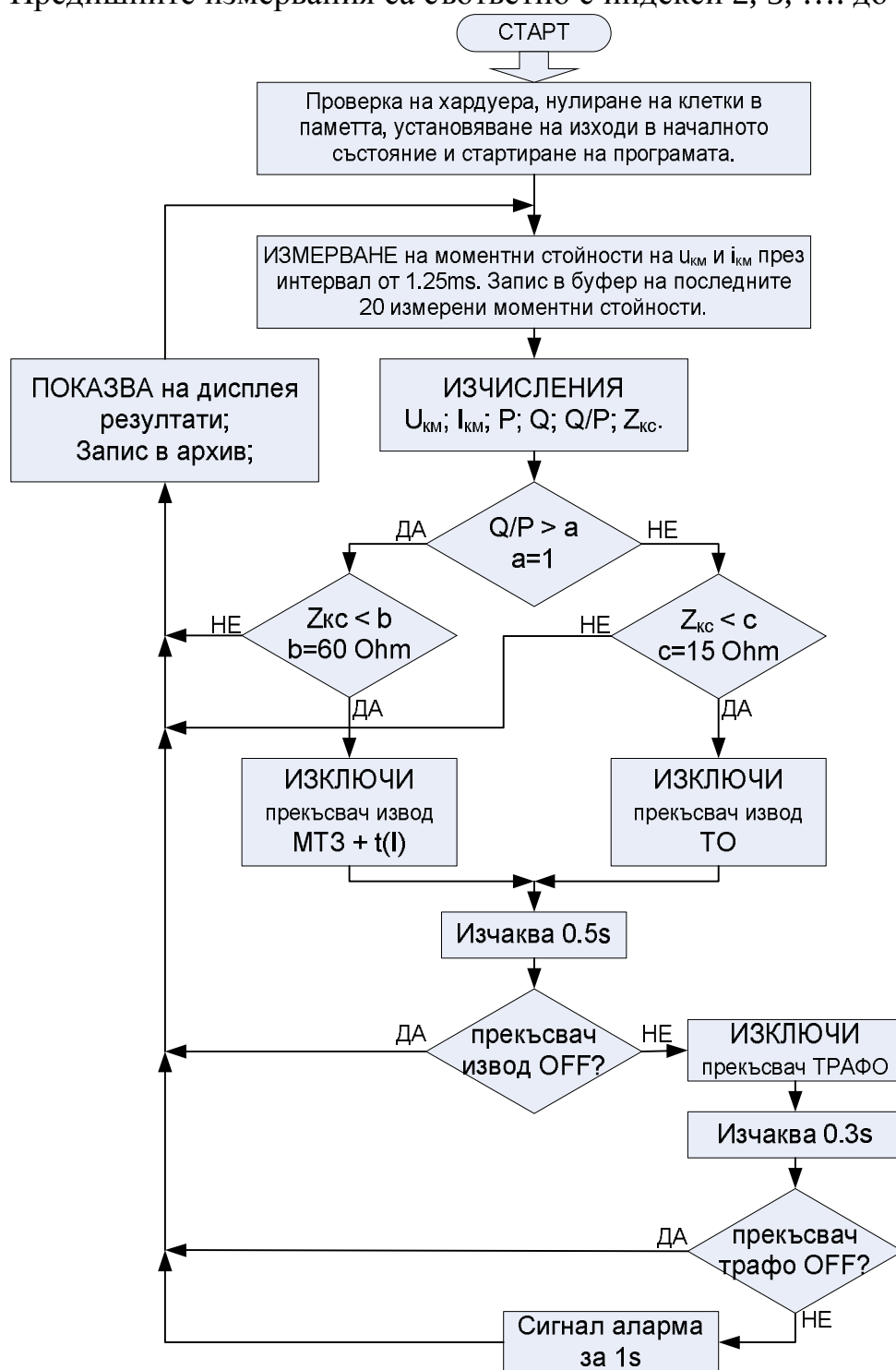


Фиг. 2

3. Алгоритъм на работа

Основните стъпки от работата на софтуера на импедансното реле са илюстрирани на фигура 3. За по – голяма прегледност на алгоритъма са съкратени голяма част от помощните проверки, сравнения и условия за преход.

На всеки 1.25ms се измерва j -тата моментната стойност на напрежението $u_{km(j)}$ и на тока $i_{km(j)}$. Последните 20 моментни стойности се съхраняват в буфер, като последно измерените моментни стойности са най – отпред в буфера с индекс 1. Предишните измервания са съответно с индекси 2, 3, до 20.



Фиг. 3

След всяко измерване, от записаните в буфера моментни стойности се пресмятат напрежение, ток, активна мощност и реактивна мощност по изразите (2), (3), (4) и (5):

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{16} u_j^2}{16}} \quad (2); \quad I = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{16} i_j^2}{16}} \quad (3);$$

$$P = \frac{\sum_{j=1}^{16} u_j i_j}{16} \quad (4); \quad Q = \frac{\sum_{j=1}^{16} u_j i_{j+4}}{16} \quad (5);$$

Пълната мощност пресметната от P и Q (6) и съответно по U и I (7):

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6); \quad S_2 = U * I \quad (7);$$

Корекция на тока заради наличие на апериодична съставка:

$$I_{кор} = I * 0.95 * \frac{S_1}{S_2} \quad (8)$$

Пресмятане на тангенс от ъгъла на тока.

$$tgj = \frac{|Q|}{|P|} \quad (9)$$

И на края импеданса на извода по време на късото съединение:

$$Z_{кc} = \frac{U}{I_{кор}} \quad (10)$$

Ако резултата от (9) е по – малък от 1 и $Z_{кc}$ е под 15 ома, то изключването на извода ще бъде без времезакъснение или от ТО.

При резултат от (9) по – голям от 1 и $Z_{кc}$ под 60 ома, изключването ще бъде с времезакъснение зависещо от тока. Тоест $MT3 + t(I)$.

При подаване на команда за изключване на прекъсвач на извода на ТПС има възможност да се контролира, по сигнал от помощен контакт, дали прекъсвача е задействал и изключил. Ако това не се случи, след време 0.5s се подава сигнал за изключване на прекъсвача на трансформатора.

4. Изводи

Представения алгоритъм на работа на импедансно реле е изпробван в реални условия. Показа и показва добри резултати и селективно сработване на импедансното реле. Необходимо е занапред да се изчистят някои неточности в меренето при наличие на апериодична съставка в тока или при наличие на късо съединение през електрическа дъга.

Програмното осигуряване може да се развива и да се добавят нови функции с които да се предпазват изводите на ТПС при неспецифични режими на работа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Матовр П., М. Ганов, Резултати от изпитвания на релейна защита на двупътни ЖП участъци. Сп. Железопътен транспорт, 05/1994г., стр. 9-11.
- [2] Ангеловр Ив., Хардуерна реализация на импедансно реле за тягови мрежи 25kV, II научна конференция ЕФ2010.

Автор: Иван Ангелов, гл.ас. кат. „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”, Електротехнически факултет.

АКСИАЛНО ПОЛЕ НА РАЗСЕЙВАНЕ В КРАЙНАТА ОБЛАСТ НА ХИДРОГЕНЕРАТОР

Емил Соколов

Резюме. Аксиалното поле на разсейване на явнополюсен синхронен генератор е изследвано с метод на крайните елементи. В модела двумерното стационарно магнитно поле в линейна област е възбудено от моментни стойности на токовете в статорните челни съединения и от възбудителния ток. Поредица от решения в тангенциално направление за едно полюсно деление е използвана при анализ на взаимодействието между статорния и роторния поток на разсейване. Магнитната индукция, нормална към равнината на статорните пластини, е получена за различни работни режими.

AXIAL LEAKAGE FIELD IN THE END – REGION OF A HYDROGENERATOR

Emil Sokolov

Abstract. The axial leakage field in the end-region of a salient-pole synchronous generator is computed by finite element method. The two-dimensional stationary field in linear domain is excited by instantaneous values of the end-winding currents and the field current. A series of solutions in tangential direction for one pole pitch is applied by analysis of the interaction between the stator and rotor leakage flux. The flux density, normal to the plane of stator lamination is obtained for different operating modes.

1. Въведение

Изучаването на полето на разсейване на челните съединения на синхронните машини е актуално заради загряването на крайните статорни пакети и конструктивните елементи на системата за притягане. Вихровите токове в елементите на челната зона на статора са индуцирани от аксиалната компонента на магнитния поток. В пластините на крайния пакет контурите на тези вихрови токове не са ограничени, за разлика от ефектите по дебелината на тънки пластини при пренамагнитване от радиалния поток. Допълнителното локално загряване на крайните пакети е важно за експлоатационната надеждност и допустимите режими, особено за по-старите генератори [1, 5, 7].

Редица публикации са посветени на моделирането на магнитното поле и вихровите токове в крайните области, предимно на турбогенератори [2, 3, 4, 6]. Приложени са както двумерни, така и квази-тримерни и пълни тримерни числени решения.

Полето на разсейване в областта на челните съединения има компоненти на магнитната индукция във всичките три направления. При явнополюсните генератори анализът се усложнява от структурата на ротора. Въпреки това задачата може да се реши като двумерна, ако се разгледа поредица от сечения в тангенциално направление. Необходимо е във всяка от равнините да бъдат отразени специфичните условия на статорните секции с токовете в тях, полюсите и взаимното пространствено положение в зависимост от режима на работа. По такъв начин е възможно да се изследват физическите процеси в крайната зона на генератора без съществена загуба на точност.

В настоящата работа магнитното поле на разсейване в крайната област на един хидрогенератор е моделирано при следните допускания. Приема се, че аксиалният поток на разсейване е възбуден от тангенциалните компоненти на моментните стойности на токовете в челните съединения на статорната намотка и от тока в полюсните бобини. Не се отчита реакцията на вихровите токове, т. е. моделирано е стационарно магнитно поле. За стоманата по границата се приема $m = \infty$. В резултат на анализа е определена нормалната компонента на магнитната индукция върху повърхността на крайния лист на статорния пакет.

2. Обект и режими на изследване

Обект на изследване е вертикален хидрогенератор (Erga – Italy), за който се разполага с необходимите конструктивни данни. Неговите номинални данни са: 23 MVA, 15 kV, 885 A, $333,3 \text{ min}^{-1}$, $\cos \varphi = 0,9$. Параметрите на генератора имат следните стойности: $x_d = 1,08$, $x_q = 0,71$, $x_{\sigma a} = 0,16$. Някои основни данни на намотките са: $2p = 18$, $q = 4$, $\beta = 5/6$, $w_c = 6$, $a = 3$, $w_f = 35$. Вътрешният и външният диаметър на статора са съответно 3200 mm и 3760 mm, дължината е 900 mm, а размерите на статорните канали са 120 x 20 mm. Отношението на ширината на полюсния накрайник и полюсното деление е $\alpha_p = 2/3$. Крайните статорни пакети не са скосени.

В табл. 1 са показани стойностите на величините, които характеризират изследваните режими на генератора. С общоприетите означения, те са изчислени с помощта на изразите:

$$(1) \quad \theta = \arctg \frac{I^* \cos \varphi}{\frac{U^*}{x_q} + I^* \sin \varphi}$$

$$(2) \quad E_0^* = \frac{x_d I^* \cos \varphi}{\sin \theta} - U^* \frac{x_d - x_q}{x_q} \cos \theta$$

$$(3) \quad E_\delta^* = \sqrt{(U^* + x_{\sigma a} I^* \sin \varphi)^2 + (x_{\sigma a} I^* \cos \varphi)^2}$$

$$(4) \quad \psi = \theta + \varphi$$

Горните изрази са изведени при условия на симетрия и $r_a = 0$. Допускането за линейна магнитна верига води до равенството $E_0^* = I_f^*$. То представлява отношение на възбудителните токове при съответния режим I_f и при празен ход I_{f0} . Всички режими са при номинално напрежение ($U^* = 1$).

Таблица 1

№	$\cos \varphi$	I^*	θ	ψ	E_0^*	E_δ^*	$\theta_{\max}$
	-	o.e.	deg	deg	O.e.	o.e.	deg
1	0,9 ($\varphi > 0$)	1,0	26,0	51,84	1,75	1,08	75,0
2	1,0 ($\varphi = 0$)	0,9	32,58	32,58	1,37	1,01	72,0
3	0,9 ($\varphi < 0$)	0,84	35,95	10,11	0,97	0,95	67,6
4	0,7 ($\varphi < 0$)	0,74	30,48	- 15,09	0,65	0,92	62,5
5	0 ($\varphi = \pi/2$)	0,5	0	90	1,54	1,08	73,5
6	0 ($\varphi = -\pi/2$)	0,5	0	- 90	0,46	0,92	58,7

Първият режим в табл. 1 е при превъзбуждане с номинално натоварване и номинален фактор на мощността ($\varphi > 0$). Вторият работен режим е при $\cos \varphi = 1$ и ограничение по мощност на турбината. Следващите два режима са при недовъзбуждане ($\varphi < 0$). За тях степента на натоварване е определена с помощта на емпиричната формула:

$$(5) \quad Q^* = (0,75 - 0,04.e^{2,9P^*}) \frac{700}{A}$$

Изразът (5) е получен в [1] при критерий – допустимо загряване на крайните статорни пакети в режим на недовъзбуждане. За изследвания хидрогенератор линейното токово натоварване е $A = 760 \text{ A/cm}$.

Последните два режима са индуктивен и капацитивен компенсаторен режим ($\cos \varphi = 0$) с половината от номиналния статорен ток.

На фиг. 1 са дадени векторните диаграми за първите четири режима. Те са представени по такъв начин, че да се направи сравнение по между им и да се подготвят входни данни за моделирането.

3. Плътност на тока в намотките

Плътността на тока е определена чрез моментните стойности на токовете в трите фази и възбудителния ток при съответния работен режим.

Ако при $\omega t = 0$ надлъжната ос d съвпада с оста на фаза a , моментната стойност на тока във фазата е равна на надлъжната компонента на котвения ток с обратен знак $i_a = -\sqrt{2}I_d$ (фиг. 1). При $\omega t = 0$ моментните стойности на токовете в статорната намотка в относителни единици са:

$$(6) \quad \begin{aligned} i_a^* &= -\sqrt{2}I^* \sin \psi \\ i_b^* &= -\sqrt{2}I^* \sin(\psi - 120) \\ i_c^* &= -\sqrt{2}I^* \sin(\psi + 120) \end{aligned}$$

Стойностите на токовете за изследваните режими, изчислени по (6) за $\omega t = 0$, са дадени в табл. 2.

На фиг. 2 е представена схемата на статорната намотка за едно полюсно деление. На фиг. 2а са отбелязани посоките на токовете в каналите при $\cos \varphi = 0,9$ (инд), а на фиг. 2б – посоките на токовете в каналите за случая на $\cos \varphi = 0,7$ (кап). За да се определят посоките на тангенциалните токове, нанася се посоката на тока в челните съединения на трите фази, така както е показано на фиг. 2.

Таблица 2

№	$\cos \varphi$	I^*	i_a^*	i_b^*	i_c^*
	-	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
1	0,9 (инд)	1,0	- 1,112	1,313	- 0,201
2	1,0	0,9	- 0,685	1,272	- 0,587
3	0,9 (кап)	0,84	- 0,208	1,117	- 0,909
4	0,7 (кап)	0,74	0,272	0,739	- 1,011
5	0 (инд)	0,5	- 0,707	0,3535	0,3535
6	0 (кап)	0,5	0,707	- 0,3535	- 0,3535

Моментните стойности на токовете в относителни единици могат да бъдат изчислени за произволен момент от време по формулите:

$$(7) \quad \begin{aligned} i_a^* &= -\sqrt{2}I^* \sin(\omega t + \psi) \\ i_b^* &= -\sqrt{2}I^* \sin(\omega t + \psi - 120) \\ i_c^* &= -\sqrt{2}I^* \sin(\omega t + \psi + 120) \end{aligned}$$

Плътноста на тангенциалните токове в напречните сечения на челните съединения се определя както следва:

$$(8) \quad j_{\theta a, b, c} = k i_{\theta a, b, c}^* = k \cdot \sin \alpha \cdot |i_{a, b, c}^*|,$$

където $k = \frac{w_c I_n}{a \cdot S}$, а ъгълът α е между наклонената част на челното съединение и нормалата към крайния лист.

Плътноста на тока в напречното сечение на полюсната бобина се определя както следва:

$$(9) \quad j_f = \frac{w_f I_{f0}}{S_f} E_0^*$$

Таблица 3

№	$\cos \varphi$	I^*	$j_{\theta a}$	$j_{\theta b}$	$j_{\theta c}$	j_f
	-	о.е.	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²	A/mm ²
1	0,9 (инд)	1,0	3,65	4,31	- 0,66	- 2,23
2	1,0	0,9	2,25	4,18	- 1,93	- 1,75
3	0,9 (кап)	0,84	0,68	3,67	- 2,99	- 1,24
4	0,7 (кап)	0,74	- 0,89	2,43	- 3,32	- 0,83
5	0 (инд)	0,5	2,32	1,16	1,16	- 1,96
6	0 (кап)	0,5	- 2,32	- 1,16	- 1,16	- 0,59

В табл. 3 са дадени плътностите на тока за изследваните режими при $\omega t = 0$. Те се отнасят за сеченията на челните съединения, разположени по ос d (фиг. 2). В общ случай знаците пред плътностите j_θ не съвпадат със знаците на токовете i^* за едноименните фази. Това е така, тъй като оста d е изместена спрямо полюсно-фазните зони на статорната намотка.

4. Резултати и анализ

Най-напред е моделирано полето на разсейване в равнина, която пресича областта на челните съединения по надлъжната ос. Оста d е разположена срещу зъб на статора. В равнината се проектират напречните сечения на десет челни съединения на статорни секции – по пет в двата слоя. От фиг. 2 следва, че първите три сечения в горния слой (към ротора) са от фаза c , над тях три са от фаза b , а последните четири (най-отдалечени от статора) – са от фаза a . Моделът включва част от въздушната междина и полюсната бобина. Цялата област е линейна.

Полевата задача е решена с програмния пакет *FEMM* [8]. Плътностите на тока съответстват на табл. 3. По цялата граница на областта е зададено хомогенно гранично условие на Нойман, с изключение отсечката на въздушната междина, където граничното условие е на Дирихле. Полето на разсейване е определено в един фиксиран момент от времето.

Аксиалната компонента на магнитната индукция върху повърхността на крайния лист е получена от функцията на нормалната компонента на индукцията $B_n(x)$ по височината на статорния зъб с начало – основата на зъба. Тази функция има максимум B_{zd} на около една четвърт от височината на зъба, считано от коронката. В табл. 4 са дадени стойностите на аксиалната компонента на индукцията по ос d при $\omega t = 0$. Най-големи са индукциите при $\cos \varphi = 0$. При $\cos \varphi = 0$ стойностите на B_{zd} по надлъжната ос са максимални, докато за останалите режими те са по-малки от максималните.

Таблица 4

№	1	2	3	4	5	6
$\cos \varphi$	0,9 (инд)	1,0	0,9 (кап)	0,7 (кап)	0 (инд)	0 (кап)
I^* , о.е.	1,0	0,9	0,84	0,74	0,5	0,5
E_0^* , о.е.	1,75	1,37	0,97	0,65	1,54	0,46
B_{zd} , T	- 0,175	- 0,17	- 0,15	- 0,165	- 0,195	- 0,19

На фиг. 3 е показана картината на магнитното поле при $\cos \varphi = 0,9$ (инд), а на фиг. 4 – при $\cos \varphi = 0,7$ (кап).

По същия начин е направено изследване за $\omega t = \pi/4$ и $\omega t = \pi/2$. Роторът се завърта на същия ъгъл (в ел. градуси). Токовете са изчислени по (7) и са определени нови стойности на плътностите на тока в челните съединения на статорната намотка. Получават се много малки разлики в сравнение с

индукциите B_{zd} при $\omega t = 0$, въпреки различните плътности и различното подреждане на фазите.

Следващите проучвания се отнасят за разпределението на аксиалната компонента на индукцията в тангенциално направление. За целта са направени няколко решения на задачата при $\omega t = 0$ и различни стойности на ъгъл γ . Ъгъл γ се отчита от ос d , където $\gamma = 0$. Изследвани са режимите с $\cos \varphi = 0,9$ (инд) и $\cos \varphi = 0,7$ (кап). За двата режима са получени решения през 15 ел. гр., при които равнината е срещу статорен зъб (фиг. 2). Областта на всяко решение е съставена с отчитане на различното разположение на фазите в напречните сечения на статорните секции и на знаците на токовата плътност в тях. Освен това променя се размерът на въздушната междина и големината на токовата плътност в полюсната бобина (обратно пропорционално на въздушната междина). При еднакви стойности на токовата плътност в статорните челни съединения са проведени изчисления за $j_f \neq 0$ и $j_f = 0$.

Всяко пресмятане завършва с построяване на функцията на нормалната компонента $B_n(x)$ по височината на статорния зъб. На фиг. 5а е показана тази функция при $\cos \varphi = 0,9$ (инд) за $\gamma = -30^\circ$ при $j_f = 0$, от където е определена максимална стойност на индукцията $B_{za} = 0,2$ Т. При същия режим на фиг. 5б е представена функцията $B_n(x)$ за $\gamma = 30^\circ$ при $j_f \neq 0$, от където е отчетена максимална стойност $B_z = -0,23$ Т. Резултатите от изследването са дадени в табл. 5. На фиг. 6а са показани зависимостите от ъгъл γ при $\cos \varphi = 0,9$ (инд), а на фиг. 6б – при $\cos \varphi = 0,7$ (кап).

Таблица 5

		$\gamma = -45^\circ$	$\gamma = -30^\circ$	$\gamma = -15^\circ$	$\gamma = 0$	$\gamma = 15^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 45^\circ$
		$\delta = 29,5mm$	$\delta = 25,9mm$	$\delta = 23,7mm$	$\delta = 23mm$	$\delta = 23,7mm$	$\delta = 25,9mm$	$\delta = 29,5mm$
$\cos \varphi = 0,9(и)$	B_z, T	- 0,13	- 0,095	- 0,13	- 0,175	- 0,21	- 0,23	- 0,28
	B_{za}, T	0,17	0,20	0,20	0,17	0,125	0,08	0,02
$\cos \varphi = 0,7(к)$	B_z, T	0,01	- 0,065	- 0,12	- 0,165	- 0,19	- 0,225	- 0,25
	B_{za}, T	0,10	0,047	0,01	- 0,035	-0,08	- 0,11	- 0,14

При анализа трябва да се има предвид следното. Стойността на аксиалната компонента на магнитната индукция върху повърхността на крайния статорен лист зависи от комбинираното действие на потоците на разсейване на котвената и възбудителната намотка.

Максималните стойности на токовете в каналите и в челните съединения са разместени в пространството приблизително на 90 ел.гр. Затова максималните тангенциални компоненти на тока в челните съединения се появяват в равнината около максимума на м.д.н. на реакцията на котвата. Съществено влияние има положението на този максимум спрямо полюса и междуполюсното пространство. Полето на разсейване на статорните челни съединения е противоположно спрямо полето на разсейване на полюсите при превъзбуждане и съпосочно при недовъзбуждане. Затова при $\cos \varphi = 0,9$ (инд) максималната стойност на B_z е там, където B_{za} се доближава до нула (фиг. 6а), докато при $\cos \varphi = 0,7$ (кап) максимумите на B_z и B_{za} са на едно и също място (фиг. 6б).

Влиянието на потока на разсейване на полюсите е значително. Повечето автори считат, че аксиалният поток в крайните пакети се формира изключително от токовете в челните съединения на статорната намотка, поради близостта. Получените тук резултати свидетелстват, че потока на разсейване на полюсите има определяща роля при по-голям възбудителен ток (по-големи стойности на E_0^*). По същата причина при режимите с недовъзбуждане максималната индукция $(B_z)_{\max}$ не се увеличава прекомерно, въпреки че потоците на разсейване на статорните челни съединения и на полюса се сумират. Разбира се тук има влияние и по-малката стойност на тока I^* .

Обяснението за степента на участие на двете намотки при образуването на аксиалната компонента на индукцията в крайната зона трябва да се търси в отношението между м.д.н. на котвената и възбудителната намотка при всеки един работен режим. Може да се предположи, че пространствената позиция на $(B_z)_{\max}$ ще се получи около максимума на резултатното м.д.н. F_p . При синусоидално разпределение на м.д.н. на котвата с амплитуда F_a и м.д.н. на полюса F_f , ъгълът между ос d и амплитудата на F_p е:

$$(10) \quad \alpha_p = \arctg \frac{F_a \cos \psi}{F_f - F_a \sin \psi}$$

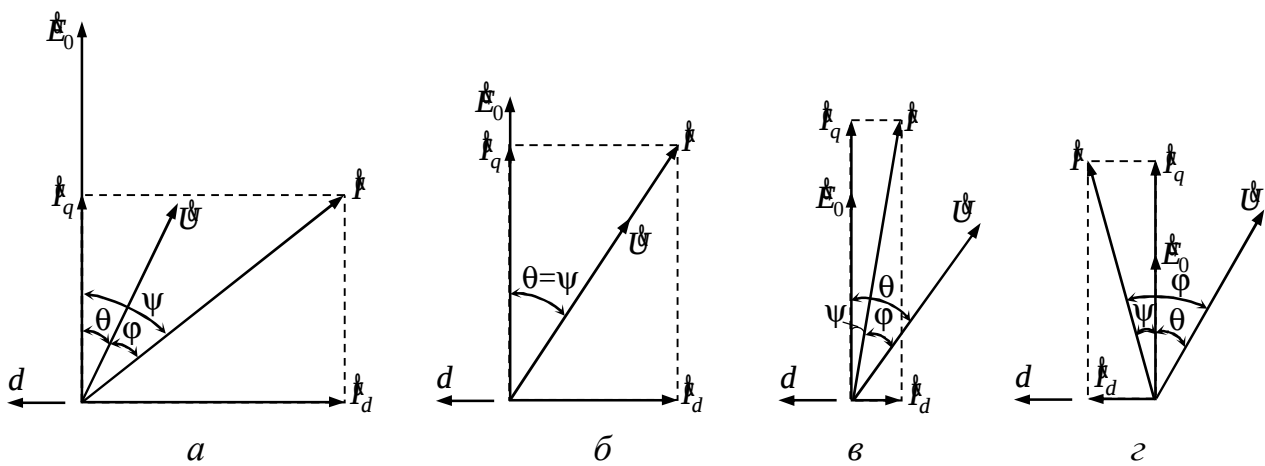
В табл. 6 са поместени максималните стойности на индукцията върху крайния статорен лист за всички изследвани режими. Там са дадени и стойностите на α_p . За първите четири режима стойностите на $(B_z)_{\max}$ са определени при $\gamma = 45^\circ$ или близко до α_p .

Таблица 6

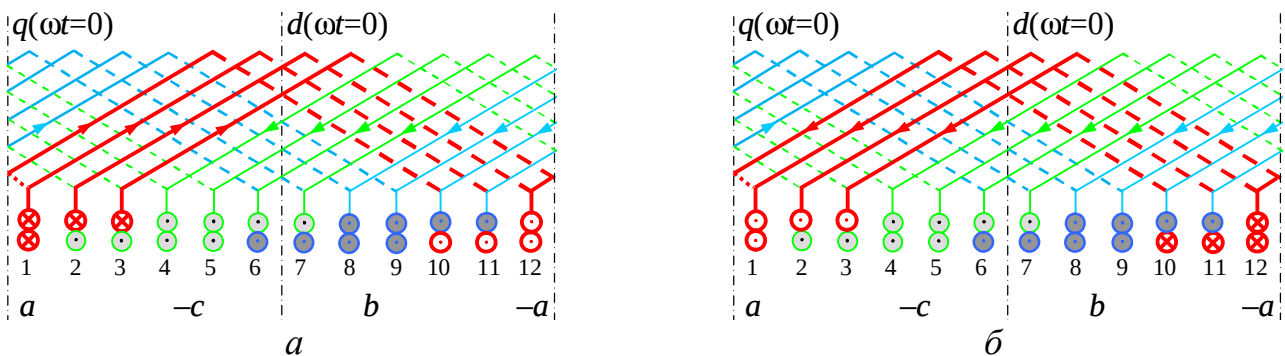
№	1	2	3	4	5	6
$\cos \varphi$	0,9 (инд)	1,0	0,9 (кап)	0,7 (кап)	0 (инд)	0 (кап)
I^* , о.е.	1,0	0,9	0,84	0,74	0,5	0,5
E_0^* , о.е.	1,75	1,37	0,97	0,65	1,54	0,46
$(B_{za})_{\max}, T$	0,20	0,155	- 0,12	- 0,14	0,102	- 0,105
$(B_z)_{\max}, T$	- 0,28	- 0,28	-0,27	-0,25	- 0,195	- 0,19
α_p , deg	34	41	45,5	40,5	0	0

5. Заключение

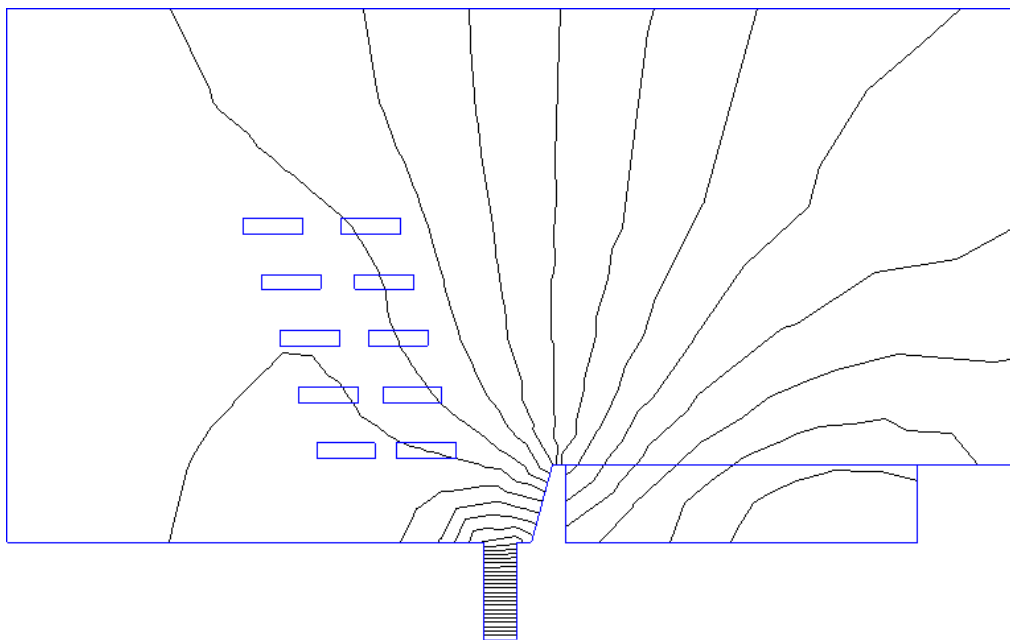
Представено е числено изследване на аксиалното магнитно поле на разсейване в областта на челните съединения на един хидрогенератор. Определени са стойностите на нормалната компонента на магнитната индукция върху повърхността на крайния лист на статорния пакет при различни работни режими. Анализирано е разпределението на тази индукция в тангенциално направление. Установени са някои закономерности за взаимодействието между полетата на разсейване на статорната и роторната намотка. В условията на избраните режими и ограничения са получени близки максимални стойности на индукцията.



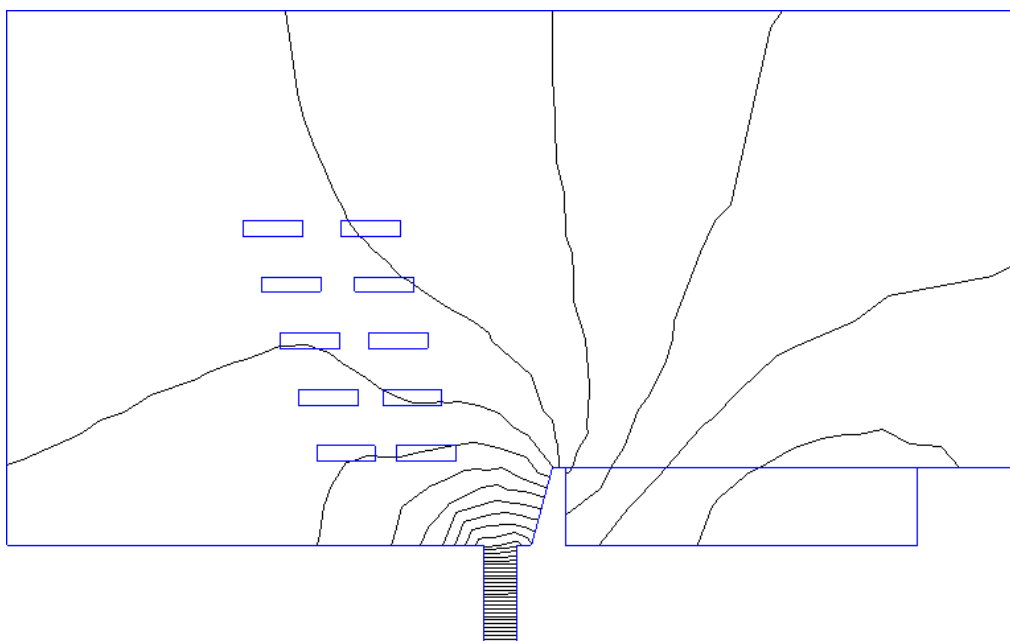
Фиг. 1



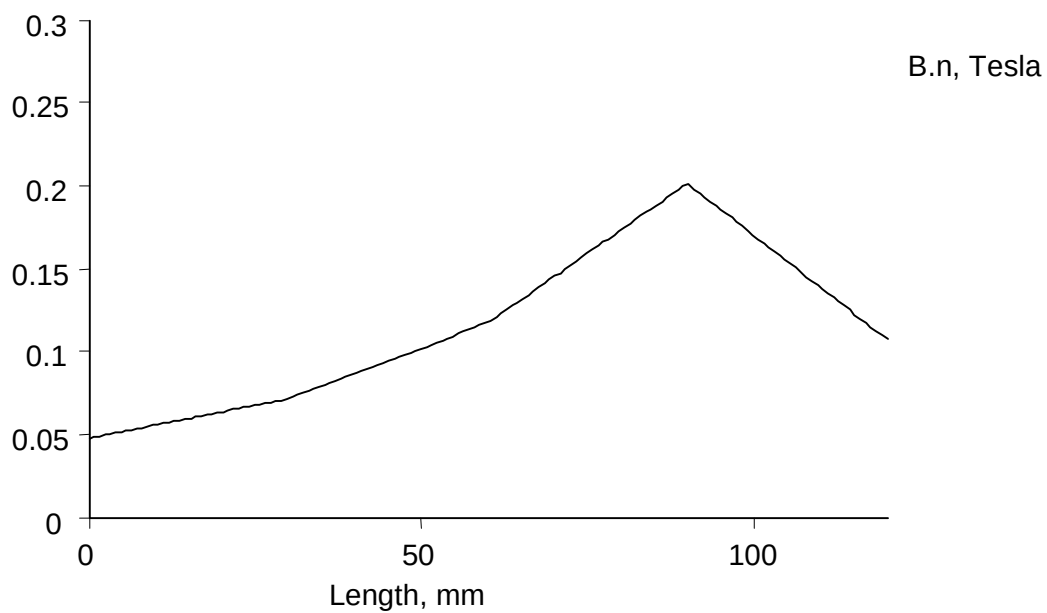
Фиг. 2



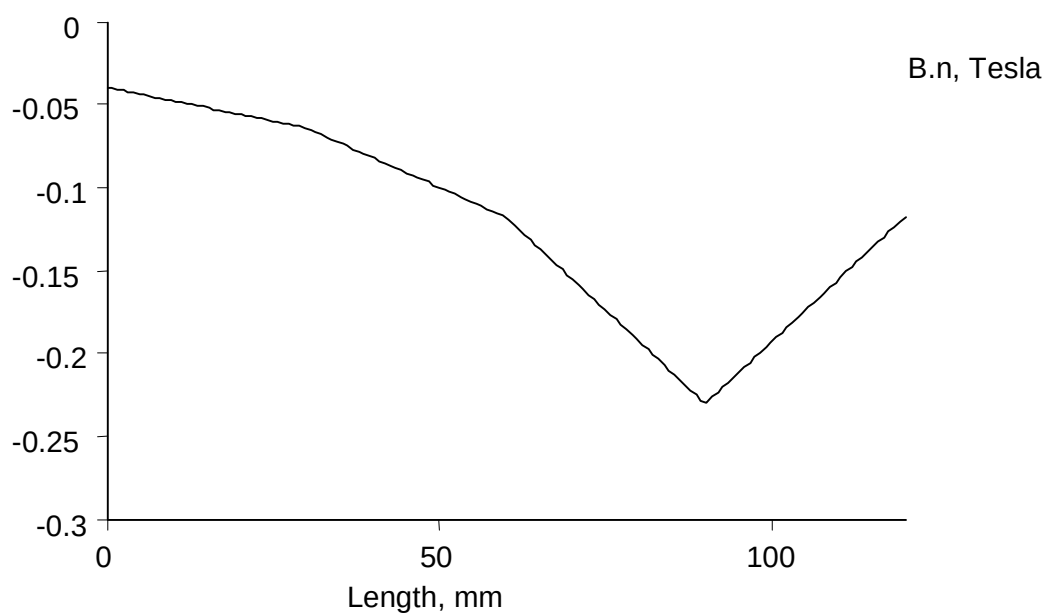
Фиг. 3



Фиг. 4

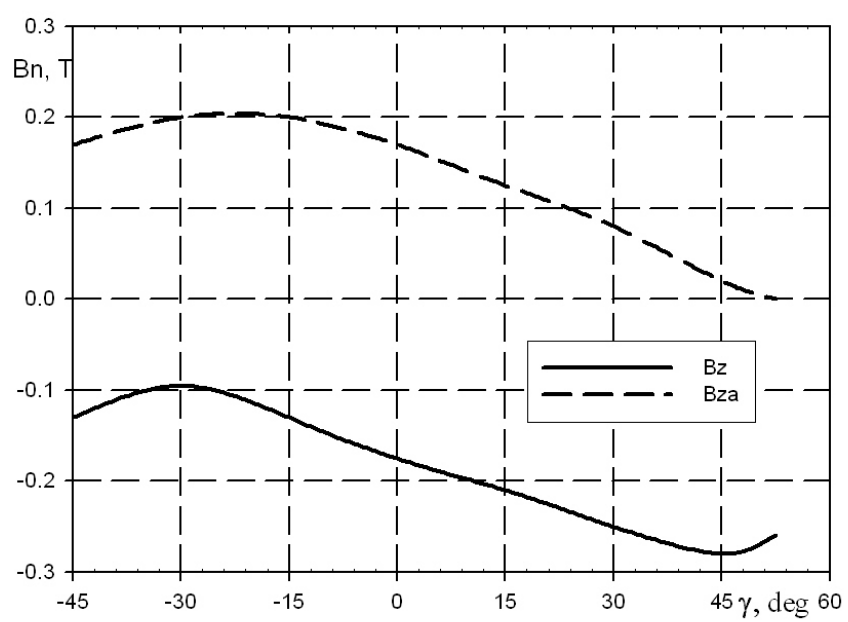


a.

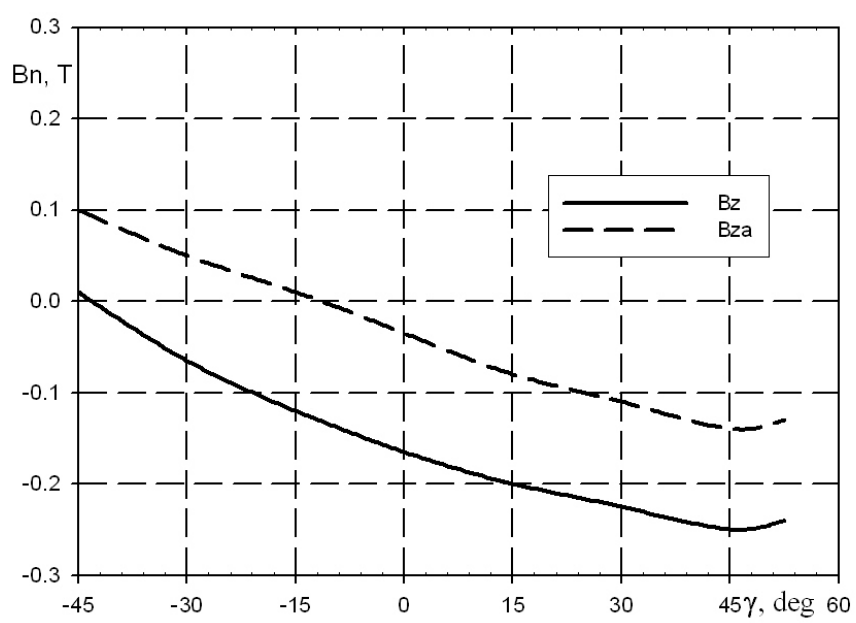


б.

Фиг. 5



a.



б.

Фиг. 6

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Глебов И., В. Домбровский и др. Гидрогенераторы, М., Энергоиздат, 1982.
- [2] Вольдек А., Я. Данилевич, В. Косачевский, В. Яковлев. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин, Л., Энергоатомиздат, 1983.
- [3] Jack A., B. Mecrow. Calculation of three-dimensional electromagnetic fields involving laminar eddy currents, IEE Proceedings, Vol.134, 1987.
- [4] Silva V., G. Meunier, A. Foggia. A 3D finite-element computation of eddy currents and losses in the stator end laminations of large synchronous machines, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.32, 1996.
- [5] Zlatanovici D., P. Budulan. Assessment of hydrogenerators capacity to provide the system service of voltage control, IEEE Bologna Power Tech Conference, 2003.
- [6] Станчева Р. Проблеми на свързани полета, оптимизация и обратни задачи в крайните области на турбогенератор, Автореферат на дисертация за д.т.н., 2005.
- [7] Сотиров Д., М. Михов, С. Баташки. Експериментално определяне на допустимите граници на изменение на реактивната мощност на хидрогенератори в зависимост от загряването на крайните пакети на статора, Годишник на ТУ – София, том 59, кн. 2, 2009.
- [8] D. Meeker. FEMM Vesion 3.4, 2005.

Автор: проф. дтн Емил Соколов, кат. „Електрически машини”, ТУ-София

ИЗСЛЕДВАНЕ ВЛИЯНИЕТО НА Р.Т.К. ВЪРХУ МАГНИТНОТО ПОЛЕ В РОТОРНИТЕ ПОЛЮСИ НА СИНХРОННИ ХИДРОГЕНЕРАТОРИ С МКЕ

Пламен Ризов, Димитър Сотиров, Стоян Баташки, Радослав Спасов

***Резюме.** Разработен е подход за числено моделиране на магнитното поле в синхронен хидрогенератор в режим на номинално натоварване при индуктивен характер на товара. От полученото числено решение се определя потока на разсейване на полюса, при разпределение на магнитната индукция в него близко до реалното. Резултатите от изследването позволяват да се оптимизира конструкцията на полюсното тяло за да се избегне силното му насищане.*

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE STATOR CURRENT REACTION OVER THE MAGNETIC FIELD IN THE ROTOR POLES OF SYNCHRONIC HYDRO GENERATORS WITH FEM

Plamen Rizov, Dimitar Sotirov, Stoyan Batashki, Radoslav Spasov

***Abstract.** An approach has been developed for numerical modeling of the magnetic field in synchronic generators under a nominal inductive load. From the resulting numerical solution is determined the magnetic flux linkage in distribution of the magnetic induction in it close to the real value. The results of the research allow the optimize the construction of the pole to avoid its high saturation.*

1. Увод

При оразмеряването на роторните полюси на синхронни хидрогенератори се вземат пред вид допустимите електромагнитни и механични натоварвания, и конструктивни изисквания за осигуряване на достатъчно място в междуполусното пространство за разполагане на бобините на възбудителната намотка (ВН); на детайлите осигуряващи закрепването на бобините на ВН към полюсните тела и т.н., като най-голяма част от междуполусното пространство се заема от бобините на ВН. За това оразмеряването на роторните полюси се съобразява с осигуряването на място за разполагане на бобините ВН в междуполусното пространство, при спазване на конструктивните изисквания по отношение на укрепването на ВН към полюсните тела и накрайници.

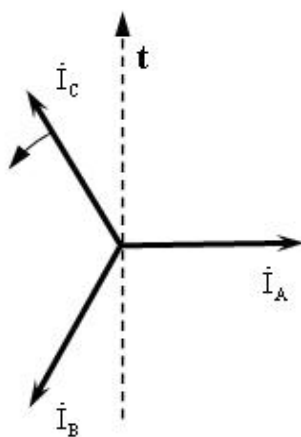
2. Дефиниране на проблема

При проектиране на синхронни хидрогенератори един от важните проблеми е осигуряване на необходимото място за разполагане на ВН. Един от възможните начини е увеличаване на външния диаметър на ротора, което води до по-големи габаритни размери на генератора, а от там и до по-голям разход на активни и конструктивни материали, труд и енергия за производство. Друг начин за осигуряване на място за разполагане на ВН е увеличаване на токовата плътност в нея. Ограниченията тук са свързани с възможностите за охлаждане на ВН като трябва да се има пред вид и изискването за форсиране на възбуждането на генераторите, при което възбудителния ток се увеличава до два пъти спрямо номиналния. Тези фактори налагат ограничение върху намаляването на сечението на шината за ВН. Трети подход е свързан с подбиране на подходящи размери на тялото на полюса и полюсния накрайник. В този случай е необходимо да се получи точна представа за разпределението на магнитната индукция в тях в режим на натоварване, когато магнитното поле на статора деформира магнитното поле на ротора, вследствие на което насищането в двата края на полюсния накрайник и полюсното тяло спрямо тяхната ос на симетрия е различно. Това води до увеличение на потока на разсейване на полюса, който е по-голям в онези участъци, където насищането е по-голямо. В основата на полюса преминава целия магнитен поток на разсейване, който се наслагва към основния поток, в резултат на което насищането на този участък на магнитната верига е по-голямо отколкото в участъците над него. Това изисква по-голямо м.д.н. на ВН, което означава по-голям възбудителен ток. В този случай, при наложените ограничения за токовата плътност във ВН, е необходимо да се използва шина с по-голямо сечение, следователно по-голямо междуполусно пространство за разполагане. Един възможен подход за определяне на потока на разсейване на роторните полюси с отчитане на влиянието на р.т.к. е съвместното прилагане на класическия подход за оразмеряване на роторните полюси и уточняване на потока на разсейване чрез използване на числени методи, в частност метода на крайните елементи (МКЕ). Крайната цел на този подход е оптимизиране на конструкцията на полюса с цел намаляване на потока на разсейване до възможния минимум, ще намали насищането на полюса, а следователно ще се намали възбудителния ток, а от там сечението на шината на ВН при спазване на ограниченията за допустима токова плътност. В крайна сметка ще се намали необходимия обем за ВН в междуполсното пространство, а от там габаритите и цената на хидрогенератора.

Целта на настоящата разработка е разработване на подход за числено моделиране на магнитното поле в синхронен хидрогенератор в режим на номинално натоварване при индуктивен характер на товара. От полученото числено решение се определя потока на разсейване на полюса, при разпределение на магнитната индукция в него близко до реалното.

3. Модел за числено моделиране

Моделът за числено моделиране е съставен в средата на продукта FEMM, като за него се използват входни данни за геометрията, намотките и токовете натоварвания на хидрогенератора, получени от електромагнитни изчисления направени с класическите методики. Магнитното поле се разглежда като стационарно. В статорните фази са зададени моментни стойности на статорния ток в режим на номинално натоварване при номинален фактор на мощността $\cos\phi$ индуктивен. Тези стойности на токовете съответстват на положение на токовата звезда спрямо оста на времето t , както е показано на фиг. 1.

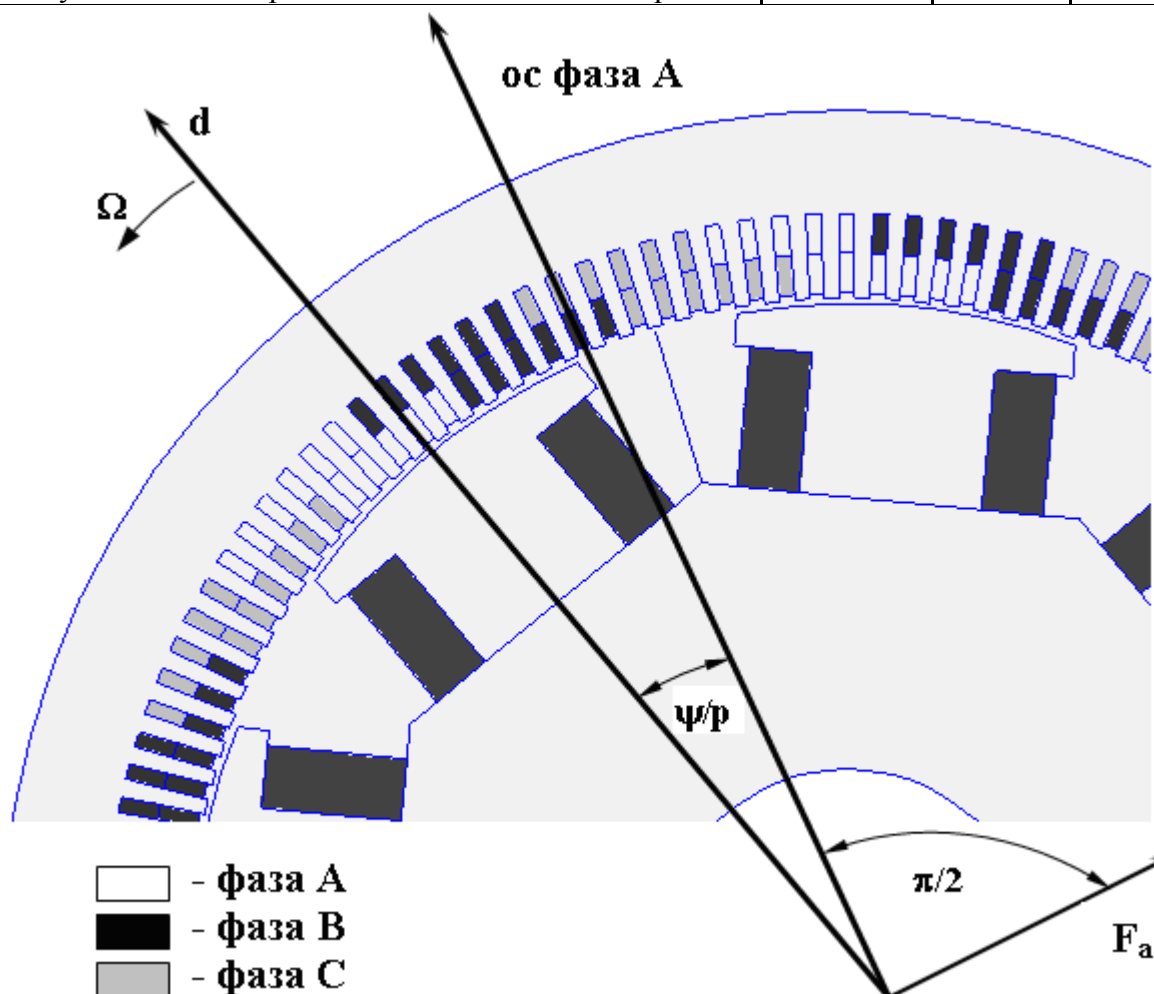


Фиг. 1. Положение на токовата звезда в разглеждания момент от време t

Моментните стойности на фазните токове са $i_A = 0$, $i_B = -\sqrt{2}/3 \cdot I_n$, $i_C = \sqrt{2}/3 \cdot I_n$, а м.д.н. на статорната намотка е $\vec{F}_a = \vec{F}_A + \vec{F}_B + \vec{F}_C$. В бобините на роторната намотка е зададен възбудителен ток, съответстващ на описания по-горе реж. Роторът е поставен в положение спрямо статора, както е показано на фиг. 2, при което ъгълът между надлъжната ос d на роторните полюси и оста на резултатното м.д.н. на статорната намотка е равен на ψ/p , където ψ е ъгълът между векторите на статорните е.д.н. и ток, а p – броя чифтове полюси. Той се получава от електромагнитните изчисления на хидрогенератора и е входна данна за числения модел. Показаният на фиг. 2 модел е изпълнен за хидрогенератор с номинални данни, дадени в таблица 1. Статорният пакет е моделиран чрез кривата на намагнитване на стомана М330-50А, стоманите на ротора – съответно с кривите на намагнитване на Ст.3 за полюси и Ст.3 за роторното тяло, произвеждана във вид на плочи. Статорната намотка е от бобиноен тип с w_c навивки в секция и е подредена в статорните канали съгласно схемата на намотката при дробно число канали за полюс и фаза q . Посоката на въртене на ротора е обратна на посоката на въртене на часовниковата стрелка. От дясно на оста на фаза А, в дъното на каналите са разположени първите активни страни на статорните секции на фаза А, а от ляво – в слоя откъм въздушната междина вторите активни страни, статорната намотка е положена в посока обратна на часовниковата стрелка.

Таблица 1

Наименование	Означение	Мерна ед.	Стойност
Номинална мощност	S_n	MVA	2.8
Номинално фазно напрежение	U_n	kV	6.3
Фактор на мощността - индуктивен	$\cos\varphi$		0.8
Номинален фазен ток	I_n	A	257
Работна честота	f	Hz	50
Чифтове полюси	p	-	4
Външен диаметър на статора	D_a	mm	1300
Брой статорни канали	Z_1	-	138
Брой навивки на статорна фаза	w_1	-	138
Височина на статорен канал	h_k	mm	60.4
Широчина на статорен канал	b_k	mm	12.2
Дължина на магнитопровода на статора	L	mm	690
Височина на ядрото на полюса	h_m	mm	110
Широчина на ядрото на полюса	b_m	mm	142
Височина на полюсия накрайник	h_p	mm	44
Стъпка на статорна намотка определена в канали	y	бр.кан.	14
Канали за полюс и фаза	q	бр.кан	5(3/4)
Възбудителен ток в режим на номинално натоварване	I_f	A	232



Фиг. 2. Модел за провеждане на числено моделиране на режима на натоварване с МКЕ

4. Резултати от числените изследвания

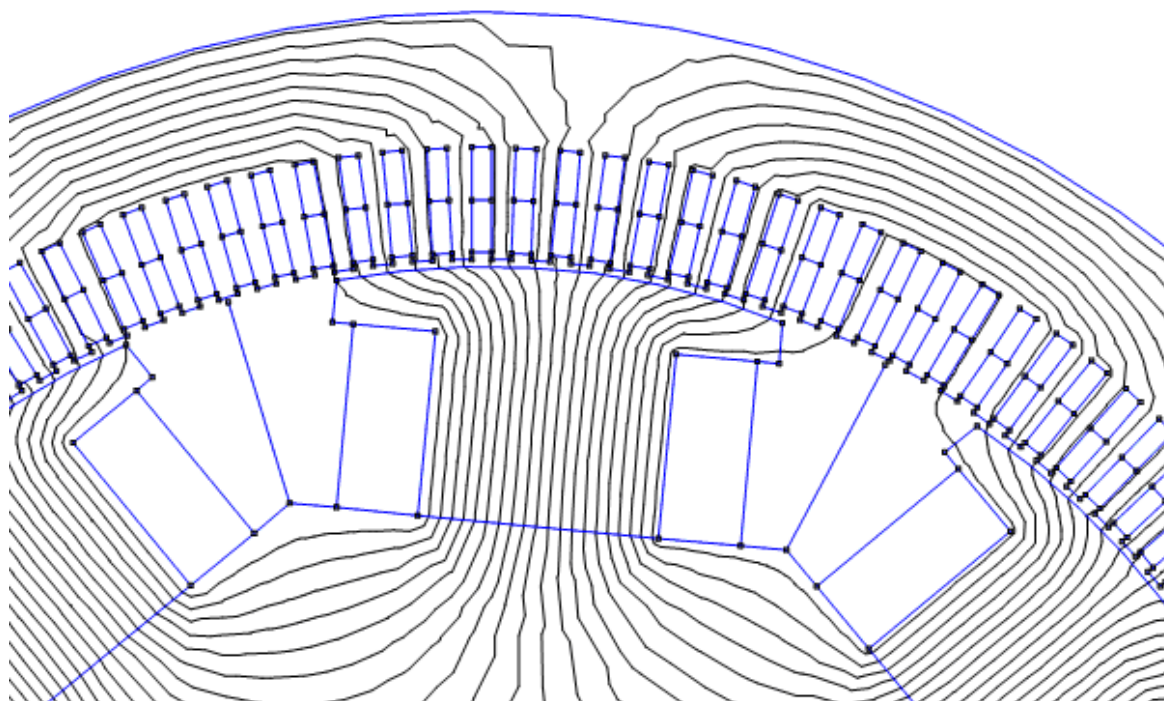
На фиг. 3 е показано разпределението на силовите линии на общия магнитен поток в зоната на един роторен полюс за режим на празен ход на хидрогенератора при номинално котвено напрежение 6.3 kV. За режим на номинално натоварване при индуктивен характер на товара с $\cos\varphi = 0.8$ аналогичното разпределение на общия магнитен поток е показано на фиг. 5.

Показаното на фиг. 4 разпределение на магнитния поток на разсейване на роторните полюси се отнася за водещия – преден край на полюса. Аналогично е разпределението на потока на разсейване за задния край на същия роторен полюс.

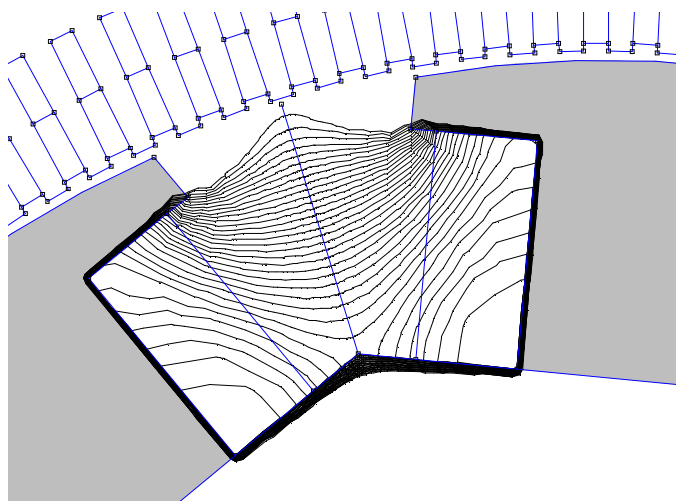
Изменението на пространственото разпределение на потока на разсейване за водещия край на разглеждания полюс спрямо посоката на въртене, е показано на фиг. 6., а за задната страна на същия полюс на фиг. 7.

Фиг. 8 демонстрира неравномерното натоварване на полюсния накрайник и полюсното тяло вследствие на въздействие на статорното поле върху полето на възбуждането. В зоните на полюсния накрайник с най-голямо насищане индукцията достига до стойности по-големи от 2 T, което значително ще намали магнитната проводимост в тази част от магнитната верига и съответно изисква увеличаване на м.д.н. на ВН.

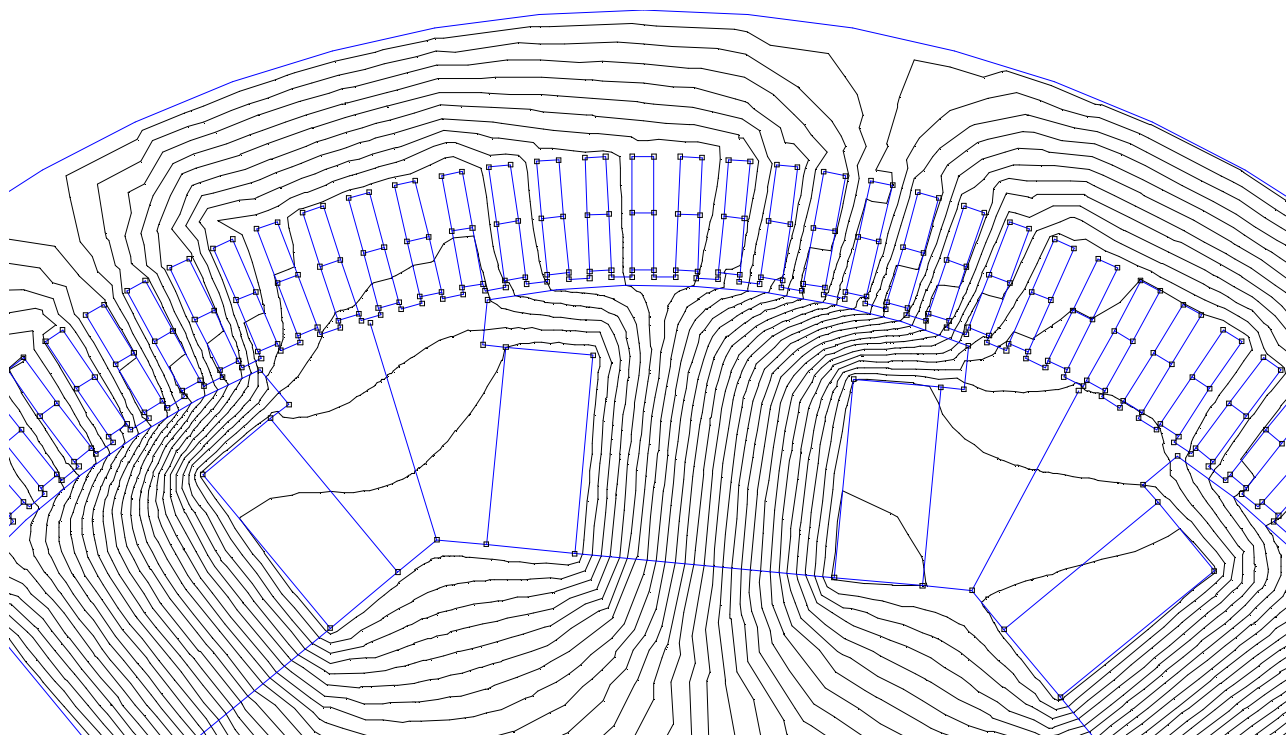
На фиг. 9 е показана функцията на пространствено изменение на потока на разсейване на един роторен полюс, където по абсцисната ос са нанесени стойностите на потока на разсейване, а по ордината-съответната координата по височинна на полюса спрямо неговата основа. Наклона на тази функционална зависимост спрямо абсцисната ос зависи от степента на насищане на роторния полюс като цяло.



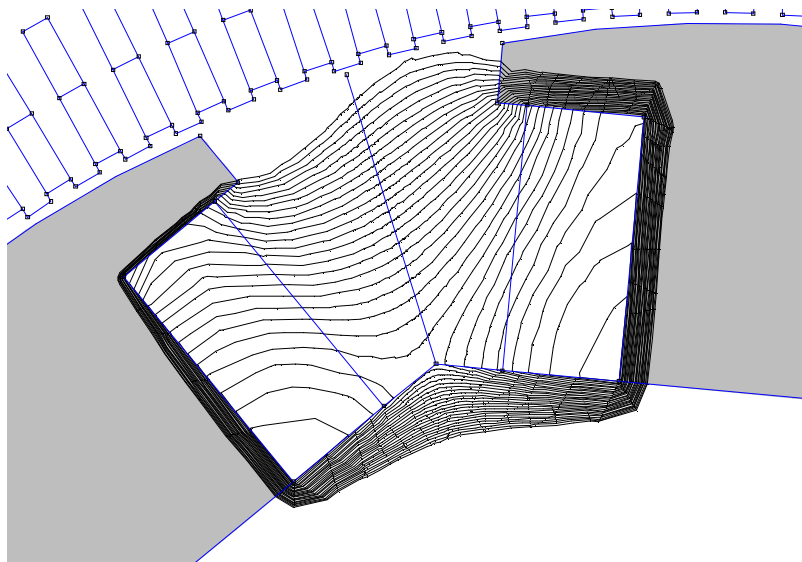
Фиг. 3. Разпределение на еквипотенциалните линии на магнитния вектор потенциал в режим на празен ход при синхронен хидрогенератор



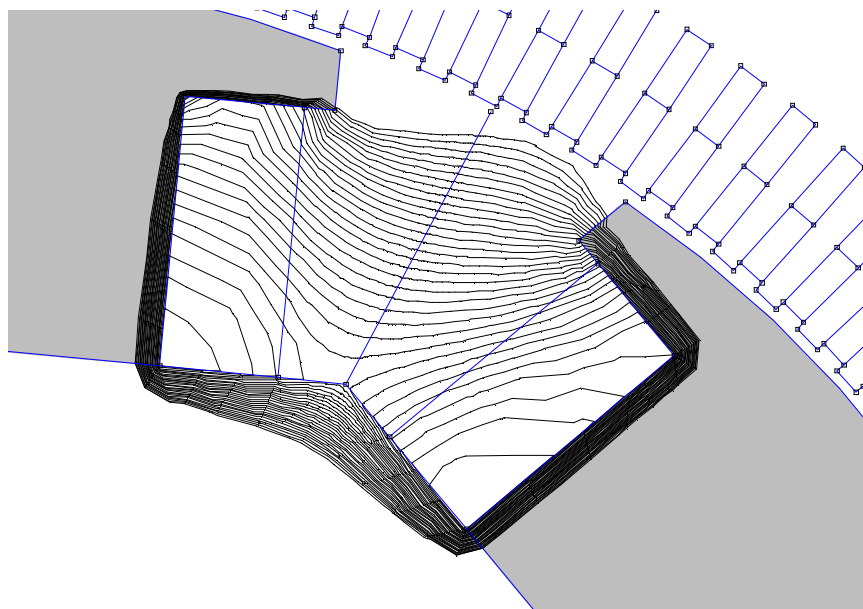
Фиг. 4. Разпределение на магнитния поток на разсейване на роторните полюси в режим на празен ход при синхронен хидрогенератор



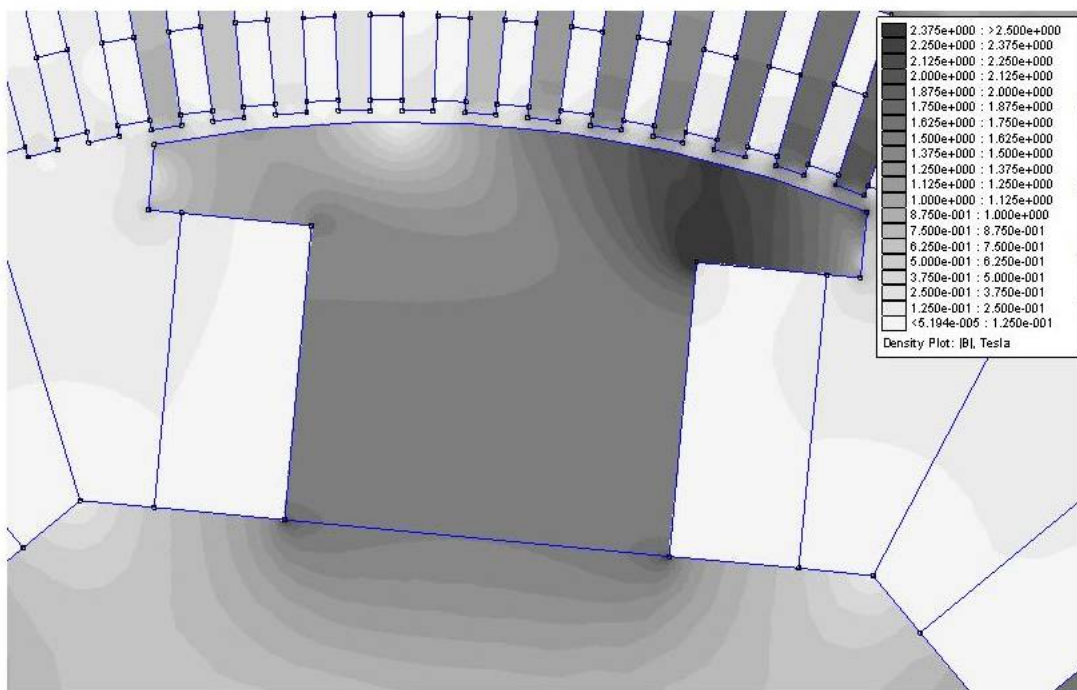
Фиг. 5. Разпределение на еквипотенциалните линии на магнитния вектор потенциал в режим на номинално натоварване синхронен хидрогенератор при $\cos\varphi = 0.8$ индуктивен



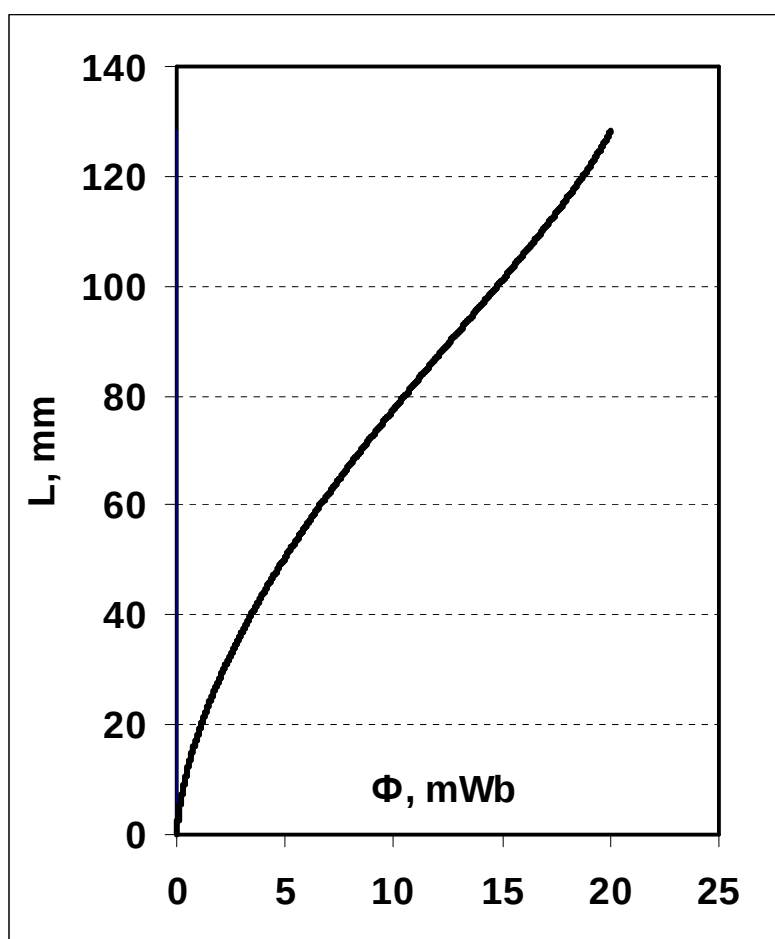
Фиг. 6. Разпределение на магнитния поток на разсейване на роторен полюс в режим на номинално натоварване – в предния край спрямо посоката на въртене



Фиг. 7. Разпределение на магнитния поток на разсейване на роторен полюс в режим на номинално натоварване – в задния край спрямо посоката на въртене



Фиг. 8. Разпределение на магнитната индукция в полюса при номинално натоварване



Фиг. 9. Функция на пространствено изменение на потока на разсейване на роторен полюс на синхронен хидрогенератор в номинален режим

5. Анализ на резултатите и заключение

Получената функция на пространствено разпределение на потока на разсейване дава възможност да се оцени степента на насищане на стоманата на полюсното тяло и полюсния накрайник. Наклона в началото се определя от насищането на тялото на полюса, докато наклона в горния край се определя от насищането на полюсния накрайник. Ако двата наклона са с характера, показан на фиг.9, това е показател, че степените на насищане в тялото и в накрайника са в съотношение, позволяващо получаване на минимално възможно м.д.н. за полюса, а оттам намаляване на съставката във възбудителния ток, съответстваща на това м.д.н. Като краен резултат се достига до намалява на необходимото сечение на ВН. Ако участъкът в горния край на тази зависимост е силно наклонен към абсцисната ос, то това е показател, че задната част на полюсния накрайник е силно наситена, в следствие на което потока на разсейване се е увеличил. В този случай е необходимо да се, направи коригиране на размерите на накрайника и ако е необходимо на полюсното тяло. Това е възможно да се извърши чрез програмния продукт за числено моделиране, като се променят неговите размери по такъв начин, че насищането в него да влезе в допустими граници. В последствие, с уточнените размери на накрайника и на полюсното тяло, се извършват проверочни електромагнитни изчисления за уточняване на възбудителния ток на хидрогенератора и размерите на ВН. Описаната по-горе процедура е възможно да се приложи интерактивно няколко пъти до като се локализира минимално възможната стойност на м.д.н. на полюса, без да е необходимо да се увеличават главните размери на хидрогенератора, а в следствие на това неговите габарити, тегло и цена.

Литература

- [1] Абрамов, А. И., А. В. Иванов-Смоленский, Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, Высшая школа, Москва, 2001.
- [2] Копылов, И. П. и др., Проектирование электрических машин, Высшая школа, Москва, 2005.
- [3] Копылов, И. П. Электрические машины, Изд. “Высшая школа”, Москва, 2000.
- [4] Шуйский, В. П. Расчет электрических машин, Изд. “Энергия”, Ленинград, 1968.
- [5] Силвесстер П, Шумилов Ю. Метод конечных элементов, Изд. “Мир”, Москва, 1969.
- [6] Guerin Chr. Modelisation de regions minces et prise en compte de la saturation des matériaux magnetiques en regme harmonique, these de 1’INPG, Laboratoire d’Electrotechnique de Grenoble, 1994.

Автори: доц. д-р Пламен Ризов, доц. д-р Димитър Сотиров, гл. ас. д-р Радослав Спасов – кат. „Електрически машини” при ТУ – София, маг. инж. Стоян Баташки - НЕК – ЕАД клон “ВЕЦ – група Родопи”-Пловдив

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХАРМОНИЧНИЯ СЪСТАВ НА Е.Д.Н. В АСИНХРОННИ ГЕНЕРАТОРИ ПОСРЕДСТВОМ МКЕ

Пламен Ризов, Димитър Сотиров, Стоян Баташки, Радослав Спасов

Резюме. Разработен е подход за анализ на висшите хармоници в асинхронни генератори чрез съчетано използване на МКЕ и FFT алгоритъм в средата на SIMULINK. Той е приложим още на етапа проектиране на генераторите, преди да е започнало тяхното производство. Изчислен е коефициента на телефонните хармоници THF, който е дефиниран в БДС EN60034-1.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE STATOR CURRENT REACTION OVER THE MAGNETIC FIELD IN THE ROTOR POLES OF SYNCHRONIC HYDRO GENERATORS WITH FEM

Plamen Rizov, Dimitar Sotirov, Stoyan Batashki, Radoslav Spasov

Abstract. An approach has been developed for numerical modeling of the magnetic field in synchronic generators under a nominal inductive load. From the resulting numerical solution is determined the magnetic flux linkage in distribution of the magnetic induction in it close to the real value. The results of the research allow the optimize the construction of the pole to avoid its high saturation.

1. Увод

В последните години се забелязва нарастване на броя на асинхронни генератори, работещи в микро ВЕЦ и вятърни електроцентрали. От гледна точка на експлоатация им, към тях се поставят изисквания за постигане на високи енергийни показатели, като к.п.д и $\cos\varphi$. По-високите стойности на к.п.д. са определени от изискването за по-добро използване на енергията на първичния източник на енергия. По-високите стойности на $\cos\varphi$ се налагат от необходимостта енергийната система да се разтовари от реактивна мощност. Освен това от гледна точка на удовлетворяване на изискванията за електромагнитна съвместимост, асинхронните генератори не трябва да са източник на хармоници на напрежение и ток, които да се предават в енергийната система на страната. Едновременното постигане на добри показатели за цитираните по горе изисквания не е възможно, тъй като при промяна на някои от конструктивните им параметри, енергийните показатели и хармоничният състав се променят в противоположни направления. Така например от теорията на асинхронните машини е известно, че намаляването на въздушната междина води до намаляване на намагнитващия ток, а от там до

увеличаване на $\cos\phi$. В същото време се засилва влиянието на зъбните хармоници както в индукцията във въздушната междина, така и в статорното е.д.н. при машини с не скосени статорни канали.

Целта на публикуваните в настоящия доклад изследвания е да се анализира наличието на хармоници в магнитната индукция и статорното е.д.н. посредством числено моделиране на магнитното поле в асинхронен генератор чрез метода на крайните елементи.

2. Модел за числено моделиране с МКЕ

Численият модел е разработен в съответствие с изискванията на програмният продукт, чрез който са направени изследванията. Изследваната област представлява напречното сечение в активната част на асинхронния генератор, което е перпендикулярно на оста му на въртене. Разглежда се случая на идеален празен ход, т.е. роторния ток е равен нула. Феромагнитните участъци от магнитната верига са моделирани чрез кривата на намагнитване на стомана М330-50А. Токовете в статорните фази са представени чрез поредица от моментни стойности за период от време, съответстващ на завъртането на един роторен канал на ъгъл равен на 5 статорни канални деления. Изходните моментни стойности на фазните токове се определят от положението на токовата звезда, както е показано на фиг. 2. В разглежданият момент от време и за всички следващи такива, магнитното поле се разглежда като стационарно. Във всеки следващ момент от време роторът се завърта на 0,5 геометрични градуса, а токовата звезда на съответните електрически градуси. Параметрите, геометричните размери и намотъчните данни на изследвания асинхронен генератор са дадени в таблица 1.

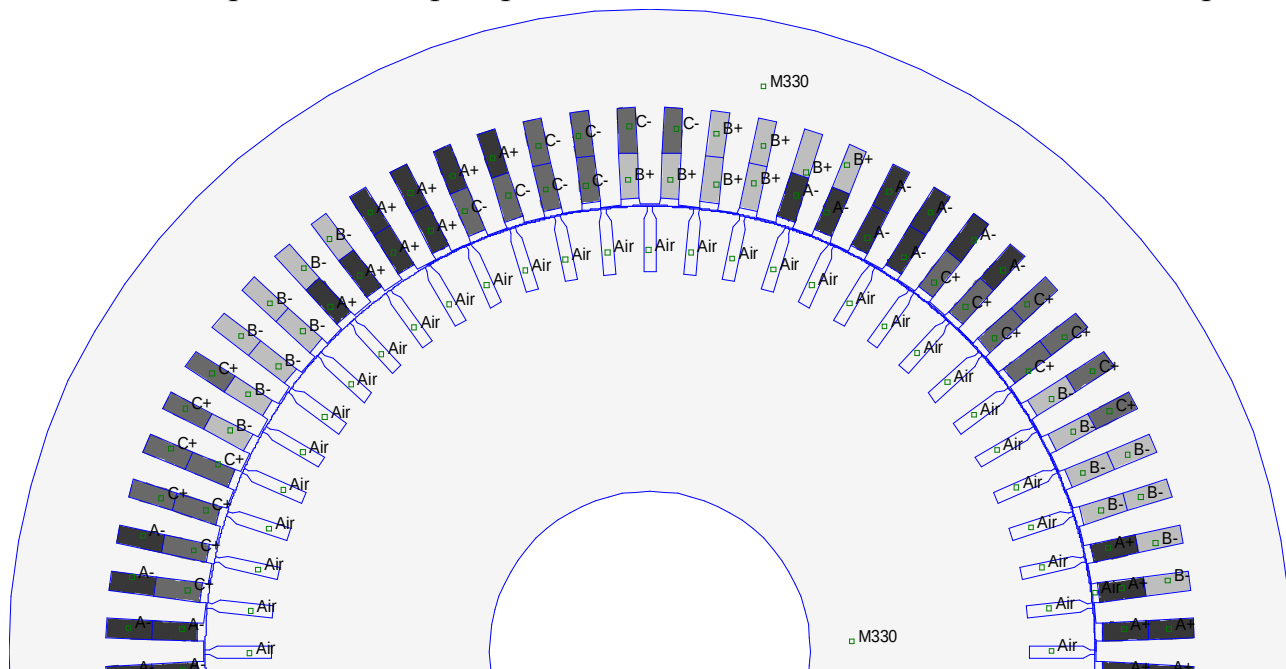
Таблица 1

Номинална активна мощност	750	kVA
Номинално напрежение	6300	V
Синхронна скорост на въртене	1000	min ⁻¹
Брой на статорните канали	72	-
Брой на роторните канали	60	-
Въздушна междина	1,3	мм
Външен диаметър на статорния магнитопровод	840	мм
Вътрешен диаметър на статорния магнитопровод	585	мм
Широчина на статорен канал	12,2	мм
Широчина на шлица на роторния канал	3	мм
Брой навивки за статорна фаза	168	-
Стъпка на статорната намотка	10	-
Свързване на статорната намотка	звезда	-

В средата на въздушната междина е поставена дъга с дължина равна на две полюсни деления. Тя се използва за получаване пространственото

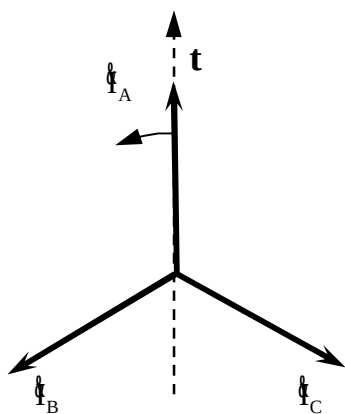
разпределение на магнитната индукция във въздушната междина. Моделирани са 60 последователни положения на ротора спрямо статора. За всяко от тях е получено пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина.

На фиг. 1 е показан изходния модел за числено моделиране на магнитното поле в асинхронния генератор, описан в таблица 1. Звездата на статорните



Фиг. 1. Модел за числено моделиране на магнитното поле в асинхронен генератор в началното положение на ротора

токове за това положение на ротора е показана на фиг. 2.

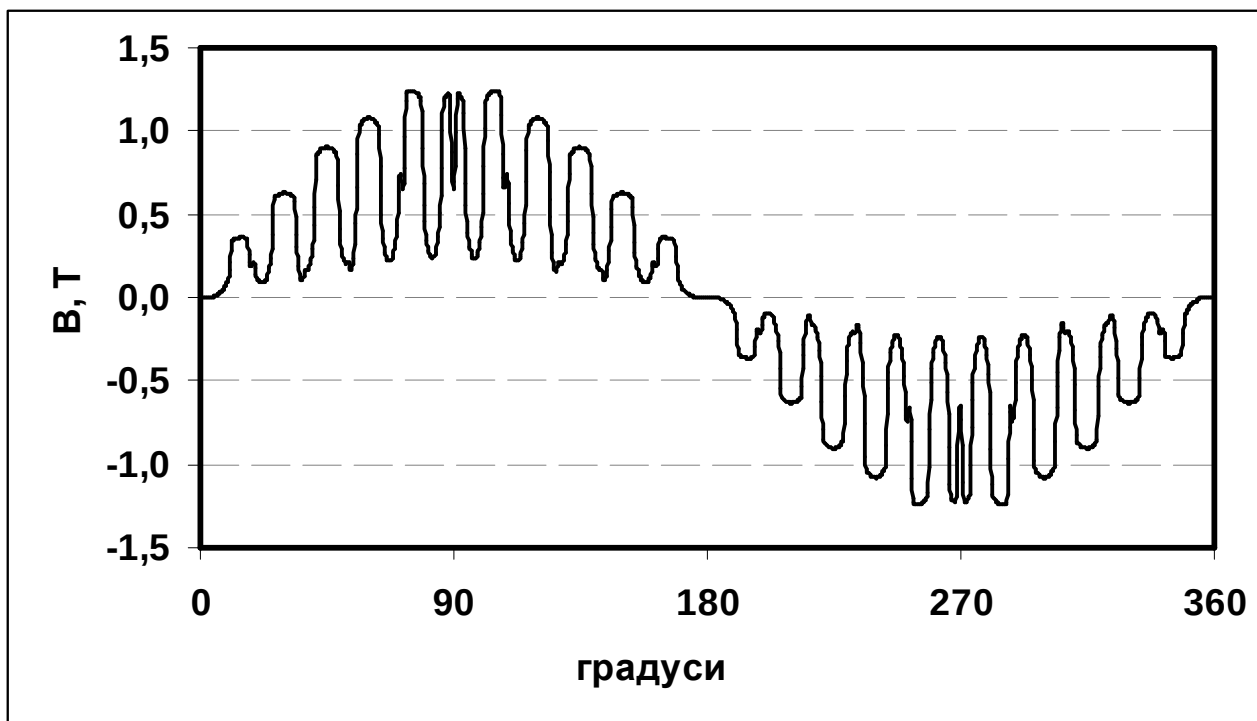


Фиг. 2. Положение на токовата звезда в началния момент от време t

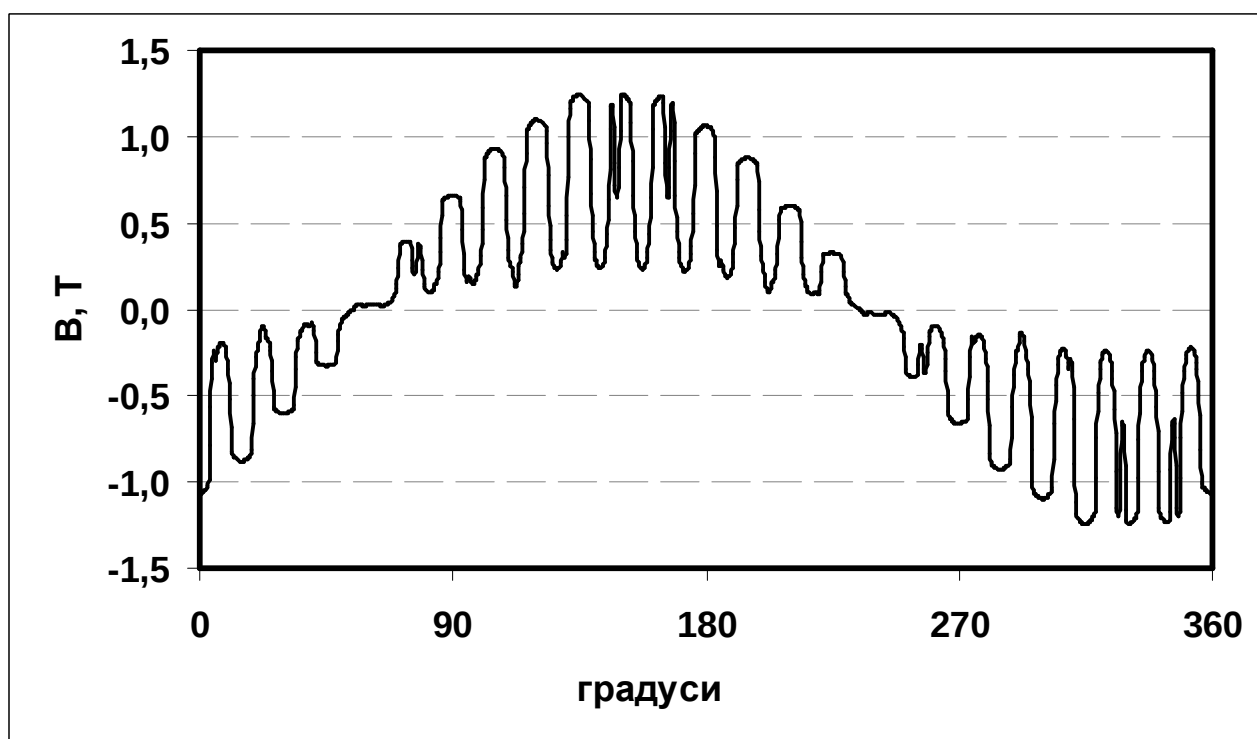
3. Резултати от численото моделиране

Пространственото разпределение на магнитната индукция при началното положение на ротора е показано на фиг. 3, където ясно е отразено влиянието на статорните и роторните канали върху разпределението на индукцията във въздушната

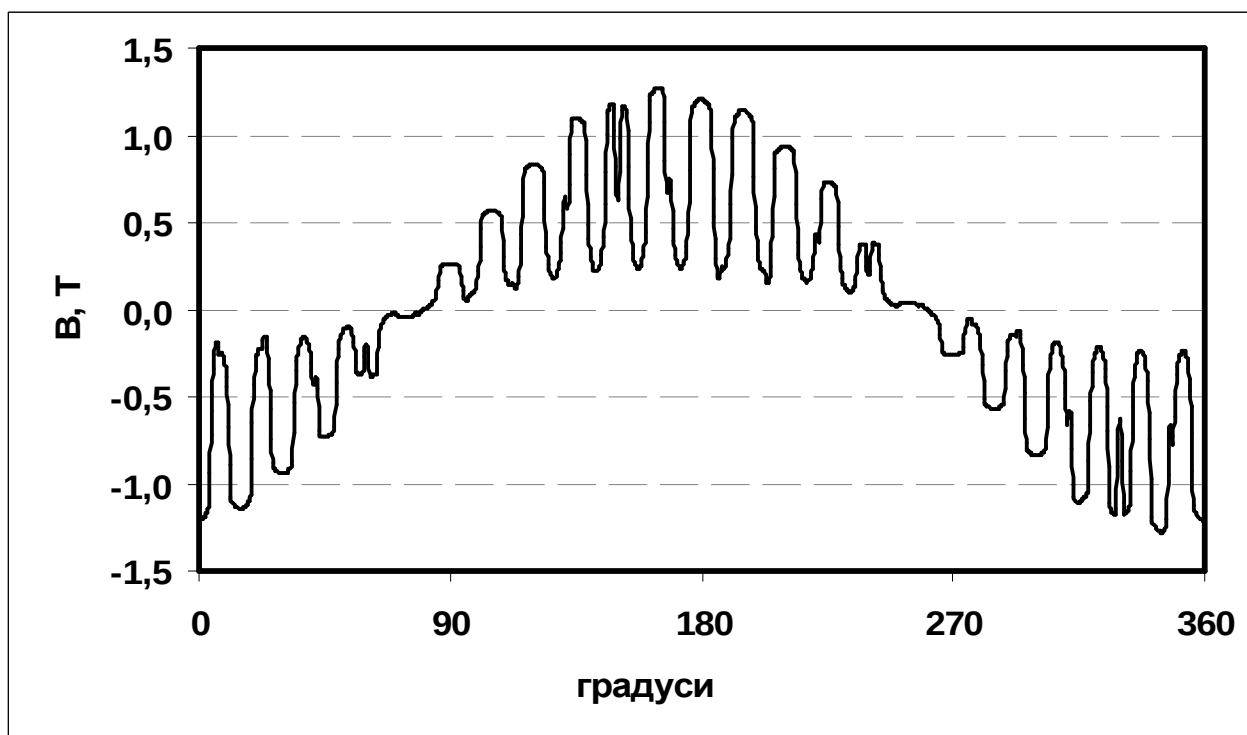
междина, На фиг. 4 и фиг. 5 са показани аналогичните резултати, съответстващи на завъртане на ротора съответно на 19,5 и на 26 градуса спрямо началното положение.



Фиг. 3. Пространствено разпределение на индукцията във въздушната междина при начално положение на ротора



Фиг. 4. Пространствено разпределение на индукцията във въздушната междина при завъртане на ротора на 19,5 градуса



Фиг. 5. Пространствено разпределение на индукцията във въздушната междина при завъртане на ротора на 26 градуса

Аналогични пространствени разпределения са получени за всички останали положения на ротора спрямо статора и съответните им моментни стойности на статорните токове. Анализът им показва, че показаните на фиг. 3, фиг. 4 и фиг. 5 криви са характерни за пространственото разпределение на магнитната индукция във въздушната междина при зададеното съотношение на броя на статорните и роторните канали и техните размери. Разпределението на индукцията във въздушната междина за останалите положения има аналогичен характер.

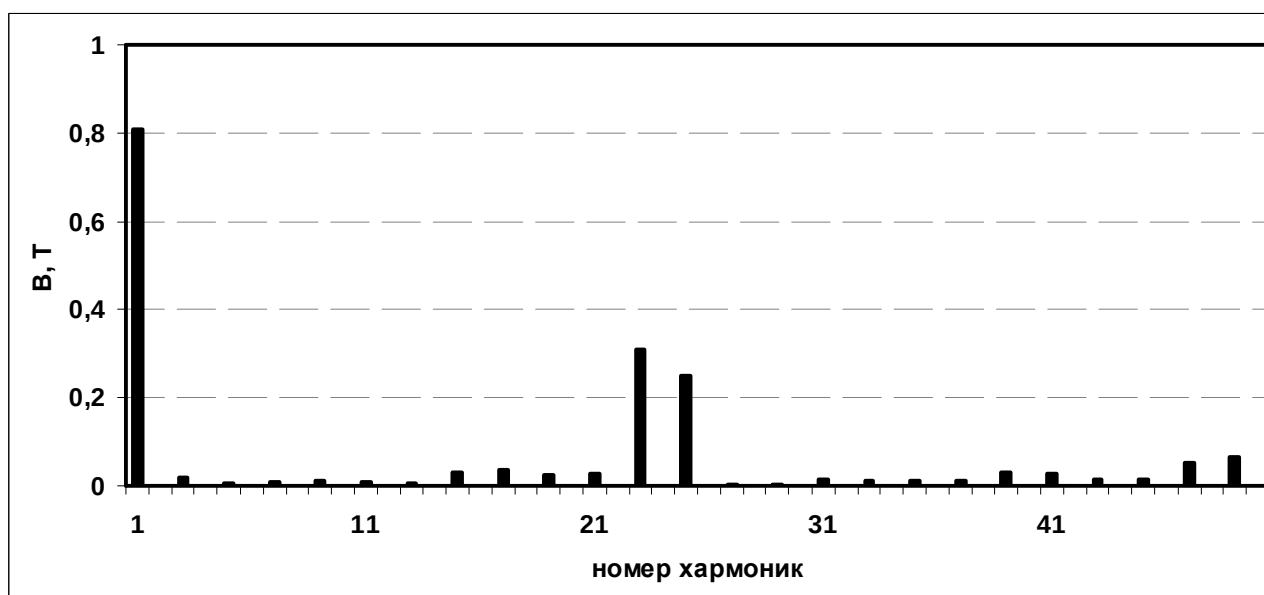
3. Хармоничен анализ на пространственото разпределение на магнитната индукция

Хармоничният анализ на пространственото разпределение на магнитната индукция от типа показан на фиг. 3, фиг. 4 и фиг. 5 за всички последователни положения на ротора е извършен с числен модел разработен в средата на SIMULINK.

На фиг. 6 е показана бар-диаграма на хармоничния състав на магнитната индукция в изходното положение на ротора. Тъй като зъбния хармоник от първи порядък е с четен номер, той не съществува в бар-диаграмата, като съседните му нечетни хармоници 23 и 25 са силно изразени. Впечатление прави значимото присъствие на хармоници с номера 19 и 21. Техните номера са най-близките числа до броя на роторните канали в два полюса – 20. В този смисъл



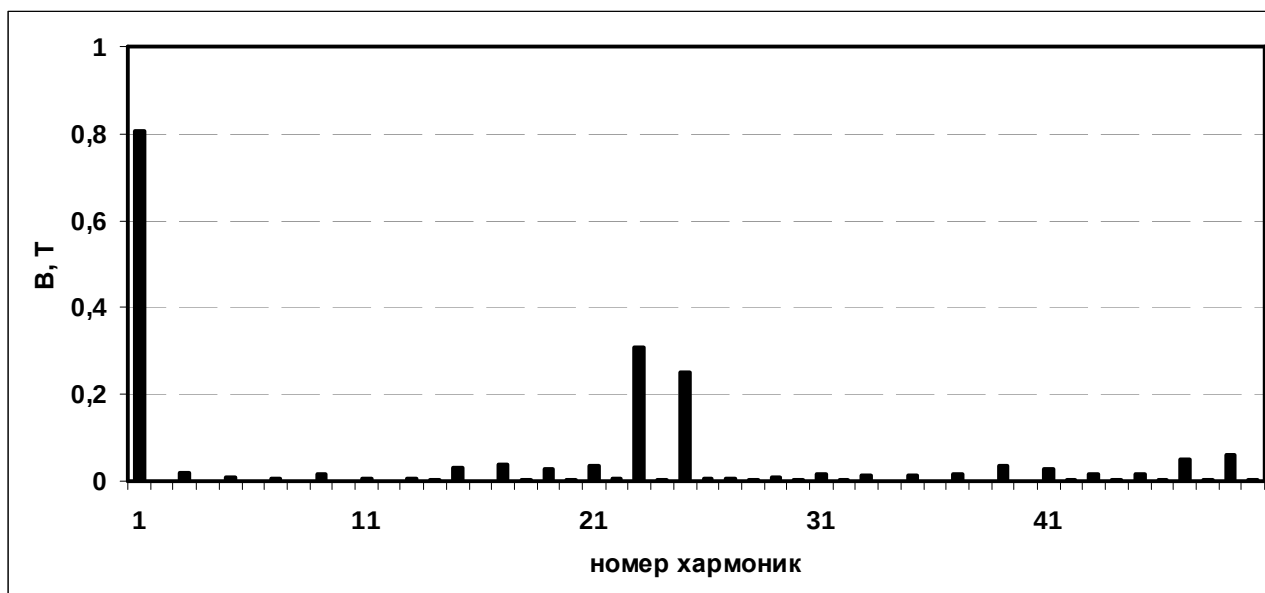
Фиг. 6. Хармоничен спектър на индукцията във въздушната междина при началното положение на ротора



Фиг. 7. Хармоничен спектър на индукцията във въздушната междина при заяъртане на ротора на 19,5 градуса

тези хармоници също може да се разглеждат като зъбни, дължащи се на наличието на зъби и канали в ротора на асинхронната машина. Стойността на индукцията за тези хармоници е съответно 0,04 и 0,05 Т. От фиг.6 се вижда, че значими стойности имат и хармониците от втори порядък с номера 39 и 41- роторни и 47 и 49 – статорни. Хармониците с посочените по-горе номера са преобладаващи и в бар-диаграмите за останалите положения на ротора, като стойностите им слабо се влияят от положението на ротора. Съществуват висши хармоници, които при някои положения на ротора също имат значимо

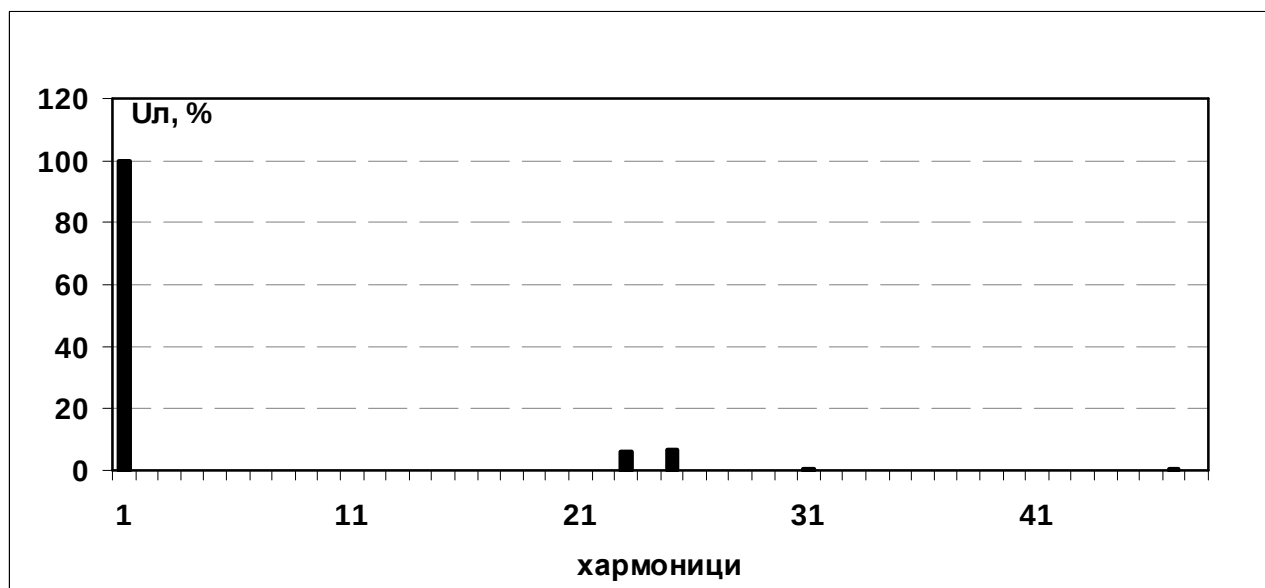
присъствие – такива са хармониците с номера 15 и 17, показни на фиг. 7 и фиг. 8.



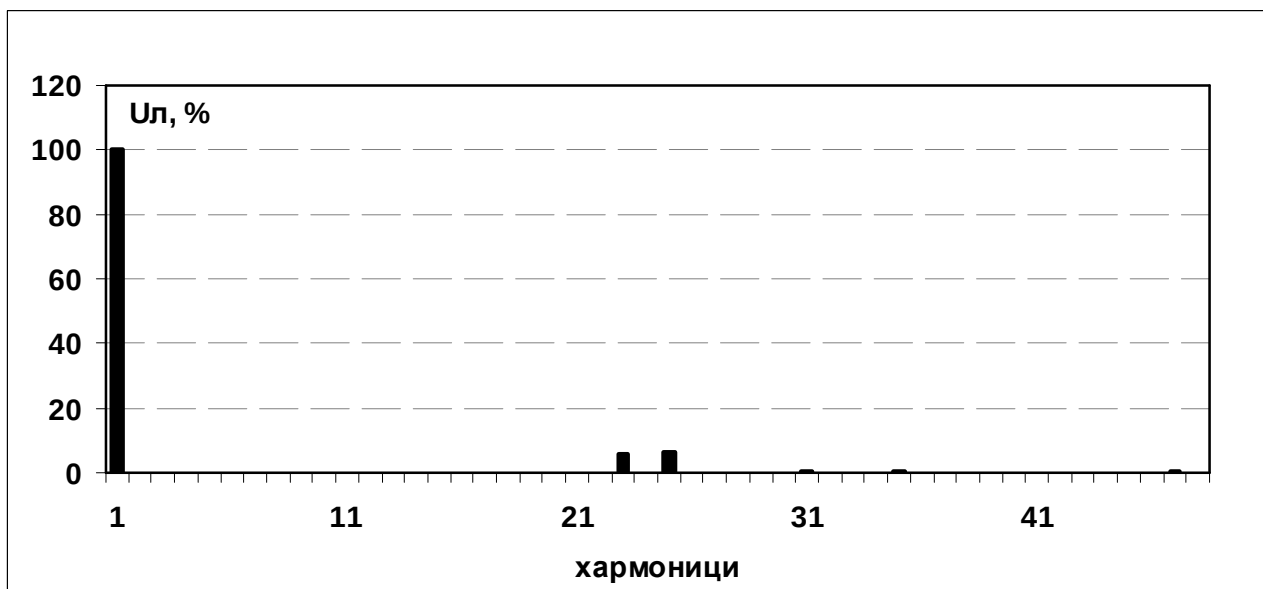
Фиг. 8. Хармоничен спектър на индукцията във въздушната междина при завъртане на ротора на 26 градуса

4. Хармоници на е.д.н.

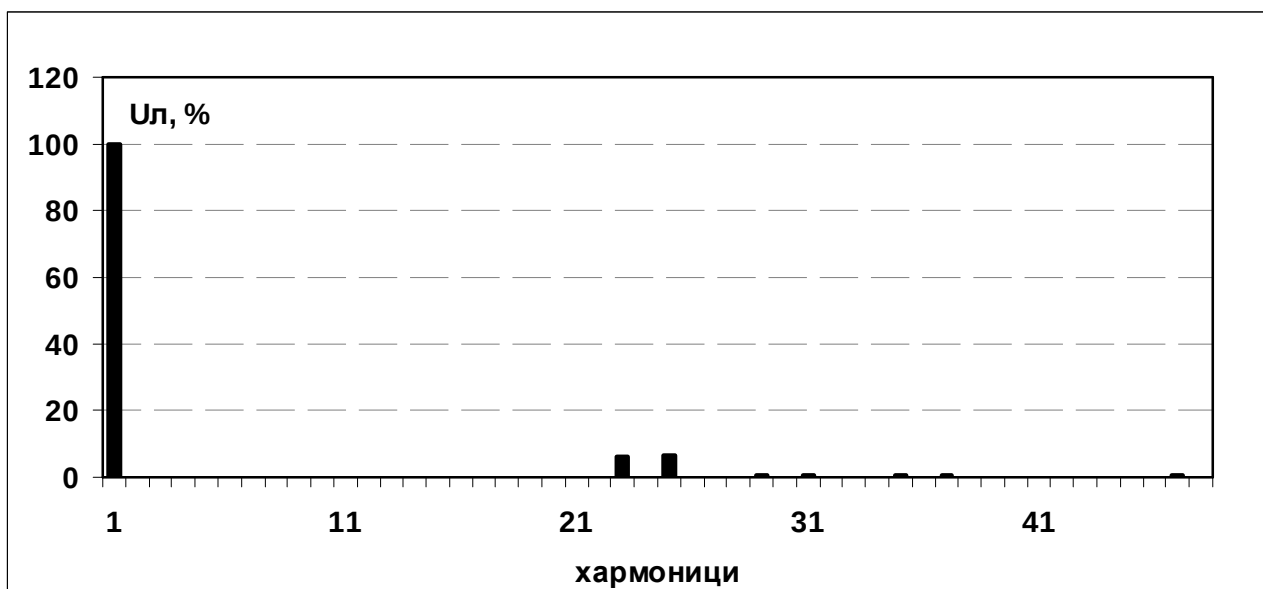
Хармониците на е.д.н. на статорните фази се изчисляват от хармониците на магнитната индукция съгласно [1]. От тях в последствие се изчисляват и хармониците на линейните е.д.н. на статорната намотка Хармоничният състав на статорните линейни е.д.н. са показани на фиг. 9, фиг. 10 и фиг. 11. За всички останали положения на ротора са получени съответните хармонични спектри.



Фиг. 9. Хармоничен спектър на статорно е.д.н. при началното положение на ротора



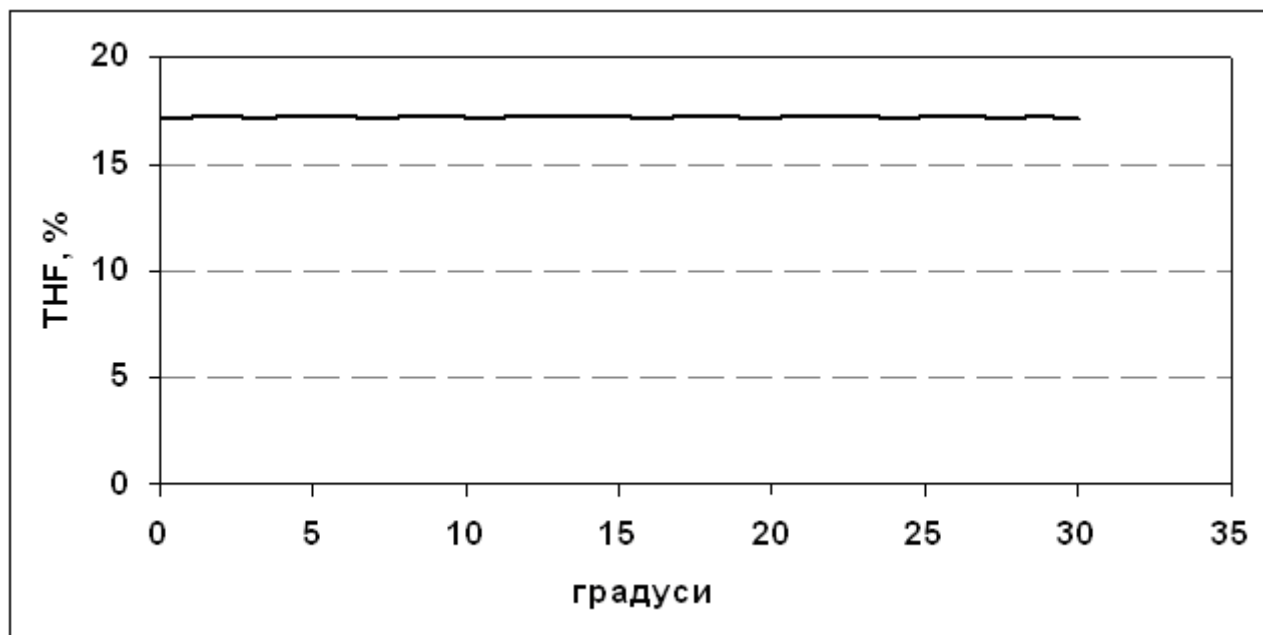
Фиг. 10. Хармоничен спектър на статорно е.д.н. при завъртане на ротора на 19,5 градуса



Фиг. 11. Хармоничен спектър на статорно е.д.н. при завъртане на ротора на 26 градуса

От хармоничните спектри се определя коефициента на телефонните хармоници THF, в който хармониците в зависимост от честотата им участват с различни коефициенти на тежест, съгласно [6], за всички положения на ротора в изследвания интервал. Зависимостта на коефициента THF от положението на ротора е показана на фиг. 12. От тази фигура ясно личи, че коефициентът на

телефонните хармоници THF почти не зависи от положението на ротора спрямо статора.



Фиг. 12. Зависимост на THF от положението на ротора спрямо статора

5. Анализ на резултатите и заключение

Получените хармонични спектри на магнитната индукция във въздушната междина и на статорните линейни е.д.н. показват, че в зависимост от положението на ротора спрямо статора на генератора спектралния състав слабо се променя. Основна тежест в него имат хармониците, дължащи се на наличието на зъби и канала в ротора и статора. Съществуват и хармоници, които имат значимо присъствие, но те се появяват само при определено положение на ротора спрямо статора. Резултатите за коефициента на телефонните хармоници THF показват, че в зависимост от положението на ротора той се изменя в тесни граници. За разглеждания асинхронен генератор получените стойности за коефициента на телефонните хармоници THF са извън допустимите граници, което се дължи на комбинацията от малка въздушна междина и отворени статорни канали. Постигането на коефициент на телефонните хармоници THF в допустими граници в този случай е възможно или чрез скосяване на статорните канали, или чрез използване на дробно число брой канали за полюс и фаза с подходяща стойност.

Разработеният подход за анализ на висшите хармоници в асинхронни генератори чрез съчетано използване на МКЕ и FFT алгоритъм в средата на SIMULINK позволява на ниво проектиране да се оцени съответствието на хармоничния състав с изискванията на стандартите и да се вземат необходимите конструктивни мерки ако е необходимо. Това е особено важно поради завишените изисквания за електромагнитна съвместимост.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абрамов, А. И., А. В. Иванов-Смоленский, Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, Высшая школа, Москва, 2001.
- [2] Копылов, И. П. и др., Проектирование электрических машин, Высшая школа, Москва, 2005.
- [3] Копылов, И. П. Электрические машины, Изд. “Высшая школа”, Москва, 2000.
- [4] Шуйский, В. П. Расчет электрических машин, Изд. “Энергия”, Ленинград, 1968.
- [5] Силвестер, П, Шумилов Ю. Метод конечных элементов, Изд. “Мир”, Москва, 1969.
- [6] Guerin Chr. Modelisation de regions minces et prise en compte de la saturation des materiaux magnetiques en regme harmonique, these de l'INPG, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 1994.
- [6] БДС EN60034-1+A1+A2:2001. ВЪРТЯЩИ СЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ, част 1: Обявени данни и работни характеристики.

Автори: доц. д-р Пламен Ризов, доц. д-р Димитър Сотиров, гл. ас. д-р Радослав Спасов – кат. „Електрически машини” при ТУ – София, маг. инж. Стоян Баташки - НЕК – ЕАД клон “ВЕЦ – група Родопи”-Пловдив.

ЧИСЛЕНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА ЛАГЕРИТЕ НА СИНХРОНЕН ВЕТРОГЕНЕРАТОР

Димитър Сотиров, Михо Михов, Радослав Спасов

Резюме. По данни на конструкторска документация е построен топлинен модел в средата на програмен продукт за числено пресмятане на стационарни топлинни полета **Mirage.01**. Моделът съдържа детайлите, които имат непосредствено влияние върху топлинното състояние на лагерите. Влиянието на другите конструкционни елементи се отчита посредством граничните условия. Представени са резултатите от изчисленията и са направени изводи и препоръки относно лагерните възли по отношение на загряването им.

NUMERICAL DETERMINATION OF SYNCHRONOUS WINDGENERATOR'S BEARING TEMPERATURE

Dimitar Sotirov, Miho Mihov, Radoslaw Spasow

Abstract. According to constructors data it is developed a thermal model with the help of specialized software for numerical calculations of stationary thermal fields **Mirage 1.0** (Steady-State Finite Element Heat Conduction Solver). The model contains details that have direct impact on the thermal state of the bearings, while the influence of the other structural elements is taken into account by the boundary conditions. In the paper are presented specific calculations; conclusions are drawn and we have prepared recommendations about the warming of the bearing knots.

1. Увод

Обект на изследване е синхронен ветрогенератор с постоянни магнити в ротора. Номиналните му данни са както следва:

Брой на полюсите /в ротора/ - $2p = 80$

Брой на статорните зъби - $Z_1 = 96$

Синхронна скорост на въртене на ротора - $n = 14.3 \text{ min}^{-1}$

Честота на напрежението / на генератора / - $f = 9.53 \text{ Hz}$

Отдавана електрическа мощност - $P_n = 3170 \text{ kW}$

Загуби в предния лагер - $p_{л1} = 500 \text{ W}$

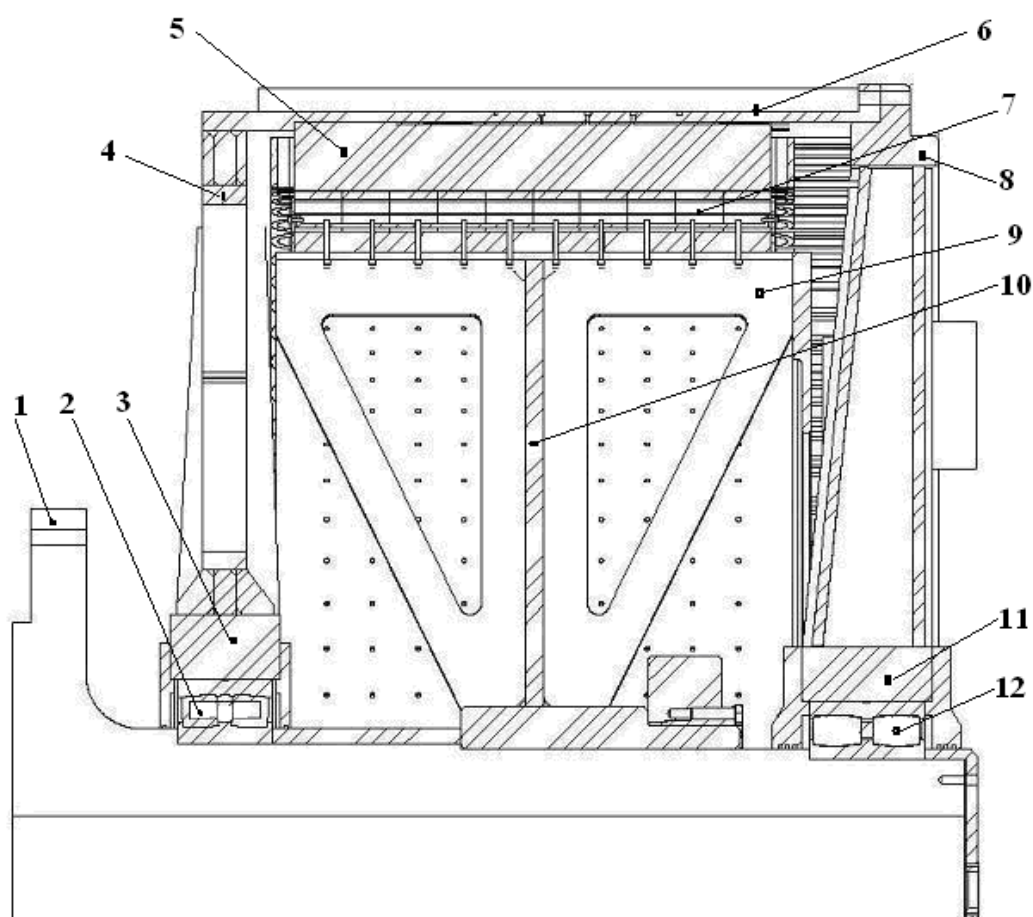
Загуби в задния лагер - $p_{л2} = 1080 \text{ W}$

Загубите в ротора и статора на генератора в зависимост от натоварването, необходими за изчисленията са дадени в Таблица 1

Необходимите геометрични размери за построяване на топлинния модел на конструкцията на машината са взети от предоставената конструкторска документация.

Таблица 1

	P	kW	792.5	1855.0	2377.5	3170.0
	V вятър	m/s	6.8	8.8	9.7	12.0
Загуби в статора	P_{Cu}	kW	1.31	10.86	35.98	75.84
	P_{Fe зъби}	kW	14.79	14.79	14.79	14.79
	P_{Fe ярем}	kW	5.57	5.57	5.57	5.57
Загуби в ротора	P_{Fe зъби}	kW	0.02	0.02	0.02	0.02
	P_{Fe ярем}	kW	1.84	1.84	1.84	1.84
	P магнити	kW	0.28	0.62	0.94	1.13



Фиг. 1. Напречен разрез на синхронен ветрогенератор с постоянни магнити.

1 – вал с фланец; 2- преден лагер; 3 – лагерна втулка на предния лагер;
 4 – преден лагерен щит; 5 – статорен магнитопровод; 6 – корпус; 7 – полюси на ротора; 8 – заден лагерен щит; 9 - укрепващи ъглови ребра на роторната звезда; 10 - диск с отвори на роторната звезда; 11 - лагерна втулка на задния лагер; 12 - заден лагер

Конструкцията на ветрогенератора е показана на фиг. 1. Статорният магнитопровод е шихтован от отделни сегменти и е закрепен в стоманен корпус заварена конструкция с външно оребвяване. Роторът е с постоянни магнити с магнитни концентратори (магнитно меки полюсни накрайници), като механичната връзка с вала се осъществява чрез роторна втулка към вала и роторна звезда, съставена от диск с отвори, укрепващи ъглови ребра и роторен

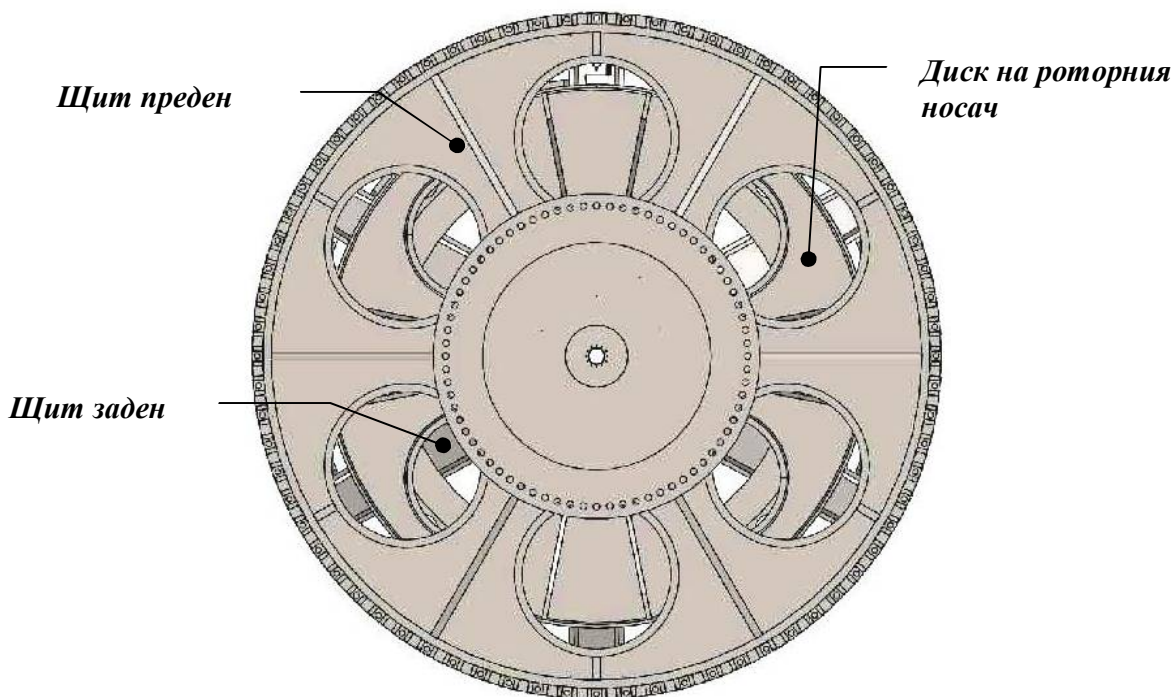
венец. Взаимното разположение на ротора и статора се осигурява чрез лагерни щитове.

Задача на изследването

Да се определи температурата на лагерите и да се прецени целесъобразността от допълнителни мерки за охлаждане на лагерните възли.

2. Обосновка на избрания подход за решение на задачата

Пространствената форма на конструкцията /фиг. 1,2/, при която предният лагерен щит е диск с шест кръгли отвора, а задният /по-натоварения/ - кръстовина с шест пирамидални ребра, както и присъствието на роторен носач - диск с четири кръгли отвора, прави трудно приложим, а оттам и неприемлив аналитичния метод на топлинните заместващи схеми. За това се предлага използването на числен подход за решаване на уравнението на топлинното поле, съчетан с CAD - среда, в която изследваната конструкция може да бъде представена с приемливо съответствие. Такава възможност предоставя програмен продукт **Mirage** /Л.1/, осъществяващ числено решение на диференциалното уравнение на стационарното топлинно поле по метода на крайните елементи на обекти изобразени графично в работната му среда с формат 2d. При тези съществени облекчения акцентът в работата е вярното определяне, като вид и параметри, на граничните условия.



Фиг. 2. Изглед от към работния край на вала на синхронен ветрогенератор с постоянни магнити

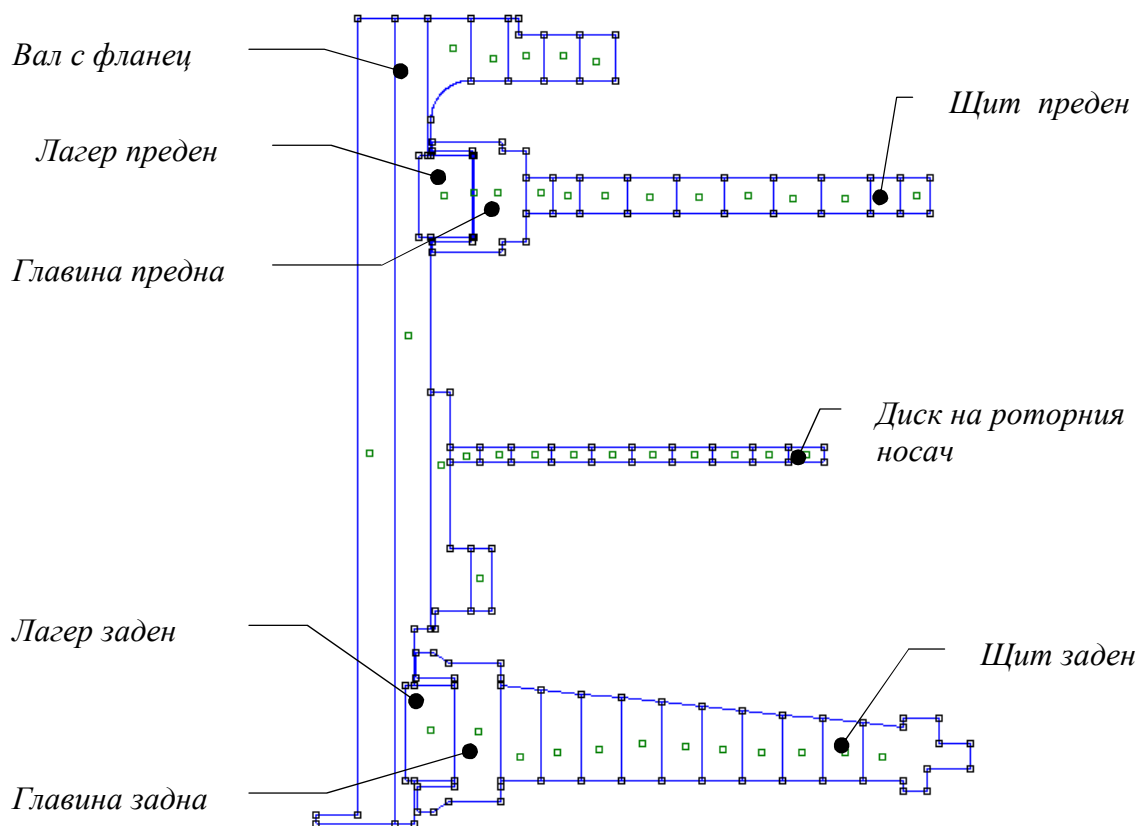
Друго изключително съществено предимство, освен свободния достъп до софтуерния продукт, е възможността за скриптиране при работа, както в препроцесора /входните данни/, така и в постпроцесора при извличането и обработката на резултатите. Това създава изчислителен комфорт в процеса на изследването, когато се проследява влиянието на даден входен параметър върху наблюдаваната величина.

Решение на задачата

А/ Графична част, материали и гранични условия на топлинния модел

Както вече бе посочено, графичното изображение се изработва със стремеж за съответствие с реалната конструкция на машината. За нуждите на изобразяването от конструкторската документация се определят координатите на необходимите точки. Там където това е невъзможно непосредствено, те се получават като общи решения на уравненията на съответните пресичащи се криви.

Графичната част на модела на изследваната машина е представена на фиг. 3.



Фиг. 3. Изображение на изследваната конструкция в препроцесора на **Mirage**

Ротационната конструкция и основателното предположение, че по обиколката ѝ температурата е практически неизменна $/dT/dr=0/$ дават възможност задачата да се определи като осисиметрична, решима в средата на **Mirage**.

Остава въпросът с отворите в предния щит, в диска на роторния носач и ребрата на задния щит. Той се решава с помощта на корекционни коефициенти $k_1(l_i)$, с помощта на които се коригират параметрите специфична топлопроводност l_i [W / m⁰K] /в **Mirage** – коефициентите K_r и K_z / и коефициента на топлоотдаване a_i [W / ⁰K m²] /в **Mirage** – коефициента h /. Тези коефициенти са определени в други публикации на авторите на основата на равенството на топлинните потоци при действителната и при изобразената в **Mirage** конструкции. Така за необходимите параметри се получава:

$$(1) \quad K_i = l_i k_1(l_i)$$

Коефициентът на топлоотдаване чрез конвекция и лъчение / Л.2,3,6/ е :

$$(2) \quad h_i = a_0 (1 + k_0 V_B) k_2(l_i)$$

където:

$a_0 = 14.2 [W/m^0K]$ - за топлоотдаващи повърхности в електрически машини
 $k_0 = 0.1$

V_B - резултантна скорост на охлаждащия въздух

$$(3) \quad V_B = \sqrt{V_a^2 + V_t^2}$$

V_a - аксиална съставка на скоростта на въздуха, в случая от евнтуална принудителна вентилация

V_t - тангенциална съставка на скоростта на въздуха на разстояние R_i от оста на въртене на ротора, в случая предизвикана от въртенето му с ъглова скорост Ω :

$$(4) \quad V_{t\ i} = \omega R_i$$

Очевидно посочените параметри K_r , K_z , h са различни даже в рамките на един детайл, което трябва да се отрази в модела. За целта детайлите се секционират на достатъчно голям брой елементи, като към всеки от тях се прикрепят съответните характеристики на материала и граничните условия свързани с топлоотдаването, предполагайки, че в границите на елемента те имат постоянни стойности. Това е показано на фиг.3 .

С оглед нуждите на изследването в модела са предвидени следните възможности за задаване на гранични условия:

- по периферията на предния и задния лагерни щитове, температурата е предписана /зададена/ - обстоятелство, което се определя от връзката им с тялото на машината.

- предните /външни за околороторното пространство/ повърхности на предната главина и предния лагерен щит могат да бъдат принудително обдухвани, т.е. там $V_{a\ np} \geq 0$, $V_t = 0$

- задните /външни за околороторното пространство/ повърхности на задната главина и задния лагерен щит могат да бъдат принудително обдухвани, т.е. там $V_{a\text{ зад}} \geq 0$, $V_t = 0$

- повърхностите в околороторното пространство се обдухват само поради въртенето на ротора, т.е. за тях $V_a = 0$, а $V_{t_i} = \omega R_i \neq 0$. Изключение е направено само за вътрешната част на задната главина, тъй като, поради сравнително нарядко разположените ребра се допуска, че охлаждащия въздух от принудителната вентилация достига /само/ до нея.

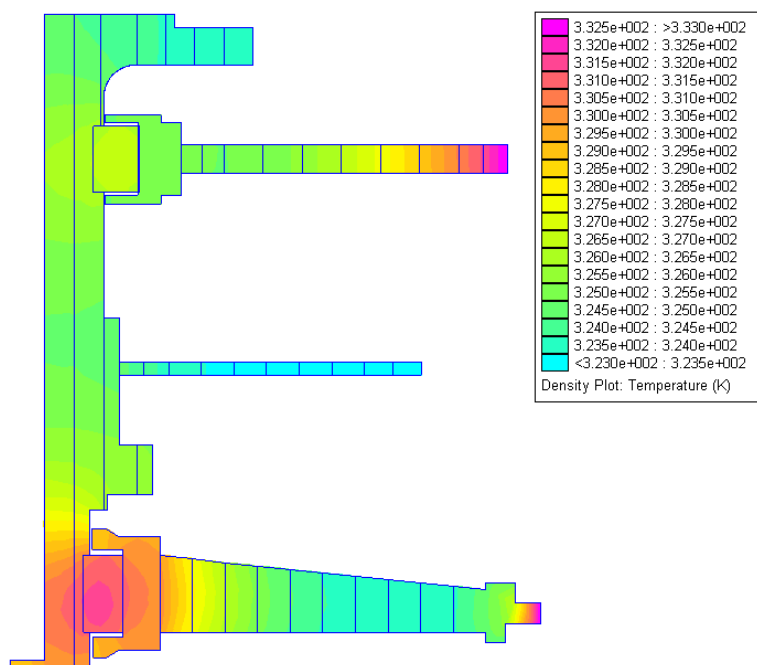
- приема се, че по радиуса на щита аксиалната съставка на скоростта на въздуха на принудителната вентилация се изменя обратно пропорционално на големината му /т.е. намалява/.

На основата на предварително направени ориентировъчни разчети температурата на въздуха във вътрешността на машината при зададените в Таблица 1 загуби се приема $T_{\text{втр}} = 323 \text{ [} ^\circ\text{K]} / t_{\text{втр}} = 50 \text{ [} ^\circ\text{C]} /$, при температура отвън $T_{\text{ок}} = 313 \text{ [} ^\circ\text{K]} / t_{\text{ок}} = 40 \text{ [} ^\circ\text{C]} /$.

От горното се вижда, че нагласата при изготвяне на модела е той да дава “песимистични” резултати, т.е. по-високи стойности на интересующите ни температури на лагерите.

Б/ Резултати от изчисленията

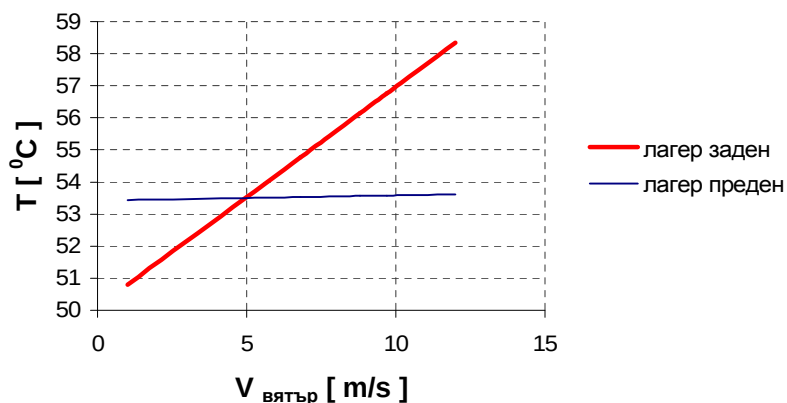
Изчисленията са направени в съответствие с поставената задача – при какви условия температурата на лагерите не надминава определена допустима стойност, от порядъка на $65 \text{ [} ^\circ\text{C]} /$.



Фиг. 4. Изображение на топлинното поле на изследваната конструкция в постпроцесора на **Mirage**

Всички резултати са получени без принудителна вентилация на лагерните възли. Изключение от това условие са само резултатите представени на фиг. 7, където е направено изследване при различни стойности на скоростта на охлаждащия въздух при обдухване на задния лагерен възел.

На фиг. 5 е показано изменението на температурата на предния и задния лагери в зависимост от скоростта на вятъра, задвижващ перката на генератора, която е показател за аксиалното натоварване.



Фиг. 5

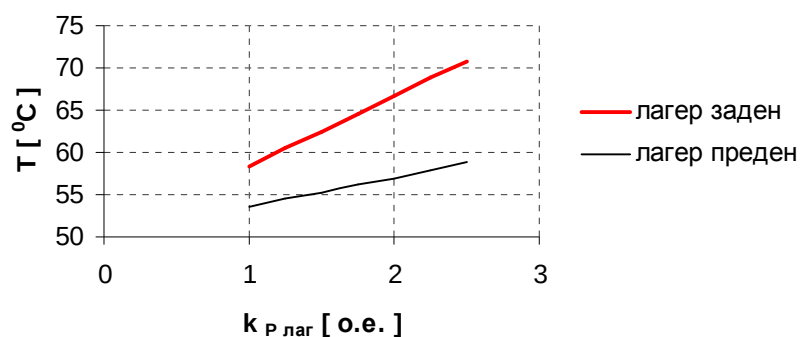
В случая, тъй като предният лагер е ролков, цилиндричен и не поема аксиален товар, загубите в него са постоянни, независещи от скоростта на вятъра /съответно натоварването на генератора/, така че температурата му остава практически неизменна при всички режими на работа. Както се вижда от фигурата тя е в допустимите граници за нормална експлоатация.

Задният лагер е аксиално – радиален, и загубите в него нарастват с нарастването на аксиалния товар, който е пропорционален на скоростта на вятъра, съответно на натоварването на генератора. Вижда се, че в областта на предвидените натоварвания, температурата му е под допустимата.

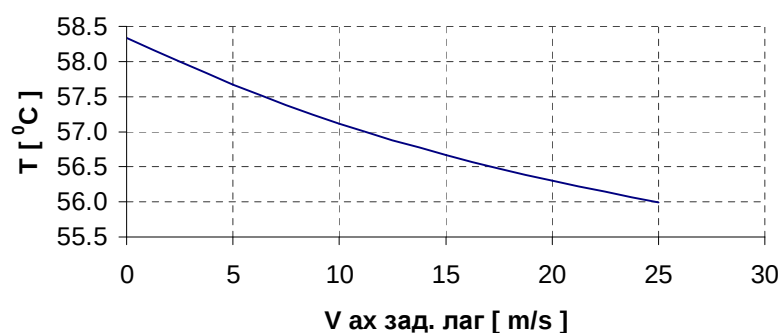
На фиг. 6 са показани резултатите от изчисленията на температурата на лагерите при едно условно едновременно нарастване на загубите по отношение на тези в номинален режим изразено със стойността на коефициента $k_{p\text{ЛАГ}} = p_{\text{Л1i}}/p_{\text{Л1}} = p_{\text{Л2i}}/p_{\text{Л2}}$. Вижда се, че граничната стойност на температурата за задния лагер се получава при 80 % претоварване, докато предният не е застрашен в изследвания интервал.

Графичната зависимост на фиг. 7 дава информация по въпроса за целесъобразността от допълнителна принудителна вентилация на задния /по-натоварения/ лагер. Поради близките температури на охлажданото тяло и охлаждащата среда / по вътрешния контур на охлаждане / ефективността на принудителната вентилация се свежда до намаление на температурата с не повече от 3 $^{\circ}\text{C}$.

На фиг. 8 и фиг. 9 са показани възможностите за представяне на още резултати от постпроцесора на **Mirage**, в случая - изменението на температурите във вала успоредно на оста му, в щитовете и роторния носач.



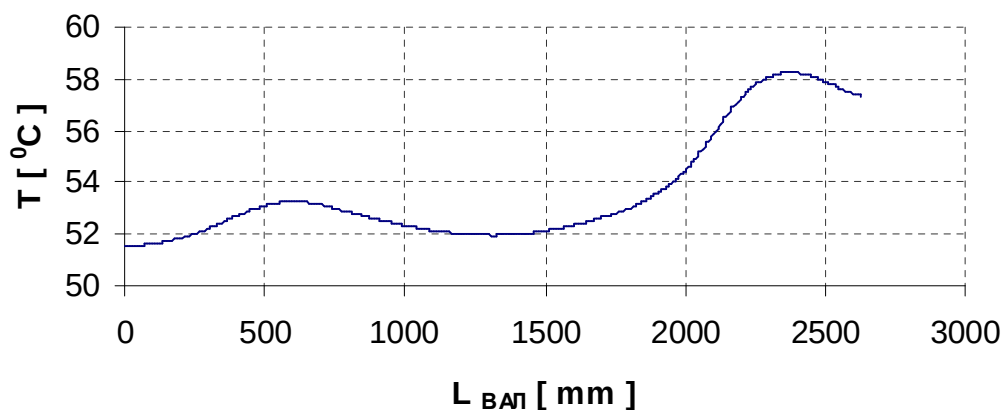
Фиг. 6



Фиг. 7

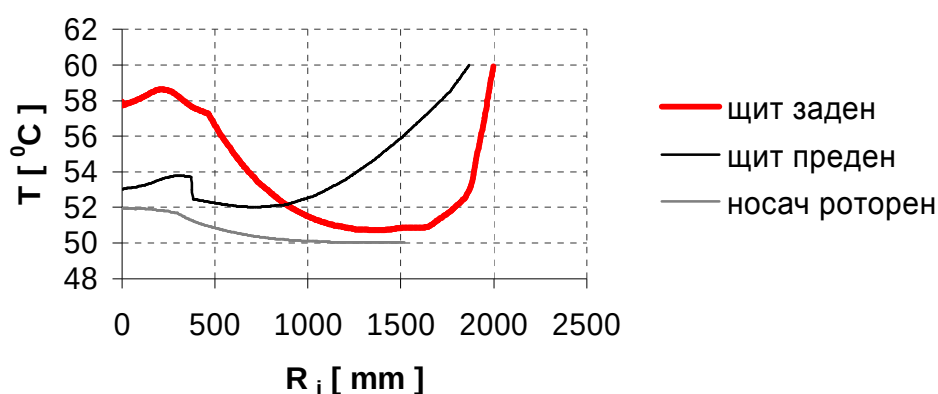
На фиг. 8 се виждат два локални максимума на температурата на вала, които се намират под предния лагер (разстояние от началото на вала 550-650 mm, температура 53,3°C), съответно под задния лагер (разстояние от началото на вала 2250-2450 mm, температура 58,3°C). В зоната между тези максимуми температурата на вала е близка до околната, така че топлообмен между предния и задния лагерен възел практически не се извършва.

Горната констатация се потвърждава и от характера на изменението на температурата на предния лагер при промяна на топлинното състояние на задния, показано на фиг. 4.



Фиг. 8

В изменението на температурата в предния лагерен щит се наблюдава доста рязък преход /фиг. 9/ в зоната на лагерната главина. Това се дължи на изолационната втулка около външната лагерна черупка, предназначена да прекъсне контура на индуктирани токове през вала, лагерните възли и корпуса. Тяхното действие предизвиква електрокорозионно разрушаване на контактните повърхнини на лагерите, поради което се използва изолационната втулка. Коефициентът на топлопроводност на втулката е с два порядъка (0.45/50) по-малък от този на материала на конструкцията на лагерите и главината.



Фиг. 9

3. Заключение

Разработена е методика за определяне на загряването на лагерните възли на въртящи се електрически машини, в случая на синхронен ветрогенератор, която позволява да се оцени топлоотдаването през конструктивните елементи (лагерните щитове и кръстовини със сложна геометрична форма), свързани с лагерните възли и вала на машината. Освен това методиката позволява да се оцени необходимостта и ефективността от форсирано въздушно охлаждане на лагерния възел. Може да се направи важния извод, че без вземане на специални мерки за по-добро топлоотдаване ефективността на външното обдухване на лагерния възел е ниска.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Meeker, D. **Mirage** 1.0, Steady-State Finite Element Heat Conduction Solver, Users' Manuel, 2005.
- [2] Копилов, И. и кол.. Проектиране на електрически машини, Техника, С., 1988.
- [3] Сергеев, П. и кол. Проектирование электрических машин, Энергия, М., 1969.

[4] Брандиски, К., И. Ячева. САD системи в електромагнетизма. С., Сиела, 2002.

[5] Ячев И., И. Маринова. Ръководство за лабораторни упражнения по числени методи и моделиране на вериги и полета. ч. I, София, 2007.

[6] Йовчев. М и кол. Справочник по енергетика – ТОПЛОТЕХНИКА, ч. I, АБС Техника, 1999.

Автори: доц. д-р Димитър Сотиров, доц. д-р Михо Михов, гл.ас. д-р Радослав Спасов – кат. „Електрически машини”

Авторите изказват благодарност на проф. д.т.н. Иван Ячев за оказаната компетентна помощ.

ЧИСЛЕНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА КОТВЕНАТА НАМОТКА НА СИНХРОНЕН ВЕТРОГЕНЕРАТОР

Михо Михов, Димитър Сотиров

Резюме. По данни на конструкторска документация са построени топлинни модели на статорната намотка в средата на програмен продукт за числено пресмятане на стационарни топлинни полета **Mirage.01**. Направени са модели за случай на действително разпределение на изолирания профилен проводник на намотката и за случай на заместването му с еквивалентен в топлинно отношение еднороден материал. Изследванията са направени при различни размери на охлаждащите външни ребра. Представени са резултатите от изчисленията и са направени изводи относно влиянието на посочените фактори върху стойностите на температурите на свързаните с намотката участъци на машината.

NUMERICAL DETERMINATION OF ARMATURE WINDING OF SYNCHRONOUS WINDGENERATOR'S TEMPERATURE

Miho Mihov, Dimitar Sotirov

Abstract. According to constructors data there are developed thermal models of stator winding with the help of specialized software for numerical calculations of stationary thermal fields **Mirage 1.0** (Steady-State Finite Element Heat Conduction Solver). The models are designed in two working regimes - actual distribution of insulated profile wire of the coil and in case of replacing it with the equivalent in terms of thermal sense homogeneous material. In addition, there are performed studies according to different sizes of external cooling gills. The calculation results and conclusions are drawn regarding the influence of presented above factors over the associated with the machine winding sections temperature values.

1. Увод

Обект на изследване е котвената намотка на синхронен ветрогенератор с постоянни магнити в ротора. Номиналните му данни са както следва[Л.1]:

Брой на полюсите /в ротора/ - $2p = 80$

Брой на статорните зъби - $Z_1 = 96$

Синхронна скорост на въртене на ротора - $n = 14.3 \text{ min}^{-1}$

Честота на напрежението / на генератора / - $f = 9.53 \text{ Hz}$

Отдавана електрическа мощност - $P_n = 3170 \text{ kW}$

Загуби в предния лагер - $p_{л1} = 500 \text{ W}$

Загуби в задния лагер - $p_{л2} = 1080 \text{ W}$

Загубите в ротора и статора на генератора в зависимост от натоварването, необходими за изчисленията са дадени в Таблица 1

Необходимите геометрични размери за построяване на топлинния модел на конструкцията на машината са взети от предоставената конструкторска документация.

Таблица 1

	P	kW	792.5	1855.0	2377.5	3170.0
	V_{вятър}	m/s	6.8	8.8	9.7	12.0
Загуби в статора	P_{Cu}	kW	1.31	10.86	35.98	75.84
	P_{Fe зъби}	kW	14.79	14.79	14.79	14.79
	P_{Fe ярем}	kW	5.57	5.57	5.57	5.57
Загуби в ротора	P_{Fe зъби}	kW	0.02	0.02	0.02	0.02
	P_{Fe ярем}	kW	1.84	1.84	1.84	1.84
	P_{магнити}	kW	0.28	0.62	0.94	1.13

Конструкцията на ветрогенератора е представена в [Л.1]. Статорният корпус /фиг. 1/ е заварена стоманена конструкция с външно оребвяване, а статорният магнитопровод е набран (шихтован) от сегменти от листова електротехническа стомана. На фиг.2. са показани отделни сегменти от статора със секции на статорната (котвената) намотка.



Фиг. 1. Статор на синхронен ветрогенератор с постоянни магнити в ротора /без котвена намотка/

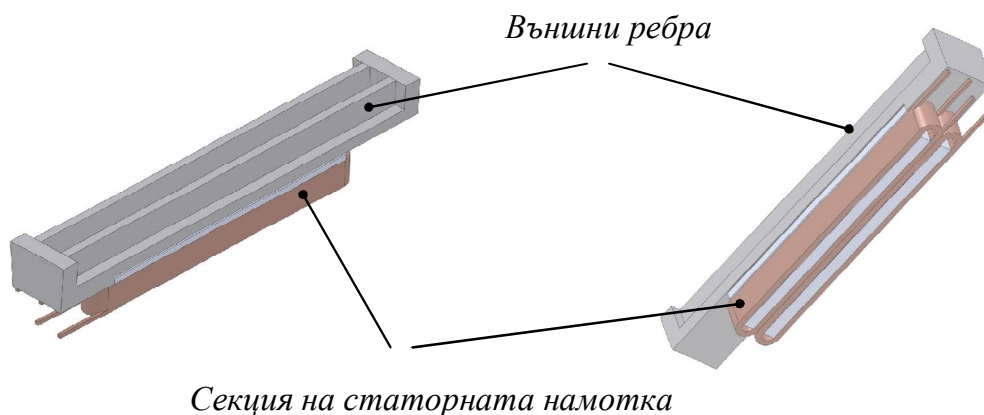
Котвената намотка е съставена от секции с 14 навивки, изпълнени с 8 паралелни профилни изолирани проводника с размери $a \times b = 2.8 \times 8.5 \text{ mm}$ и дебелина на изолацията $\Delta_{из} = 0.15 \text{ mm}$, разпределени в 8 стълба / $n_x = 8$ / и четиринайсет реда / $n_y = 14$ / - фиг.2.

Използваните в моделите стойности на коефициента на топлопроводност λ на материалите /в **Mirage** – коефициентите K_X и K_Y /, предоставени от разработчика са дадени в Таблица 2.

Таблица 2

Материал	λ
	W / m ⁰ K
Конструкционна стомана	50.0
Мед на проводника	400.0
Електротехническа /Si/ стомана	22.6
Изолация на проводника	0.4 - 0.5

Предоставени са конструкторски варианти с външни охлаждащи ребра с размери (височина/ширина): $h/b = 100/40 \text{ mm}$ и $h/b = 65/28 \text{ mm}$.



Фиг. 2. Статорни сегменти на синхронен ветрогенератор с постоянни магнити в ротора

Задачи на изследването

- Да се определи температурата на котвената намотка и да се оцени влиянието на предложените две системи ребра.
- Да се съпоставят резултатите от изследването за стойностите на температурите при действителния строеж на котвената секция при изобразени в модела профилни проводници с размери, посочени по-горе и в случай на замяната им с еднороден материал с коефициенти K_X и K_Y определени по зависимостите в [Л. 3,4].

2. Обосновка на избрания подход за решение на задачата

Сложната и разнородна конструкция на изследвания обект – статорен сегмент съдържащ статорните зъби, секции от котвената намотка, ярем и корпус с външни ребра изисква използването на числен подход за решаване на

уравнението на топлинното поле, съчетан с CAD - среда, в която тази конструкция може да бъде представена с приемливо съответствие. Такава възможност предоставя програмен продукт **Mirage** [Л.2], осъществяващ числено решение на диференциалното уравнение на стационарното топлинно поле по метода на крайните елементи на обекти изобразени графично в работната му среда с формат 2d. В тази посока благоприятно влияе голямата стойност на отношението между надлъжните и напречните размери на статорния сегмент, което дава достатъчно основание да се смята, че температурното поле е плоскопаралелно практически по цялата му дължина.

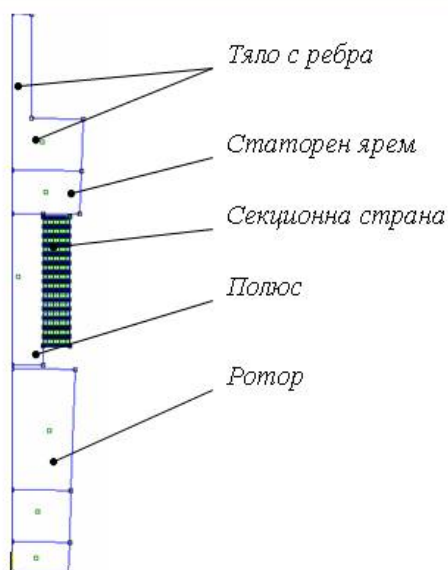
Друго изключително съществено предимство на **Mirage**, както вече беше посочено в [Л.1], освен свободния достъп до софтуерния продукт, е възможността за скриптиране при работа, както в препроцесора /входните данни/, например, при задаване на различни стойности на топлинните загуби при различното натоварване, така и в постпроцесора, при извличането и обработката на резултатите, например, при изследване на разпределението на температурата в n_x стълба и n_y реда на активната страна на секцията.

Решение на задачата

А/ Графична част, материали и гранични условия на топлинния модел

Както вече бе посочено, графичното изображение се изработва със стремеж за съответствие с реалната конструкция на машината. За нуждите на изобразяването от конструкторската документация се определят координатите на необходимите точки. Там където това е невъзможно непосредствено, те се получават като общи решения на уравненията на съответните пресичащи се криви.

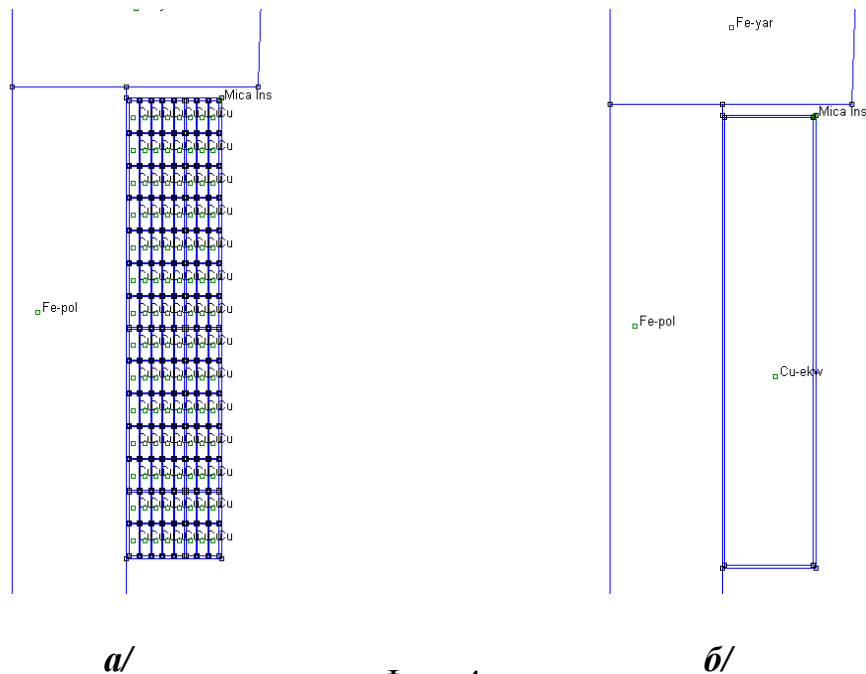
Примерна графичната част на модела на изследваната машина е представена на фиг. 3.



Фиг. 3

Конструкцията на статорния сегмент и предположението, че топлинното поле е плоскопаралелно определят задачата като “Planar”, според терминологията в **Mirage** т.е. решава се в Декартова координатна система.

На фиг. 4 са показани фрагменти от изследваните модели, на които са изобразени секционни страни съдържащи съответно действителния брой изолирани проводници – изображение а/ и еквивалентния в топлинно отношение еднороден материал – изображение б/



Фиг. 4

Коефициентът на топлопроводност $l_{рез}$ за втория случай се определя по зависимост дадена в [Л. 3,4]

$$(1) \quad l_{рез} = \frac{\sum_{i=1}^m d_i}{\sum_{i=1}^m \frac{d_i}{l_i}},$$

където d_i, l_i са дебелина и коефициент на топлопроводност на i -тия материал по посока на разпространение на топлинния поток.

За разглеждания случай резултатните коефициенти на топлопроводност K_X и K_Y по осите X и Y ще бъдат съответно:

$$(2) \quad K_X = l_X = \frac{a + 2\Delta_{ИЗ}}{\frac{a}{l_{Cu}} + 2\frac{\Delta_{ИЗ}}{l_{ИЗ}}}$$

$$(3) \quad K_Y = l_Y = \frac{b + 2\Delta_{ИЗ}}{\frac{b}{l_{Cu}} + 2\frac{\Delta_{ИЗ}}{l_{ИЗ}}}$$

При зададените по-горе стойности на необходимите параметри от зависимости (2) и (3) се получава $K_X = 4.602$ [W/m⁰K] и $K_Y = 12.792$ [W/m⁰K].

Коефициентът на топлоотдаване чрез конвекция и лъчение / Л.2,3,6/ е :

$$(4) \quad h_i = a_0 (1 + k_0 V_0)$$

където:

$$a_0 = 14.2 [W/m^0K] \quad - \text{ за топлоотдаващи повърхности в електрически}$$

машини

$$k_0 = 0.1$$

V_0 - скорост на охлаждащия въздух

За външната повърхност на тялото и ребрата скоростта V_0 е скоростта на вятъра от Таблица 1, а за вътрешните повърхности, където движението на въздуха се предизвиква от въртенето на ротора с ъглова скорост Ω тя е :

$$(5) \quad V = \Omega R_i$$

Специално за повърхностите в междината между намотката и тялото се приема песимистичния случай, че $V_0 = 0$, т.е естествена конвекция без принудителна вентилация.

На основата на предварително направени ориентировъчни разчети температурата на въздуха във вътрешността на машината при зададените в Таблица 1 загуби се приема $T_{\text{внр}} = 323$ [°K] / $t_{\text{внр}} = 50$ [°C]/, при температура отвън $T_{\text{ок}} = 313$ [°K] , / $t_{\text{ок}} = 40$ [°C] /.

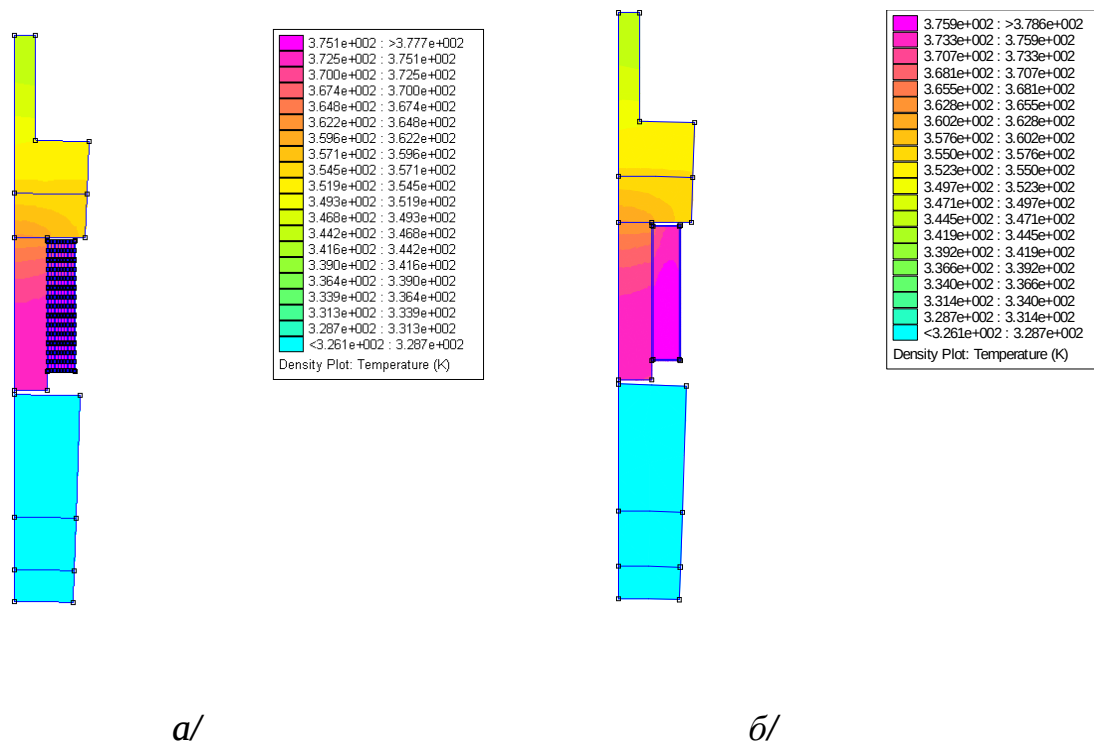
От горното се вижда, че нагласата при изготвяне на модела е той да дава “песимистични” резултати, т.е. по-високи стойности на интересуващите ни температури.

Б/ Резултати от изчисленията

Изчисленията са направени в целия диапазон на натоварване, показан в Таблица 1 в съответствие с поставените задачи – определяне на температурата на котвената намотка и съпоставяне с нормата за този клас на izolацията - $t_{\text{дон}} = 115$ °C или $T_{\text{дон}} = 388$ °K , както следва:

- при намотка съставена от изолирани проводници
- при намотка с еквивалентен в топлинно отношение еднороден материал
- горните случаи при ребра с размери $h/b = 100/40$ mm и $h/b = 65/28$ mm

Показани са примерни решения при секционна страна съдържаща съотвено действителния брой изолирани проводници – фиг. 5а/ и при еквивалентния в топлинно отношение еднороден материал – фиг.5б/.



Фиг. 5

Резултатите от изчисленията на средните температури на отделните възли и детайли за двата случая на намотката, при ребра с размери $h/b = 100/40 \text{ mm}$, за натоварвания на генератора 0,25; 0,5, 0,75 и 1,0 от номиналната му мощност (съответно скорости на въздуха 6,8; 8,8; 9,7 и 12 m/s), както и отклоненията между тях са представени в Таблицы 3,4,5.

Таблица 3

		Действително разпределение на проводника			
		Размери на охладителното ребро $h / b = 100/40$			
$V_{\text{въздух}} [\text{m / s}]$		6.8	8.8	9.7	12
Температура [°C]	- медта /стат./	58.06	63.58	79.13	102.57
	- изолацията /стат./	58.04	63.49	78.84	101.98
	- полюса /стат./	58.69	63.59	77.60	98.51
	- ярема /стат./	55.85	59.28	69.73	84.60
	- тялото /стат./	54.15	56.98	66.00	78.44
	- обща /стат./	56.52	60.58	72.56	90.03
	- обща /ротор/	52.31	52.67	53.01	53.22

Таблица 4

		"Еквивалентен" проводник			
		Размери на охлаждащото ребро $h / b = 100/40$			
Температура [°C]	$V_{\text{въздух}} [\text{m / s}]$	6.8	8.8	9.7	12
	- медта /стат./	58.13	63.75	79.56	103.40
	- изолацията /стат./	58.08	63.44	78.59	101.40
	- полюса /стат./	58.80	63.74	77.85	98.92
	- ярема /стат./	55.91	59.36	69.85	84.79
	- тялото /стат./	54.19	57.04	66.08	78.56
	- обща /стат./	56.23	59.98	71.21	87.38
	- обща /ротор/	52.31	52.67	53.01	53.22

Таблица 5

		Откл. между "действ." и "еквив."- $h / b = 100/40$			
		$\varepsilon \%$			
Температура [°C]	$V_{\text{въздух}} [\text{m / s}]$	6.8	8.8	9.7	12
	- медта /стат./	0.135	0.272	0.542	0.807
	- изолацията /стат./	0.063	-0.067	-0.311	-0.562
	- полюса /стат./	0.187	0.229	0.325	0.413
	- ярема /стат./	0.116	0.132	0.180	0.220
	- тялото /стат./	0.081	0.089	0.124	0.149
	- обща /стат./	-0.500	-0.990	-1.871	-2.944
	- обща /ротор/	0.000	0.000	0.000	0.000

Резултатите от изчисленията на средните температури на отделните възли и детайли за двата случая на намотката, при ребра с размери $h/b = 65/28 \text{ mm}$, както и отклоненията между тях са представени в Таблицы 6,7,8.

Таблица 6

		Действително разпределение на проводника			
		Размери на охлаждащото ребро $h / b = 65/28$			
Температура [°C]	$V_{\text{въздух}} [\text{m / s}]$	6.8	8.8	9.7	12
	- медта /стат./	59.14	64.92	81.21	105.74
	- изолацията /стат./	59.13	64.83	80.93	105.14
	- полюса /стат./	59.86	65.04	79.85	101.92
	- ярема /стат./	57.35	61.14	72.61	88.97
	- тялото /стат./	56.11	59.44	69.82	84.31
	- обща /стат./	58.13	62.64	75.83	95.12
	- обща /ротор/	52.31	52.67	53.01	53.22

Таблица 7

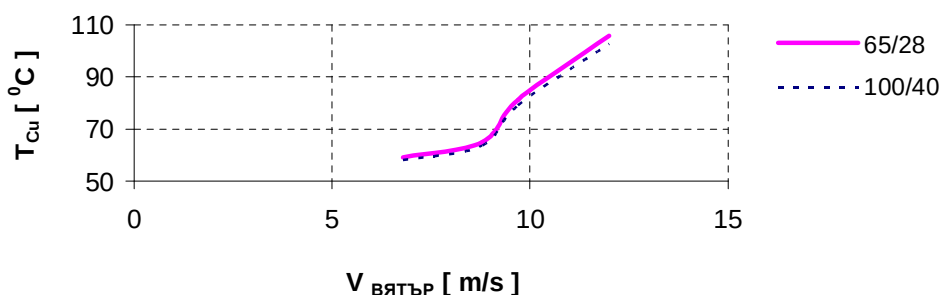
		"Еквивалентен" проводник			
		Размери на охладителното ребро h / b = 65/28			
V въздух [m / s]		6.8	8.8	9.7	12
Температура [°C]	- медта /стат./	59.22	65.10	81.65	106.57
	- изолацията /стат./	59.16	64.79	80.68	104.56
	- полюса /стат./	59.98	65.20	80.11	102.34
	- ярема /стат./	57.42	61.23	72.74	89.17
	- тялото /стат./	56.17	59.51	69.94	84.48
	- обща /стат./	57.97	62.17	74.66	92.74
	- обща /ротор/	52.31	52.67	53.01	53.22

Таблица 8

		Откл. между "действ." и "еквив." - h / b = 65/28			
		ε %			
Температура [°C]	V въздух [m / s]	6.8	8.8	9.7	12
	- медта /стат./	0.136	0.270	0.533	0.785
	- изолацията /стат./	0.065	-0.065	-0.303	-0.551
	- полюса /стат./	0.195	0.235	0.329	0.410
	- ярема /стат./	0.125	0.139	0.186	0.220
	- тялото /стат./	0.118	0.130	0.176	0.210
	- обща /стат./	-0.287	-0.743	-1.543	-2.510
	- обща /ротор/	0.000	0.000	0.000	0.000

Получените резултати показват, че във всички изчислени случаи средната температура на намотката не надвишава допустимата - $115^{\circ}C$.

Действително разпределение на проводника



Фиг. 6

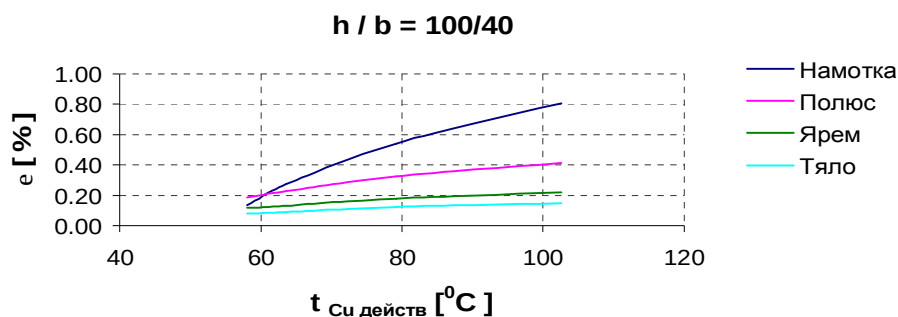
От таблиците и фиг. 6 се вижда, че при двата вида ребра резултатите за стойностите на средната температура на намотката при еднотипното ѝ представяне са много близки / $\Delta \approx 3^{\circ}C$ /, $(102.57/105.74)$, $(103.40/106.57)$, докато съотношението между обемите на вложения материал е $(100 \times 40) / (65 \times 28) = 2.197$. Съчетано с горния извод, това поставя под съмнение

целесъобразността от използването на по-големи ребра, ако за това няма и други съображения – якостни, например.

На фиг. 7 е представено отклонението между температурите на съответните възли и детайли, определени при действителния състав на секцията и при заместването му с еднороден материал /проводник/ с топлинни характеристики определени по (2) и (3).

Изводите относно приложимостта на замяната в случая са следните:

- колкото по-високи са температурите толкова по-голямо е отклонението
- отклонението във всички разглеждани случаи не надвишава 0.8%
- от проектантска гледна точка резултатът е благоприятен, тъй-като “опростеният” подход /с еднороден материал/ води до по-високи стойности на изчислената средна температура на намотката, което създава резерв при проектирането.

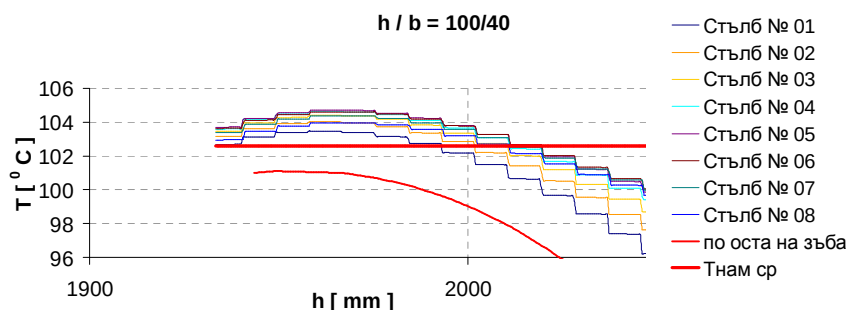


Фиг. 7

От таблиците се вижда също така, че температурата на ротора е съизмерима с тази на околороторното пространство.

Причините за това са:

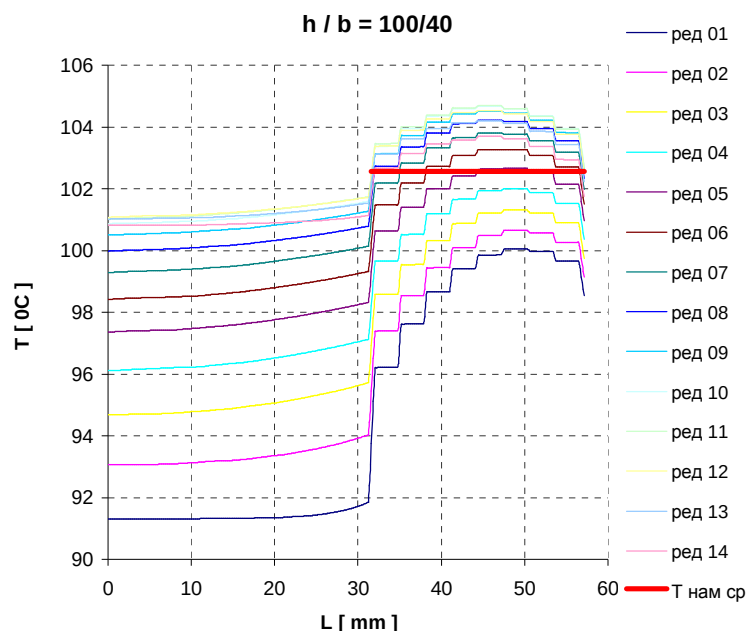
а/твърде малките загуби, които се генерират в ротора;



Фиг. 8

б/ разположението му по периферията на конструкция с голям диаметър, което благоприятства обдухването му с въздушен поток със сравнително голяма линейна скорост – зависимост (5).

На фиг. 8 е представено разпределението на температурата по височината на намотката /успоредно на координатната ос Y/ и по геометричната ос на статорния зъб.



Фиг. 9

Подобна информация по ширината на намотката е представена на фиг. 9 – успоредно на координатната ос X. Максимумът на температурата, при зададените гранични условия /на охлаждане/, и по двете оси се получава във вътрешността на намотката.

3. Заключение

Разработена е методика за определяне на загряването на елементите на електрическа машина с възбуждане от постоянни магнити наподобяваща в конструктивно и топлинно отношение явнополюсна система на въртяща се електрическа машина, в случая на статорен елемент с концентрирана котвена намотка на синхронен ветрогенератор.

Подходът заложен в методиката, използващ предоставените от софтуерния продукт **Mirage** възможности, дава възможност да се оцени, както влиянието на конкретните геометрични форми и размери на изследвания обект, така и на външните физически въздействащи фактори, като принудителната вентилация, например.

Направени са изводи и препоръки относно качествата в топлинно отношение на предложени от разработчика конструкции.

Проверена е възможността за еквивалентна замяна при изчисленията на действителната, съставена от метал и изолация конструкция на секционната страна с еднороден в топлинно отношение материал.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сотиров, Д., М. Михов, Р. Спасов. Числено определяне на температурата на лагерите на синхронен ветрогенератор, II научна конференция ЕФ 2010, Созопол, 01-04' X 2010.
- [2] Meeker, D. **Mirage** 1.0, Steady-State Finite Element Heat Conduction Solver, Users' Manuel, 2005.
- [3] Копилов, И. и кол. Проектиране на електрически машини, Техника, С., 1988.
- [4] Сергеев, П. и кол. Проектирование электрических машин, Энергия, М., 1969.
- [5] Брандиски, К., И. Ячева. CAD системи в електромагнетизма. С., Сиела, 2002.
- [6] Ячев И., И. Маринова. Ръководство за лабораторни упражнения по числени методи и моделиране на вериги и полета. ч. I, София, 2007.
- [7] Йовчев. М и кол. Справочник по енергетика – ТОПЛОТЕХНИКА, ч.I, АБС Техника, 1999.

Автори: доц. д-р Михо Михов, доц. д-р Димитър Сотиров - кат. „Електрически машини”

ЧИСЛЕНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МЕХАНИЧНИТЕ НАТОВАРВАНИЯ НА КОНСТРУКЦИЯТА НА ВЕРТИКАЛЕН СИНХРОНЕН ХИДРОГЕНЕРАТОР

Димитър Сотиров, Пламен Ризов, Николай Стаматов

Резюме. Задача на настоящата разработка е да се разработи подход за числено определяне на механичните натоварвания на конструкцията на синхронен хидрогенератор и оразмеряване на елементите и, като е използван пример на вертикална машина с мощност 1,6 MVA на фирмата Hitzinger. Разработеният подход е приложим и за хоризонтални машини, както и за машини с по-голяма мощност, като се отчетат конструктивните им особености.

NUMERICAL DETERMINATION OF THE MECHANICAL LOADS OF THE CONSTRUCTION OF A VERTICAL SYNCHRONOUS HYDRO GENERATOR

Dimitar Sotirov, Plamen Rizov, Nikolay Stamatov

Abstract. The goal of this paper is to develop an approach to numerically determine the mechanical load of the construction of a synchronous hydro generator and the sizing of its elements using as an example a vertical machine with power 1,6 MVA, constructed by Hitzinger. The developed approach is also applicable to horizontal machines and machines with more power, taking into account their structural characteristics.

1. Увод

Коректното механично оразмеряване на елементите на електрическите машини, в частност на синхронните хидрогенератори в значителна степен определя габаритите и цената им. При съществуващата у нас практика машините, които се произвеждат в малки серии или единични бройки, се преоразмеряват в механично отношение, което ги прави не конкурентно способни на съвременния пазар. Задача на настоящата разработка е да се разработи подход за числено определяне на механичните натоварвания на конструкцията на синхронен хидрогенератор и оразмеряване на елементите и, като е използван пример на вертикална машина с мощност 1,6 MVA на фирмата Hitzinger. Разработеният подход е приложим и за хоризонтални машини, както и за машини с по-голяма мощност, като се отчетат конструктивните им особености. За определяне на силите и моментите, действащи върху елементите от конструкцията на синхронен хидрогенератор са използвани както класическите методи за изчисление на ударната стойност на момента при

внезапно късо съединение, така и числени подходи с използване на метода на крайните елементи (МКЕ) за изчисление на силата на едностранно магнитно привличане при неравномерна въздушна междина. На изследвания хидрогенератор се разработва 3D модел в средата на SOLIDWORKS, който се разделя на основните конструктивни елементи корпус, лагерни щитове, вал, ротор. 3D моделите на тези елементи на конструкцията се опростяват и привеждат във вид, подходящ за изчисления с интегрирания модул COSMOS на SOLIDWORKS. Особено важно е правилното задаване и коректното прилагане на силите, действащи върху конструктивните елементи. Използваният продукт позволява да се намерят освен напреженията в отделните елементи на конструкцията и механичните деформации, както и да се изчислят критичните скорости на въртене на ротора.

2. Определяне на силите и моментите, действащи върху елементите на конструкцията

1. Електромагнитен момент при внезапно късо съединение

Максималната стойност на електромагнитния момент на синхронния генератор в режим на к.с., съгласно [1] е:

$$M_{em} = \frac{p \cdot m \cdot E_o^2}{w_1 \cdot x_d''} \cdot e^{-\frac{t_m}{T_a}} \quad M_{em} = \frac{4 \cdot 3 \cdot 231^2}{314 \cdot 0,0103} \cdot e^{-\frac{0,05}{0,2}} = 154,2 \text{ kNm}$$

където:

p – брой чифтове полюси; $p=4$

m – брой фази; $m=3$

ω_1 – кръгова честота на тока, $w_1 = 2p f = 2 \cdot 3 \cdot 14,50 = 314$

x_d'' – свръхпреходно индуктивно съпротивление на СМ по ос d в относителни единици;

$$x_d'' = 0,103 \cdot \frac{U_{нф}}{I_n} \quad x_d'' = 0,103 \cdot \frac{231}{2309,4} = 0,0103$$

I_n – номинален ток $I_n = 2309,4 \text{ A}$

$U_{нф}$ – номинално фазно напрежение $U_{нф} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$

Максималната стойност на момента възниква в момента от време t_m

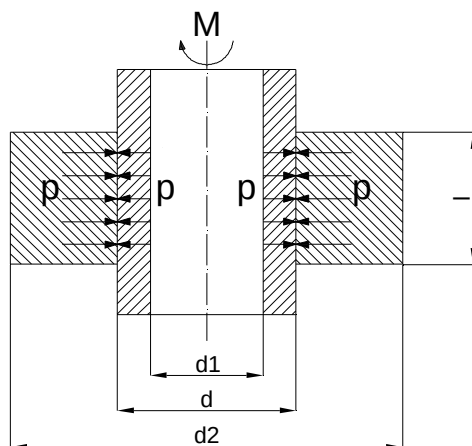
$$t_m \approx \frac{T}{4} \quad T = \frac{1}{f} = 0,2 \quad t_m = \frac{0,2}{4} = 0,05$$

T_a – времекопстанта на апериодичния ток на котвата, $T_a=0,2$ за явнополюсни генератори.

2. Сили, възникващи при пресопа сглобка на статорния пакет към корпуса

Пресовото съединение трябва да бъде с такава стегнатост, че създадената по контактните повърхнини сила от триене да осигурява неподвижност между

елементите на възела при пренасяне на максималният въртящ момент $M_{ем}$, възникващ при внезапно късо съединение. Тази сила на триене зависи от коефициента на триене μ и от повърхностното налягане p , което се получава при образуване на съединението.



Фиг. 1. Основни размери и натоварване на цилиндрично пресово съединение

Ако се обозначи с d номиналният диаметър на цилиндричната повърхнина на съединението и с l – дължината и, за големината на въртящия момент може да се запише:

$$M \leq \frac{1}{2} \cdot m \cdot p \cdot p \cdot d^2 \cdot l$$

За изчисляване на повърхностното налягане са използвани следните данни от геометрията на конструкцията:

d – външен диаметър на статора, в примера $d = 1,128$ m;

d_1 – вътрешен диаметър на статора, в примера $d_1 = 0,87$ m;

d_2 – външен диаметър на корпуса (диаметъра, на който са заварени ребрата), в примера $d_2 = 1,266$ m.

Тъй като ребрата не контактуват с цялата повърхност на статора, формулата придобива следния вид:

$$M \leq \frac{d}{2} \cdot m \cdot p \cdot l \cdot b \cdot n_r \quad p \geq \frac{2M}{m \cdot l \cdot b \cdot n_r} \quad p \geq \frac{2.154,2}{0,14 \cdot 0,64 \cdot 0,03 \cdot 10} \quad p \geq 11,473 \text{ MPa}$$

където:

l – дължина на реброто, контактуваща с пакета,

$l = 0,64$ m;

b – ширина на реброто,

$b = 0,03$ m;

n_r – брой на ребрата,

$n_r = 10$ броя;

μ – коефициент на триене,

$\mu = 0,14$.

3. Центробежни сили, действащи върху полюсите на ротора

Изчисленията на центробежната сила C_f са направени при разгонна скорост на въртене на генератора $n_p = 1750 \text{ min}^{-1}$. При тази скорост се определят максималните механични сили, които действат върху елементите на ротора.

$$C_f = 0,5 \cdot G_{mf} \cdot r_{mf} \cdot \Omega_y^2 \quad C_f = 0,5 \cdot 70 \cdot 0,35 \cdot 183,4^2 \quad C_f = 412 \text{ kN} / \text{m}$$

Където C_f – центробежната сила, създадена от възбудителната намотка, действаща от едната страна на полюса;

$G_{mf} = 70 \text{ kg}$ – маса на възбудителната намотка, намираща се на един полюс;

$\rho_{mf} = H + 0,5 \cdot h_{mp} = 0,35 \text{ m}$ – среден радиус на центъра на тежестта;

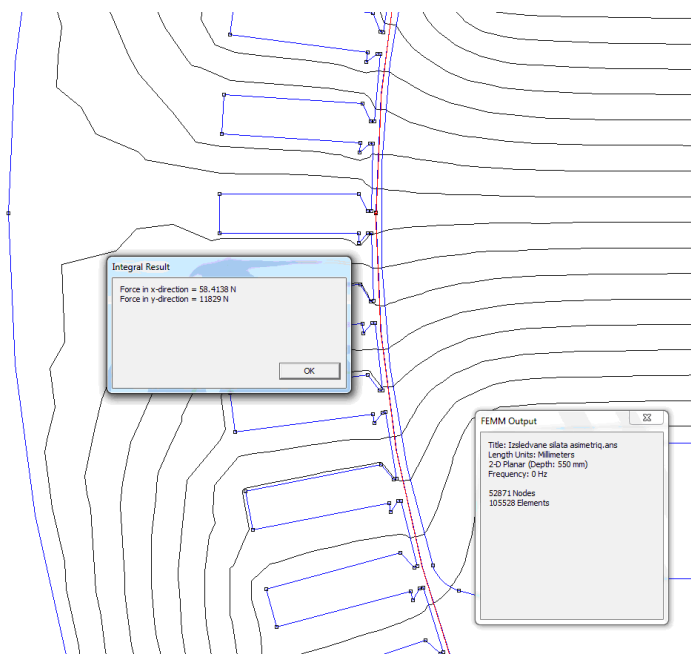
H – височина от центъра на машината до началото на полюса, $H = 0,265 \text{ m}$;

h_{mp} – височина на полюса, $h_{mp} = 0,167 \text{ m}$.

$$\Omega_y = 2 \cdot p \cdot \frac{n_p}{60} = 2 \cdot p \cdot 29,2 = 183,4 \text{ rad} / \text{s}$$

4. Сили на едностранно магнитно привличане на ротора при неравномерна въздушна междина

За намирането на големината на силата, която се създава при асиметрия на въздушната междина на машината – сила на едностранно магнитно привличане, е създаден модел в средата на FEMM. Това са сили, които възникват при изместване на ротора от концентричното положение спрямо вътрешния отвор на статора на машината. Първоначалното изместване на ротора може да се получи, в следствие неточността при обработка и теглото на ротора. В модела за изследване в FEMM е вмъкната геометрията на напречното сечение на машината при изместване на центъра на ротора спрямо центъра на статора с $0,3 \text{ mm}$, т.е. въздушната междина варира от $2,7$ до $3,3 \text{ mm}$. Това е максимално допустимото отклонение съгласно действащите норми и стандарти.

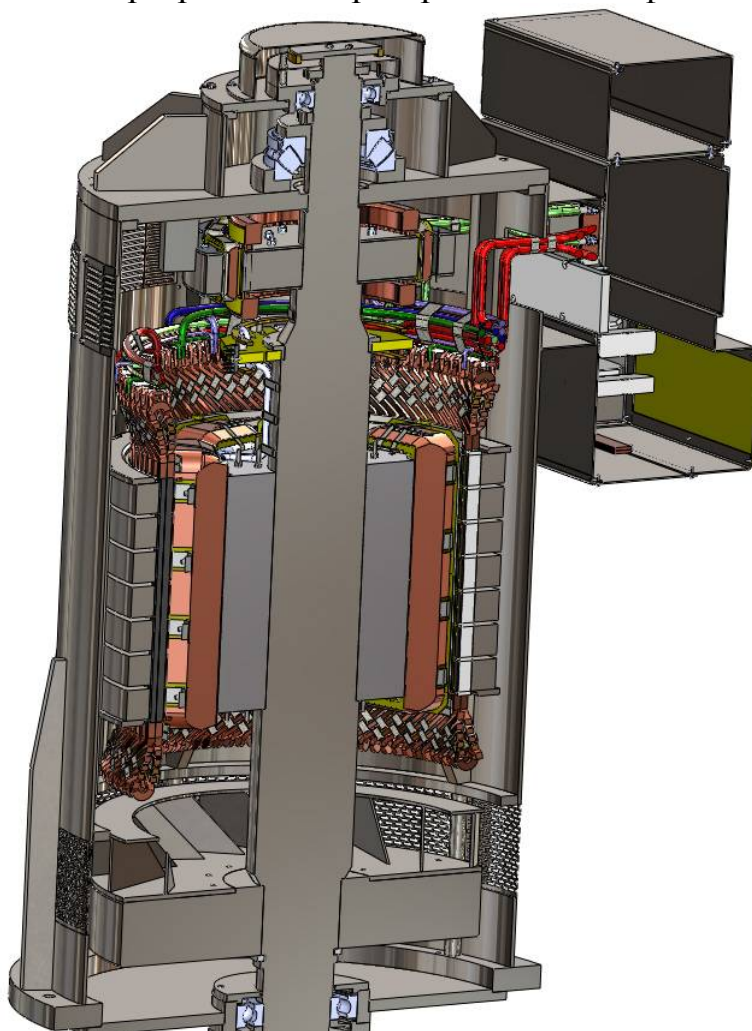


Фиг. 2

Изчисленията са направени при празен ход, като генераторът е възбуден до номинално напрежение. Полученото решение е показано на фиг. 2 за един полюс, като чрез интегриране по контур, който е в центъра на въздушната междина (център, определен спрямо хоризонтала при асиметрия по вертикала) са намерени силите на магнитно привличане между полюсите и статора. Силата на едностранно магнитно привличане, действаща върху ротора под влиянието на асиметричното му разположение е определена като резултантна от силите, действащи на полюсите. Получената стойност на силата на едностранно магнитно привличане е 12 kN.

3. Симулационни модели и резултати от изследванията на конструкцията на вертикален синхронен хидрогенератор

Като модел при изследванията е използвана конструкцията на вертикален синхронен хидрогенератор с номинални данни: пълна мощност $S_n=1600$ kVA; номинално напрежение $U_n=400$ V; номинален ток $I_n=2309,4$ A; синхронна скорост $n_n=750$ min⁻¹; максимална (разгонна) скорост $n_{max}=1391$ min⁻¹; номинална честота $f=50$ Hz; $x_d=2,781\Omega$; $x_q=1,201\Omega$; $x_d'=0,262\Omega$; $x_d''=0,103\Omega$; $x_q''=0,105\Omega$. Напречният разрез на генератора е даден на фиг.3.



Фиг. 3

1.Изследване на корпуса на ХГ

Конструкцията на корпуса на ХГ генератора е заварена конструкция от листов конструктивна стомана и се състои от два кожуха между които е разположена долната вентилационна решетка. От двете страни корпуса са разположени фланци, за които се закрепват лагерните щитове на машината. От вътрешната страна горната част на корпуса са разположени вертикални ребра, в които се „набива“ статора на машината с горещо пресова сглобка. По продължението на ребрата между горната част и долния фланец са разположени плътни дистанционни цилиндри. Симетрично на тях спрямо кожуха от външната страна са разположени ребра, укрепващи механичната здравина на конструкцията. От горната страна на конструкцията на корпуса са оставени отвори, на които се поставят горните вентилационни решетки, от които се засмуква въздух .

При изследването конструкцията на корпуса е опростена с цел олекотяване на модела за изследване. Премахнати са отворите за закрепване и вентилационните решетки, а статора е представен като втулка с геометрични размери и тегло съответстващо на реалното. По този начин се избягва зъбната зона, която не влияе на механичната здравина на корпуса, а усилията от статора се предават коректно към корпуса.

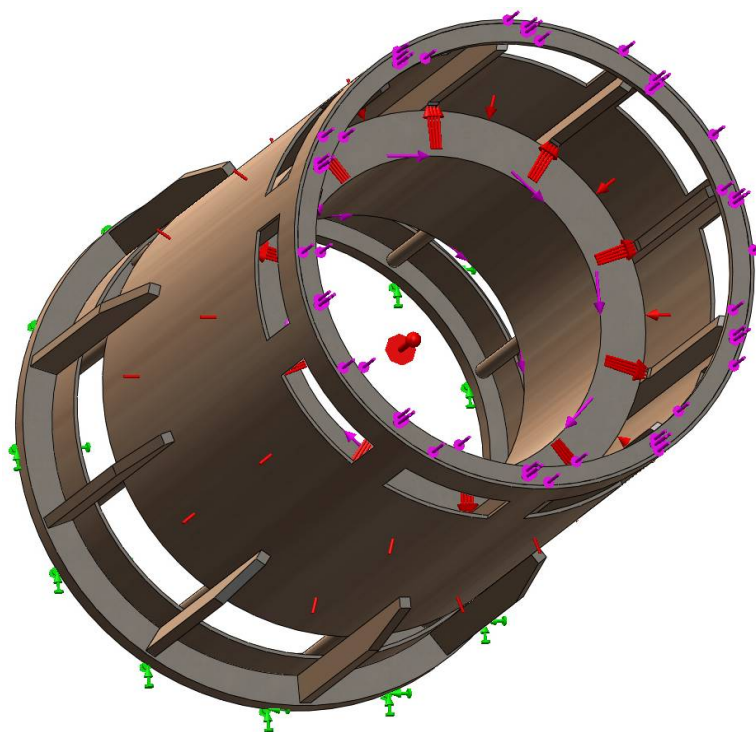
Силите, действащи върху елементите на корпуса са:

- налягането, което се създава от горещопресовата сглобка (между статорния пакет и вертикалните ребра);
- собственото тегло на корпуса и статорния пакет, което се задава като гравитационна сила;
- силата от тежестта на ротора и аксиалната сила, възникваща при действието на турбината, която е тип Францис;
- въртящият момент на машината в номинален режим;
- въртящият момент на машината в режим на внезапно късо съединение;

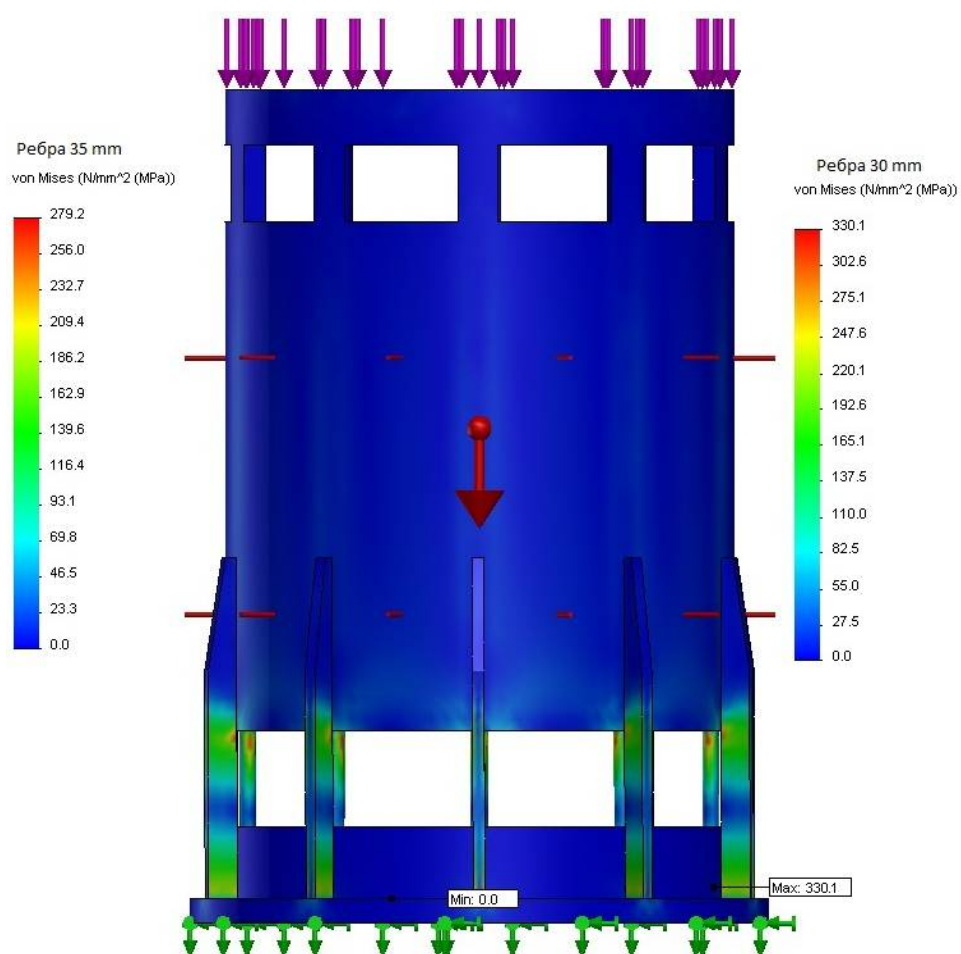
На фиг. 4 е показан модела на корпуса след опростяването му и приложените към него сили.

Налягането, което се създава от горещопресовата сглобка, действа в радиално направление в посока разпъване на корпуса. Силата от тежестта на ротора и аксиалната сила на турбината се прилага на горния фланец в посока към долния фланец, а въртящият момент при номинален режим или при внезапно късо съединение се прилага по вътрешната повърхнина на втулката, заместваща статорния пакет. Всички сили и моменти са разпределени равномерно по повърхнината, върху която действат.

Резултатите от изчисленията са дадени при по-тежкия вариант – едновременно действие на всички сили и моментът при внезапно късо съединение, който е 8,5 пъти по-голям от номиналния. На фиг. 5 са показани механичните напрежения в елементите на конструкцията, а на фиг. 6 - деформациите им.

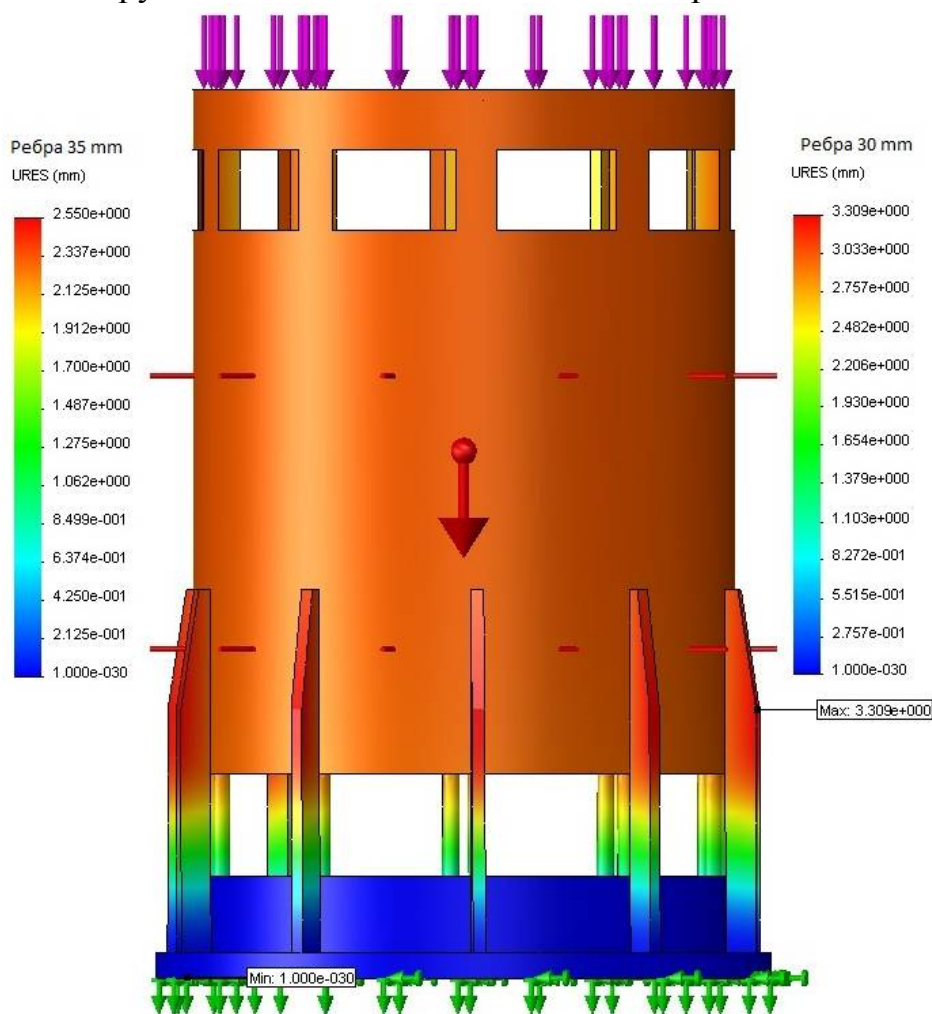


Фиг. 4



Фиг. 5

Анализът на получените резултати показва, че най-натоварено в механично отношение е сечението в зоната на ребрата между горната част на корпуса и долния фланец, както се вижда от фиг. 5. В тази зона максималната стойност на комплексно напрежение достига 330 МПа при дебелина на външните ребра 30 mm. Това е над границата на провлачване за горещо валцована листовка стомана АСт3 с дебелина до 40 mm. За да се гарантира механичната устойчивост на конструкцията е увеличена дебелината на ребрата на 35 mm, при което комплексно напрежение достига 279 МПа, което е в допустимите граници, като се има пред вид, че е в много малка ограничена зона. Механичните деформации са максимални в същата зона и водят до отместване на горната част на корпуса спрямо долния фланец при внезапно късо съединение на 3,3 mm при дебелина на ребрата 30 mm и 2,55 mm при дебелина на ребрата 35 mm. Механичните напрежения в останалите елементи на конструкцията на корпуса са далеч от допустимите граници. Тяхното оразмеряване е съобразено с необходимата коравина на конструкцията и възникването на знако променливи натоварвания.



Фиг. 6

Допустимите стойности на границата на провлачване на материала в случая е от порядъка на 160 МПа, като границата на умора при усукване при симетричен синусоиден цикъл е 107 МПа. Такъв тип натоварвания възникват при въртене

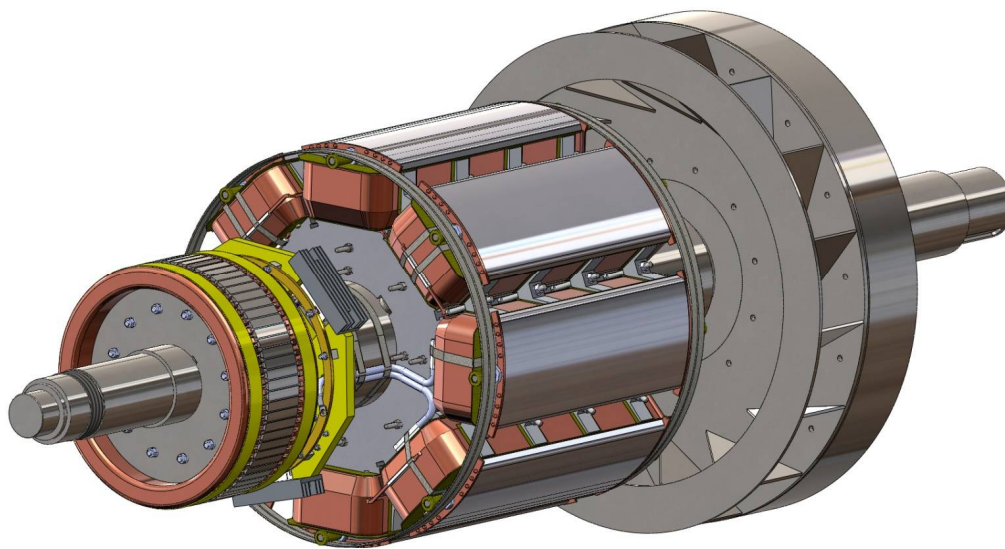
на ротора поради преместване на полюсите спрямо статора, съответно преместване на силата на магнитно привличане между полюса и статорния магнитопровод.

При номинален режим на работа към статора се прилага номиналния въртящ момент, който е значително по-малък от момента при внезапно късо съединение. Напреженията, които възникват в най-натоварената зона – ребрата между горната част на корпуса и долния фланец достигат най-много до 47 МПа при ребра 30 mm и 42 МПа при ребра 35 mm. Тези стойности дори при знакопроменливи натоварвания са далеч от допустимите граници. Отместването на горната част на корпуса спрямо долния фланец при номинален режим е на 0,4 mm при дебелина на ребрата 30 mm и 0,31 mm при дебелина на ребрата 35 mm.

2.Изследване на ротора на ХГ

Конструкцията на ротора на ХГ (фиг. 7) се състои от вал, роторен пакет с възбудителна намотка, роторен пакет на възбудителя с намотка, блок въртящи се изправители, вентилатор и маховик. Обект на настоящото изследване е роторният пакет с възбудителната намотка. Под влиянието на центробежните сили рога̀т на полюса (полюсния накрайник) изпитва огъващ момент. Изчисляването на силата с която намотката действа на полюса се прави при разгонна скорост на машината.

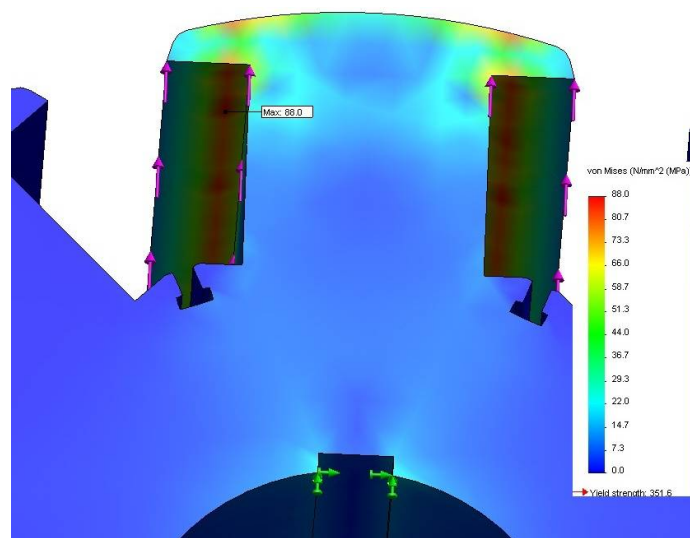
При изследването конструкцията на ротора е опростена с цел олекотяване на модела за изследване. Премахнати са отворите в които се монтират нитовете и шпилките, осигуряващи необходимата стегнатост на роторния пакет.



Фиг. 7

За целите на изследването роторът се фиксира по цилиндричната повърхнина, която се закрепва за вала на машината и се задават силите, действащи върху полюсния накрайник в резултат на центробежните сили C_f на полюсната бобина при въртене на ротора с разгонна скорост, $C_f = 412\text{kN/m}$.

Напреженията, възникващи в полюсния накрайник са дадени на фиг. 6.



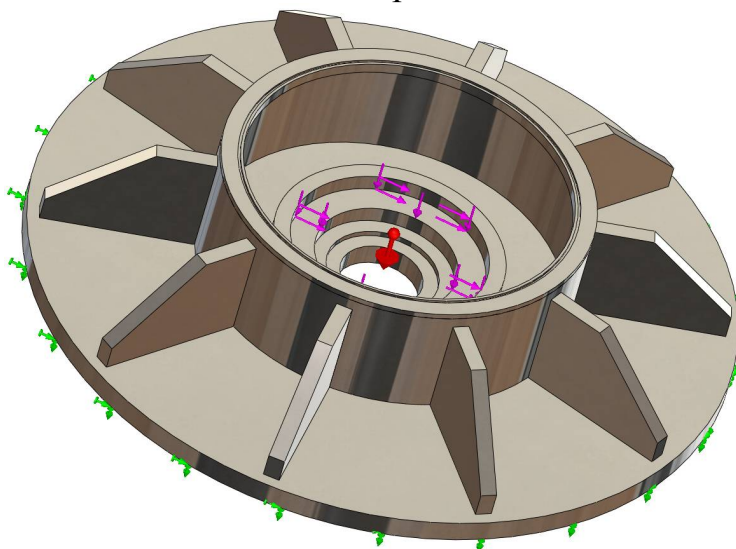
Фиг. 8

Максималните напрежения получени при симулацията са 88 МПа, което е под допустимите стойности за якост на стоманата за разглеждания случай - 130 МПа според [2].

3. Изследване на лагерните щитове

Горният щит на машината е конструктивният елемент, който в случая поема цялото усилие от тежестта на ротора и аксиалната сила от турбината. Той предава това усилие към корпуса за който е закрепен, от там на фундамента. Съставен е от дискове, ребра, статорът на възбудителя, лагери както и други конструктивни елементи.

На фиг. 9 е показан модела на горния щит на машината, който е опростен с цел премахване на елементите, които не оказват влияние върху изследванията, както и опростяване на конструкцията за изследване. Елементите от щита, които понасят зададените усилия са втулката на ролковия лагер, диска, кожуха и ребрата. Отворите за прикрепяне също са махнати. Тези опростявания не влияят на получените резултати, но значително облекчават модела за изследване с което намалят и времето за изчисляване.

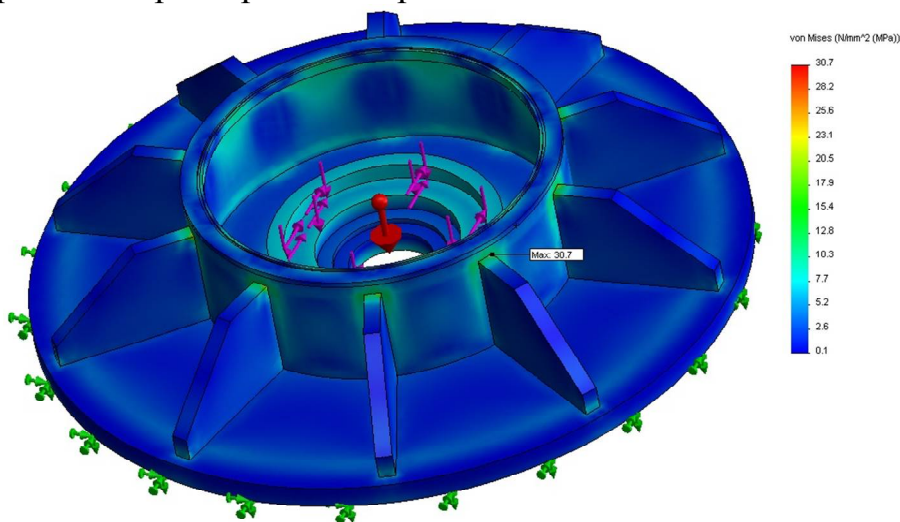


Фиг. 9

На модела на горния щит са зададени следните усилия:

- сила от тежестта на ротора и аксиална сила от турбината 60 kN;
- силата на тежестта на горния щит, зададена чрез гравитацията;
- сила в диска на лагера, породена от асиметричното разположение на ротора 12 kN.

На фиг. 10 са показан напреженията които се създават в конструкцията на горния лагерен щит при нормалната работа на ХГ.



Фиг. 10

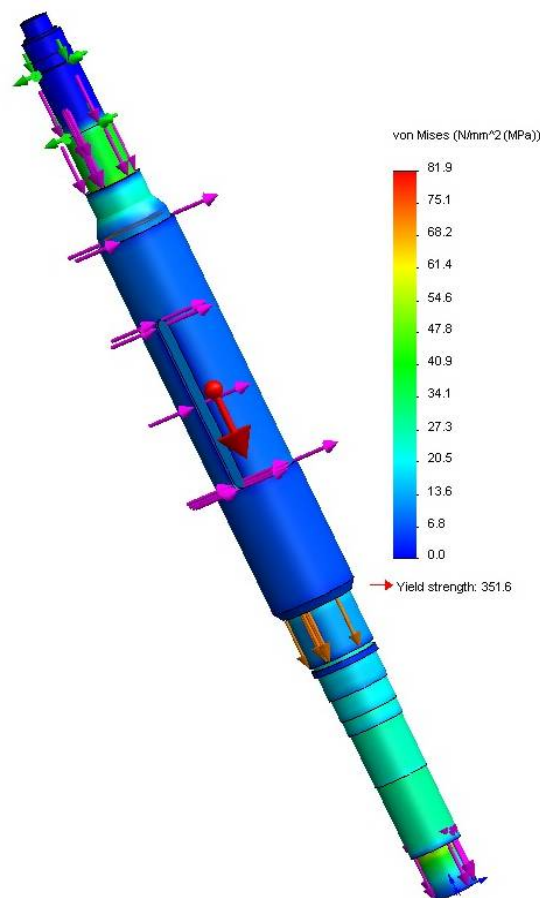
В случая е прието, че съществува сила на едностранно магнитно привличане породена от асиметрия на въздушната междина. Получените симулационни резултати са много под допустимите стойности за използваната стомана. Оразмеряването на горния щит е съобразено с изискванията за коравина на конструкцията, като аксиалните измествания трябва да бъдат в много тесни граници, за да се осигури нормална работа на турбината, роторът на която е монтиран върху вала на генератора. Максималните аксиални отмествания са 0,055 mm.

Долният лагерен щит носи ролков лагер, който поема усилия само в радиална посока и се натоварва от радиалните сили на едностранно магнитно привличане при асиметрия на въздушната междина. Щитът представлява диск от дебелостенна валцована стомана, като получените стойности на механичните напрежения са под 1 МПа.

4.Изследване на вала и от определяне на критичната скорост на въртене

В това изследване към вала на ХГ (фиг. 11), са приложени всички сили които действат на вала: от теглата на различните възли, аксиалната сила от турбината, както и силата на едностранно магнитно привличане, които са

- сила от 25 kN, зададена на стъпалото където ляга ротора;
- сила от 12 kN, зададена на същото стъпало действаща в резултат от асиметрията на въздушната междина;
- аксиална сила от 35 kN, действаща на стъпалото на което е закрепена турбината;



Фиг. 11

- въртящ момент 18,34kNm, който е зададен на стъпалото на което е закрепена турбината;
- сила от 12 kN, която действа в резултат на теглото на маховика и вентилатора;
- сила 3kN, която е зададен на стъпалото , където е закрепен ротора на възбудителя.

За определяне на критичната скорост на въртене, min^{-1} , се използва приблизителна формула [л. 2]. Тя е получена при отчитане на едностранното магнитно привличане и предположението, че роторът представлява еднородна система. Методиката за изчисляване при вертикална машина е както при хоризонтална. За получаване на провеса на вала в резултат от тежестта на ротора е използван модел, при който роторът е фиксиран в местата където се захващат лагерите и са приложени силите от тежестта съответно на ротора, ротора на възбудителя и маховика. На друг модел е зададена и силата от едностранното магнитно привличане.

За изчисляването на критичната честота на въртене се използват резултатите за провеса на вала, който машината би имала при хоризонтално изпълнение, получени от изследването, както следва:

$f_G = 4,875 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ - провес на вала под действие на силата на тежестта;

$f_T = 6,625 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ - провес на вала под действие на силата на тежестта с отчитане на асиметрията на въздушната междина;

$e_o = 0,1d + f_G = 36,625 \cdot 10^{-5} m$ - първоначално изместване на ротора;

В следствие на увеличаването на провеса силите на магнитното привличане нарастват, което предизвиква по-нататъшно увеличаване на провеса. Това ще продължава дотогава, докато магнитното привличане и провеса на вала не се урівновесят. Критичната честота на въртене, съгласно [2] е:

$$n_k \approx 30 \sqrt{\frac{1-m}{f_G}} = 30 \sqrt{\frac{1-0,181}{4,875 \cdot 10^{-5}}} = 3888,44 \text{ min}^{-1}, \text{ където}$$

$$m = \frac{f_T}{e_o} = \frac{6,625 \cdot 10^{-5}}{36,625 \cdot 10^{-5}} = 0,181$$

Работната честота на въртене на ротора трябва да се различава от критичната с не по-малко от 30% и в случая това условие е изпълнено.

4. Заключение

Разработената методика позволява да се направи анализ на механичната устойчивост на синхронен хидрогенератор и при необходимост да се коригират размерите на елементите на механичната конструкция. Методиката е особено полезна при анализ на съществуващи конструкции и при нови разработки с цел оптимизиране на размерите на елементите на конструкцията.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ангелов, А., Д. Димитров, Електрически машини I част, ДИ „Техника, София, 1987.
- [2] Абрамов, А. И., А. В. Иванов-Смоленский, Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, Высшая школа, Москва, 2001.
- [3] Копылов, И. П. и др., Проектирование электрических машин, Высшая школа, Москва, 2005.
- [4] Дунаев, П. Ф., О. П. Леликов, Конструирование узлов и деталей машин, Академа, Москва, 2004.
- [5] Hitzinger, Instructions for Synchronous Alternator SGA1C08T, 2008.

Автори: доц. д-р Димитър Сотиров, доц. д-р Пламен Ризов – кат. „Електрически машини” при ТУ – София, маг. инж. Николай Стаматов – „ЕЛПРОМ ЗЕМ” АД.

ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АКСИАЛНАТА СЪСТАВКА НА ПОЛЕТО НА РАЗСЕЙВАНЕ В ЗОНАТА НА КРАЙНИТЕ ПАКЕТИ НА СТАТОРНИЯ МАГНИТОПРОВОД НА СИНХРОННИ ХИДРОГЕНЕРАТОРИ

Димитър Сотиров, Стоян Баташки, Димитър Станев

Резюме. Разработен е метод за числено изследване на полето на разсейване в областта на челните съединения и крайните пакети с използване на опростени 2D модели, които позволяват с достатъчна за практически цели точност да се анализират явленията и процесите и да се оценят възможностите на хидрогенераторите за работа в режим на недовъзбуждане. Изследвани са различни конструкции на зоната на крайните пакети и са анализирани качествата им.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE AXIAL COMPONENT FIELD OF DIFFRACTION IN AREA OF END PACKAGES ON MAGNETIC STATOR OF SYNCHRONOUS HYDRO GENERATORS

Dimitar Sotirov, Stoyan Batashki, Dimitar Stanev

Abstract. Developed a method for numerical analysis of the field of diffraction in area of frontal junctions and end packages using simple 2D models, which allow sufficient accuracy for practical purposes to analyze the phenomena and processes and to assess the possibilities of hydro generators operating mode of under excitation. Investigate different structures of end packages area and analyzed their properties.

1. Увод

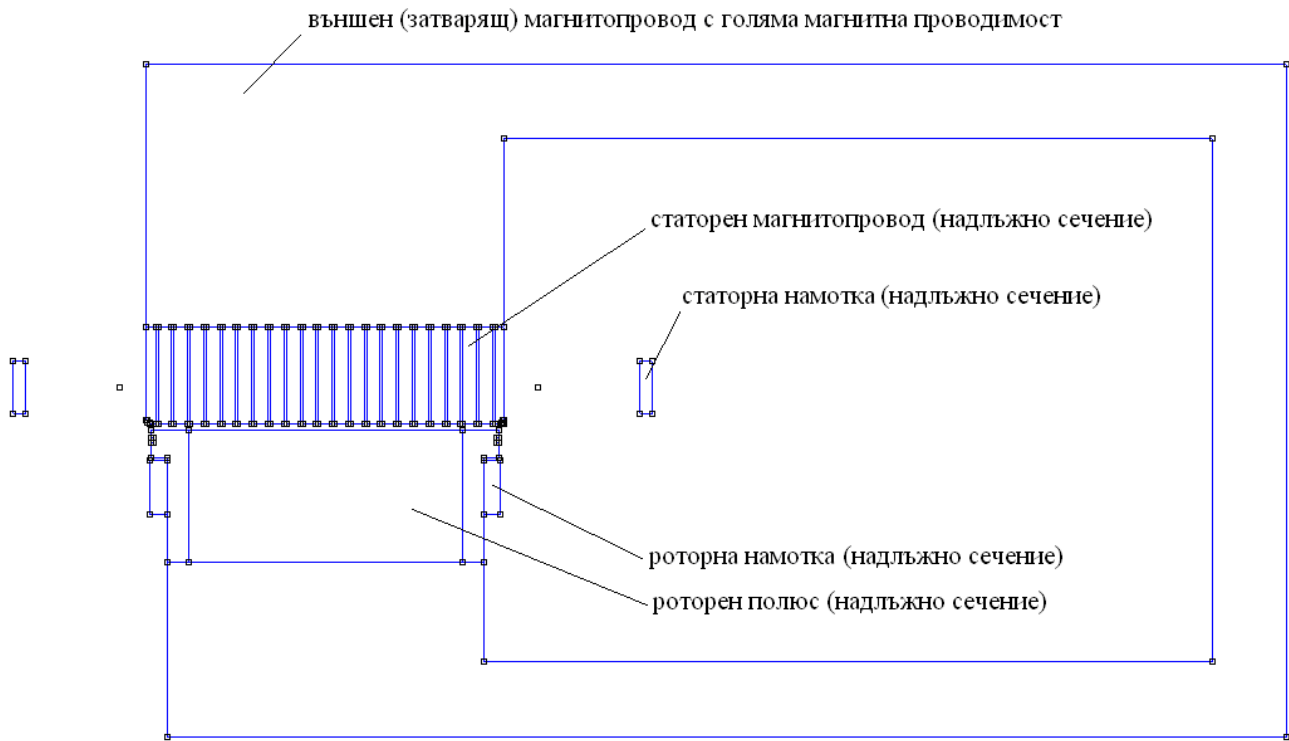
Дългогодишният опит от експлоатацията и теоретичните изследвания на турбогенератори и отчасти на хидрогенератори показва, че магнитната индукция на полето на разсейване в областта на челните съединения и крайните пакети е минимална при режим на превъзбуждане и нараства неколкостранно при режим на недовъзбуждане. Това води до локални прегрявания в областта на крайните пакети на магнитопровода и разхлабване на пакета в зъбната зона. В резултат се получават вибрации на ламелите, нарушаване на каналната изолация, разпрашаване на ламелите в зъбната зона и поява на каверни по зъбите. Това налага при проектиране на генератори да се предвидят редица мерки за ограничаване на полетата на разсейване за да се осигурят достатъчно широки граници на експлоатация на хидрогенераторите при широк диапазон на

изменение на реактивната мощност. За болшинството от произведените през 60^{те} и 70^{те} години на миналия век хидрогенератори няма заводски P – Q диаграми, които да лимитират възможностите им за работа в режим на недовъзбуждане. Тъй като болшинството от инсталираните у нас хидрогенератори са от този тип възникват проблеми при експлоатацията им, свързани с изкуствено ограничаване на диапазона на изменение на реактивната мощност и невъзможност за ефективно управление на енергийната система. Това налага разработване на методи за теоретично и експериментално изследване на полето на разсейване в областта на челните съединения и крайните пакети и неговите ефекти, за да се определят границите на разумна експлоатация на хидрогенераторите. Настоящата разработка е посветена на разработване на метод за числено изследване на полето на разсейване в областта на челните съединения и крайните пакети. Използването за целта на сложни 3D модели изисква скъпо струващи софтуерни продукти и мощна компютърна техника, която е трудно достъпна и изисква много време за провеждане на изследването. За случая е необходимо да се разработят опростени 2D модели, които да позволяват с достатъчна за практически цели точност да се анализират явленията и процесите и да се оценят възможностите на хидрогенераторите за работа в режим на недовъзбуждане.

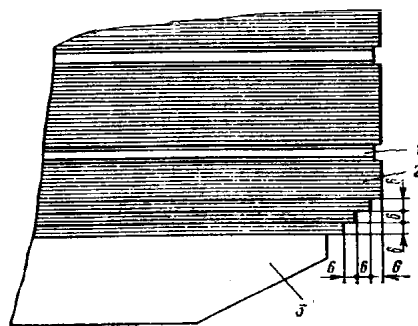
2. Методика за изследване на разсейването в зоната на крайните статорни пакети с използване на 2D модели

1. Модел за изследване на полето на разсейване

При съставяне на модела за изследване се взема пред вид, че полето на разсейване се формира от взаимодействието на магнитодвижещото напрежение (м.д.н.) на възбудителната намотка и м.д.н. на реакцията на тока на котвената намотка (р.т.к.), по специално на надлъжната и съставка. Разглеждането се прави по отношение на максималната стойност на аксиалната съставка на полето на разсейване, която се намира по оста d на генератора, като се приема, че в разглежданият момент оста d съвпада със средата на статорен зъб. Тъй като надлъжната съставка на р.т.к. действа по оста d, модела за изследване представлява надлъжен разрез на генератора през средата на статорен зъб, срещу който се намира средата на полюса на ротора. За да се осигури затваряне на магнитния поток при 2D моделите се прави изкуствено затваряне на магнитния поток през допълнителен магнитопровод с много голяма магнитна проводимост, така че да не влияе върху резултатите от изследването. На фиг. 1 е показан модел за изследване, който е построен по действителните размери на един от генераторите на ВЕЦ „Пещера”, тип PEL 616/47-10, производство на Siemens-Schuckert Виена. Статорният магнитопровод е съставен от отделни пакети, отделени с радиални охладителни канали, като крайните пакети са скосени стъпаловидно към въздушната междина, както е показано на фиг. 2. Статорната намотка е представена с намотка, която създава м.д.н. на



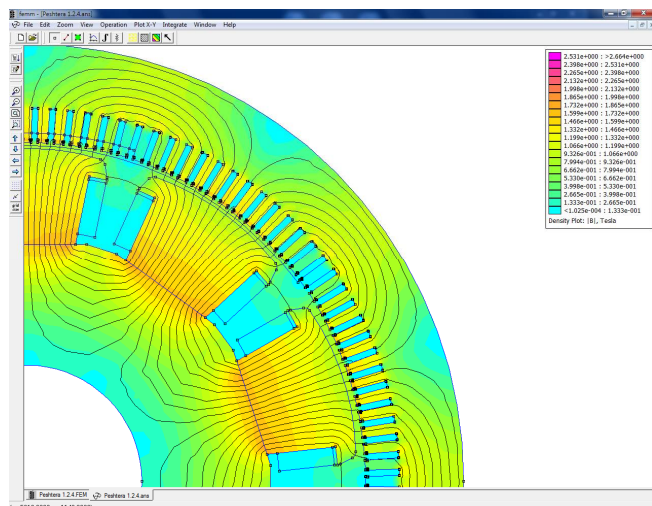
Фиг. 1



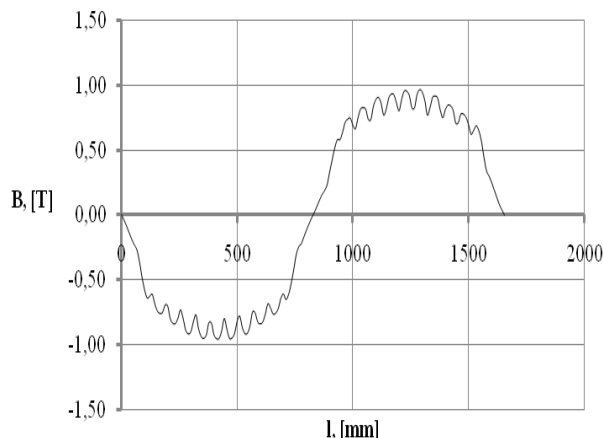
Фиг. 2

напречната съставка на р.т.к., като надлъжното сечение на тази намотка е разположено на мястото, което съответства на положението на челните съединения на действителната машина. През тази намотка в модела се пропуска ток, съответстващ на големината и посоката на надлъжната съставка на р.т.к. През роторната възбудителна намотка се пропуска ток, който създава магнитния поток на генератора. За да се получи съответствие на условията за развитие на потока на разсейване в зоната на крайните пакети на статорния магнитопровод на модела и на действителната машина, възбудителният ток в модела се определя на базата на еднакви стойности на магнитната индукция във въздушната междина в модела и действителната машина. За целта се съставя напречен модел на разглеждания генератор в средата на FEMM, като се определя стойността на магнитната индукцията във въздушната междина и в зъбите на височина $2/3$ от основата. На фиг. 3 е показан напречния модел на разглеждания генератор, а на фиг.4 кривата на магнитната индукция във въздушната междина. В разглеждания модел са използвани действителните

размери и материали на изследвания генератор, като е зададен възбудителен ток, съответстващ на празен ход при номинално напрежение. От кривата на



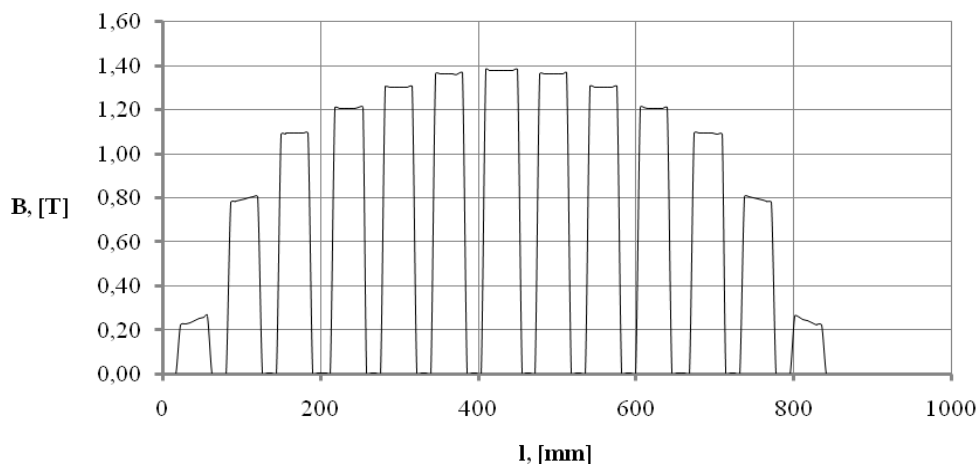
Фиг. 3



Фиг. 4

фиг. 4 се определя максималната стойност на магнитната индукция в средата на полюса (по ос d) и по модела от фиг. 1 се изчислява необходимия възбудителен ток при празен ход, за да се получи същата стойност на магнитната индукция срещу зъба на статорния пакет.

На фиг. 5 е показана магнитната индукция в зъбите на височина 2/3 от основата на зъба срещу един полюс на ротора. От тук може да се определи максималната магнитна индукция в зъба на един среден статорен пакет и да се сравни с индукцията в крайните пакети на статора.

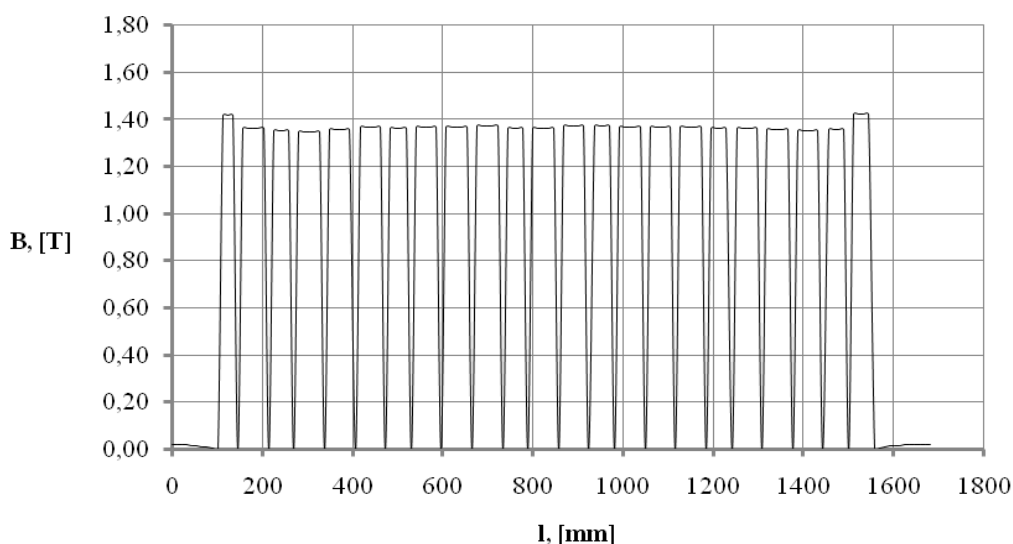


Фиг. 5

2. Изследване на влиянието на напречната съставка на р.т.к.

За да се анализира влиянието на реактивната съставка на товара, която поражда надлъжна съставка на реакцията на тока на котвата през статорната намотка на модела се пропуска ток. При индуктивен характер на товарния ток се създава размагнитваща реакция, така че тока в модела е със знак срещуположен на възбудителния ток. При капацитивен характер на товарния ток се създава намагнитваща реакция, така че тока в статорната намотка на модела е със същия знак както възбудителния ток. Големината на тока в

статорната намотка на модела се определя, като от данните за разглеждания генератор се вземат стойностите на възбудителния ток при съответна стойност на фактора на мощността $\cos\phi$ на изследвания генератор, или възбудителния ток се определя по изчислителен път. В модела се задават стойности на възбудителния ток, които се изменят в същото съотношение, както определените от данните на генератора или изчисленията стойности при различни стойности на $\cos\phi$, така че съвместното действие на м.д.н. на възбуждане и на р.т.к. да създадат магнитна индукция със същата големина, както при празен ход. Тъй като магнитната индукция във въздушната междина се променя незначително от празен ход до номинален товар полето на разсейване се определя с достатъчна точност. Стойностите на $\cos\phi$ се задават от номинален режим, като правило индуктивен $\cos\phi$ с големина от 0,8 до 0,9, до капацитивен $\cos\phi$ с големина до 0,9, рядко до 0,85. Този диапазон се определя от потребностите на електрическата мрежа от реактивна мощност в мястото на свързване на разглеждания генератор. Обикновено при номинален $\cos\phi$ индуктивен възбудителния ток е около два пъти по-голям от стойността му при празен ход, а при капацитивен $\cos\phi$ възбудителния ток е около два пъти по-малък от стойността му при празен ход. Големината и знака на тока в статорната намотка на модела генератора се задава така, че магнитната индукция във въздушната междина да остане същата, както при празен ход. За определяне на аксиалната съставка на магнитната индукция на полето на разсейване в зоната на крайните пакети се строи контур за отчитането и, който в случая е по повърхността на крайния пакет от въздушната междина до края на пакета. Освен това се строи контур за определяне на магнитната индукция в зъбите на пакетите на разстояние от въздушната междина, равно на $1/3$ от височината на зъба в аксиално направление. Получените стойности за празен ход на разглеждания хидрогенератор са показани на фиг. 6.

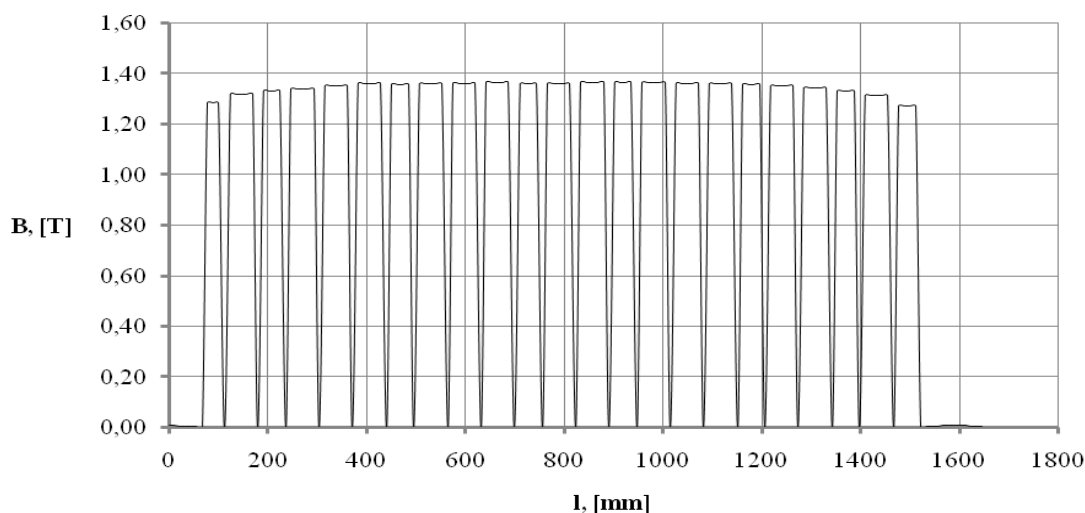


Фиг. 6

Характерно в случая е, че индукцията в крайните пакети е по-висока от тази в средните пакети, което се дължи на потоците разсейване, които се затварят през тях. Както се вижда, магнитната индукция в средните пакети има същите стойности, както получените максимални стойности от напречния модел на фиг. 3 и 5. На фиг. 7 е показана кривата на магнитната индукция на аксиалната съставка на потоците разсейване в зоната на крайните статорни пакети по височина на пакета от въздушната междина до края на пакета. Вижда се, че магнитната индукция на аксиалната съставка на потоците разсейване нараства като максималната стойност се получава в края на скосената стъпаловидно част на крайния пакет и след това намалява с отдалечаване от въздушната междина.

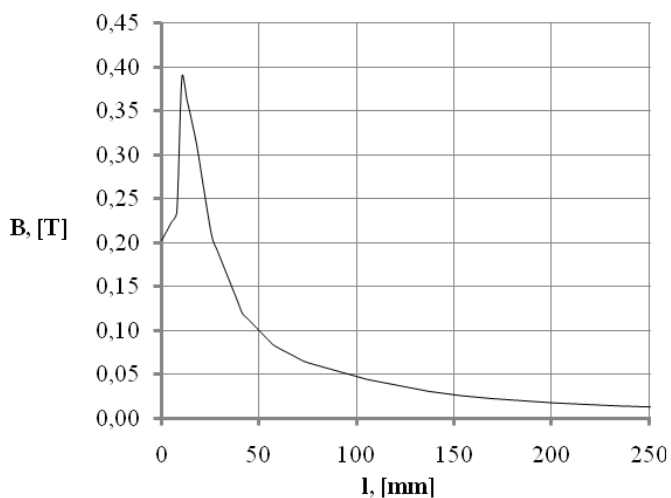
Аналогични резултати са получени по аналитичен път и експериментално в [Л1] за турбогенератори. Съществено предимство на разглеждания метод е възможността бързо и с използване на достъпен софтуер и хардуер да се получат резултати за различни конструкции и режими на работа.

При индуктивен характер на товара за номинален $\cos\varphi=0,8$ на разглеждания генератор са получени криви на магнитната индукция в зъбите на пакетите на разстояние от въздушната междина, равно на $1/3$ от височината на зъба в аксиално направление – фиг. 8 и кривата на магнитната индукция на аксиалната съставка на потоците разсейване в зоната на крайните статорни пакети по височина на пакета, фиг. 9.

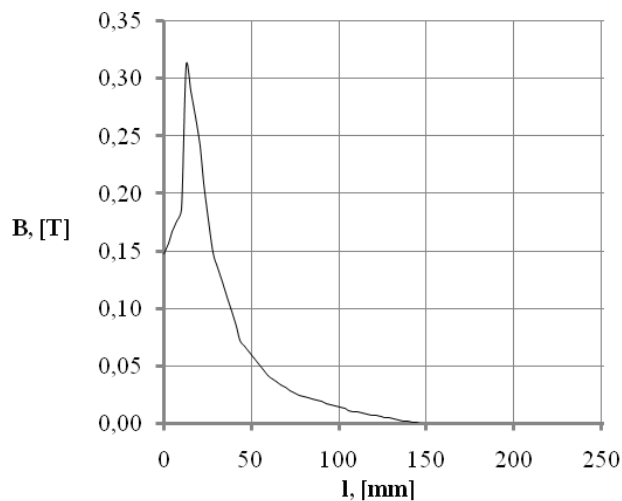


Фиг. 8

Вижда се, че магнитната индукция в зоната на крайните пакети намалява в сравнение със средните пакети, като магнитната индукция на аксиалната съставка на потоците разсейване намалява. Това води до намаляване на магнитните загуби в крайните пакети, в сравнение с режима на празен ход.

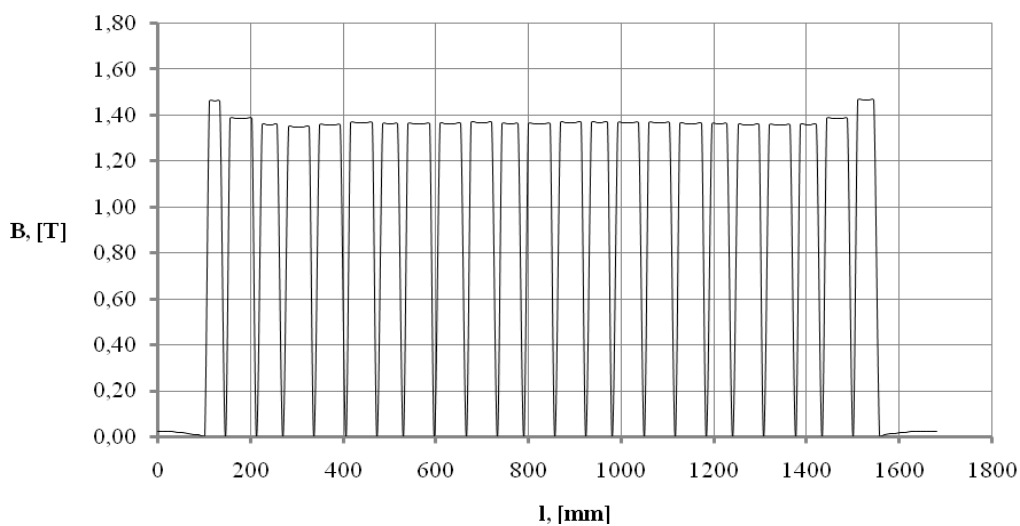


Фиг. 7



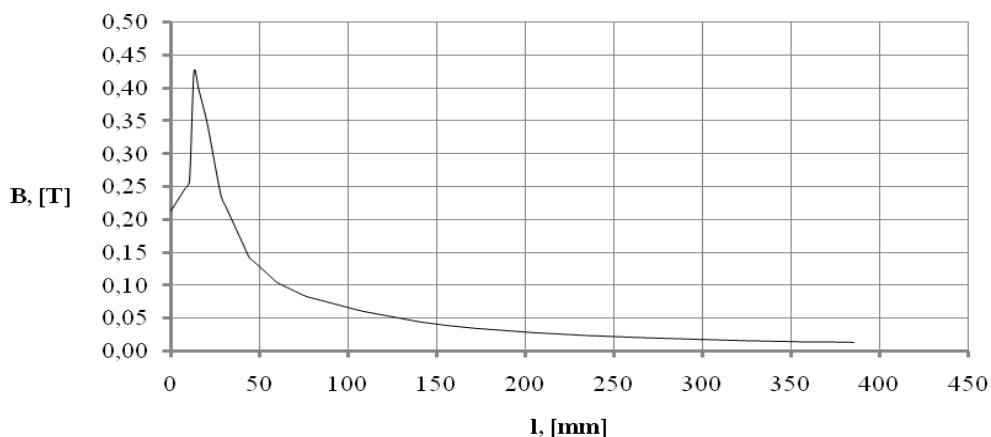
Фиг. 9

На фиг. 10 и 11 са дадени същите криви, получени при капацитивен характер на статорния ток за разглеждания генератор, $\cos\varphi=0,9$ капацитивен.

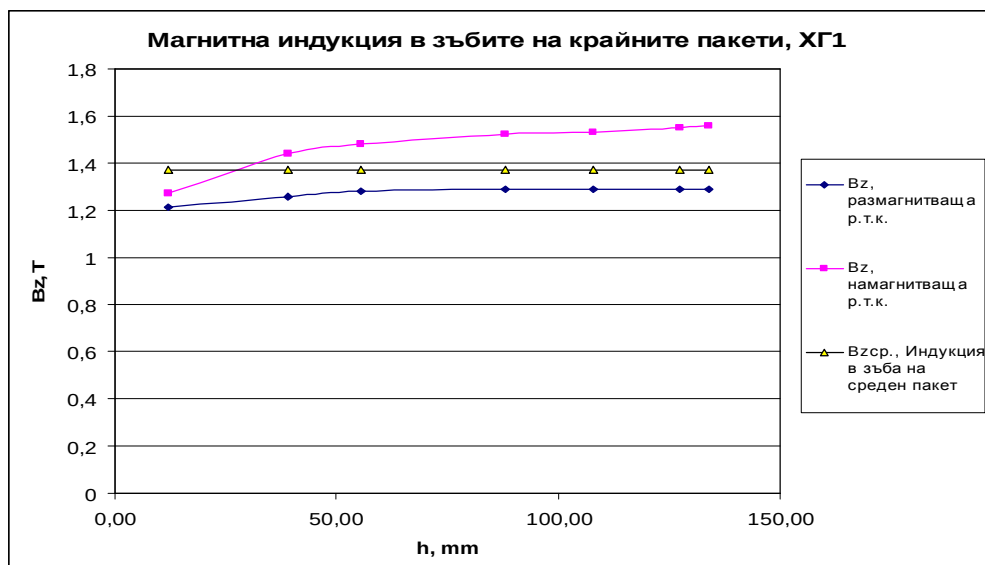


Фиг. 10

Очевидно магнитната индукция в зъба на крайните пакети нараства спрямо режима на празен ход, фиг. 10, като същото се отнася и за магнитната индукция на аксиалната съставка на потоците разсейване, фиг. 11.



Фиг. 11



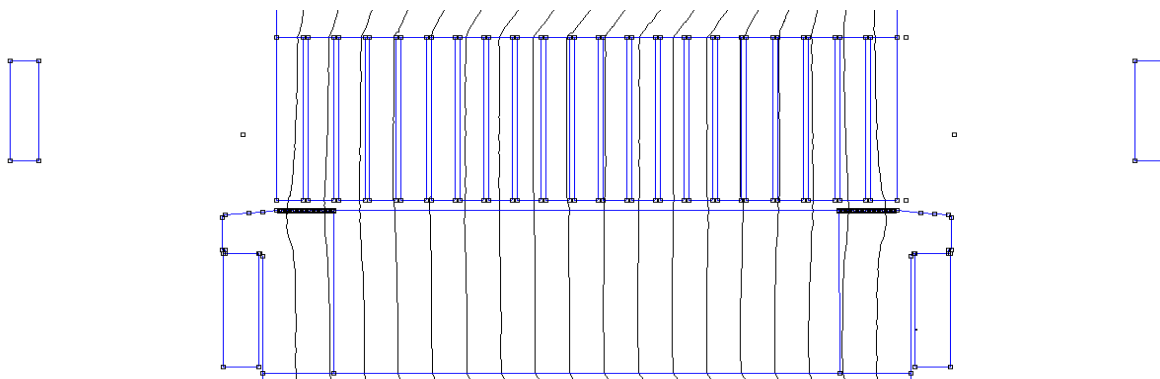
Фиг. 12

При генератора с разгледаната конструкция има отчетлива разлика в големината на магнитната индукция в зъбите на крайните пакети при размагнитваща р.т.к. ($\cos\varphi$ индуктивен) и при намагнитваща р.т.к. ($\cos\varphi$ капацитивен). Както се вижда от фиг. 12 при размагнитваща р.т.к. индукцията в крайните пакети е по-ниска от тази в средните пакети, като при намагнитваща р.т.к. потока на челно разсейване нараства значително и по височина на зъба h потока в зъба също нараства, съответно нараства индукцията в зъба.

Получените резултати са характерни за конструкцията на крайните пакети и роторния полюс (фиг. 1 и 2). В случая роторния полюс има дължина, заедно с щеката равна на аксиалната дължина на статорния пакет, а крайните пакети са скосени. Това са две от най-ефективните мерки за намаляване на потоците на разсейване в зоната на крайните пакети.

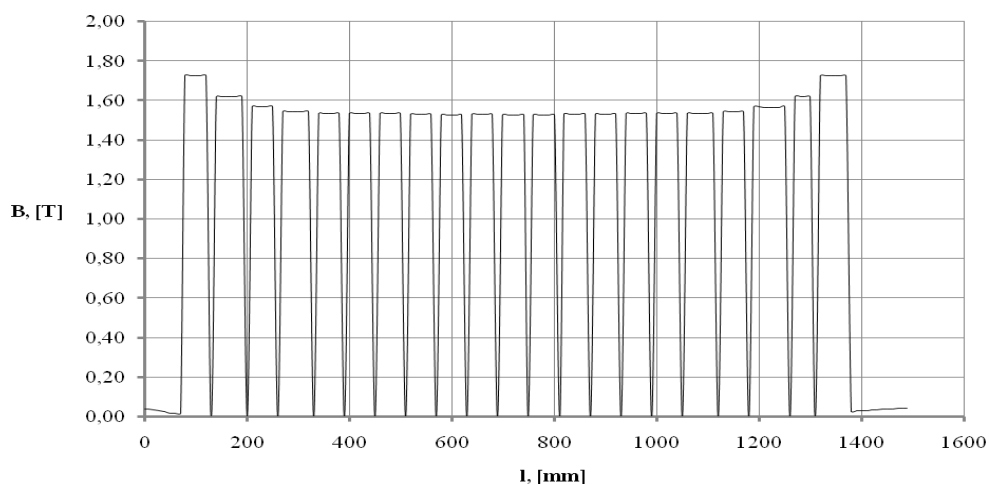
3.Изследване на влиянието на конструкцията на зоната на крайните пакети върху полето на разсейване на крайните пакети

За целта по описаният метод е разработен модел на реален хидрогенератор с различна конструкция на зоната на крайните пакети. Характерен пример на различна конструкция, при която не са взети мерки за ограничаване на разсейването в зоната на крайните пакети е хидрогенератора на ВЕЦ Пещера, модел ААН-350-130-110, производство на СКД – Прага. На фиг. 13 е показана частта от модела с магнитните силови линии на полето при празен ход, на която добре се вижда конструкцията на зоната на крайните пакети. Крайните пакети от страна на въздушната междина са без скосяване, а полюса заедно със щеката е значително по-дълъг в аксиална посока от статорния пакет. Всичко това благоприятства нарастването на потоците на челно разсейване. По описаният метод са получени кривите на индукциите в зъбите и на аксиалната съставка на полето на разсейване, които са дадени на фиг. 14, 15, 16, 17.

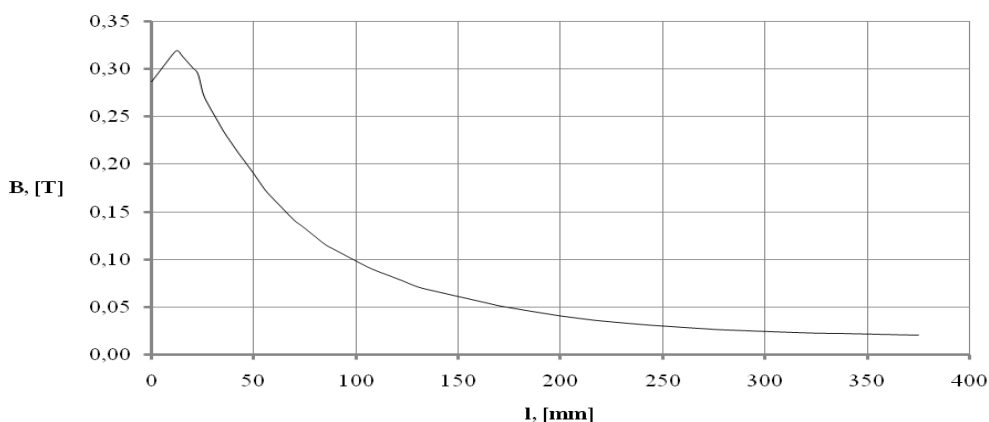


Фиг. 13

На фиг. 14 е показана магнитната индукция в пакетите на изследваната машина, а на фиг. 15 е показана магнитната индукция по височината на крайния пакет при празен ход. Нарастването на магнитната индукция в крайните пакети е значително, като такова нарастване се наблюдава и при съседни на крайните пакети, т.е. аксиалната съставка на полето на разсейване прониква в случая до третия пакет, което обикновено се наблюдава при турбогенератори.

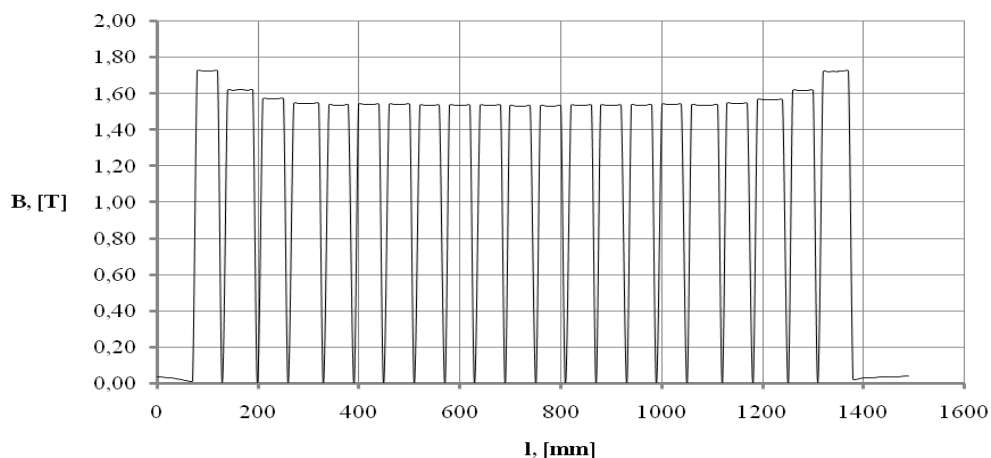


Фиг. 14



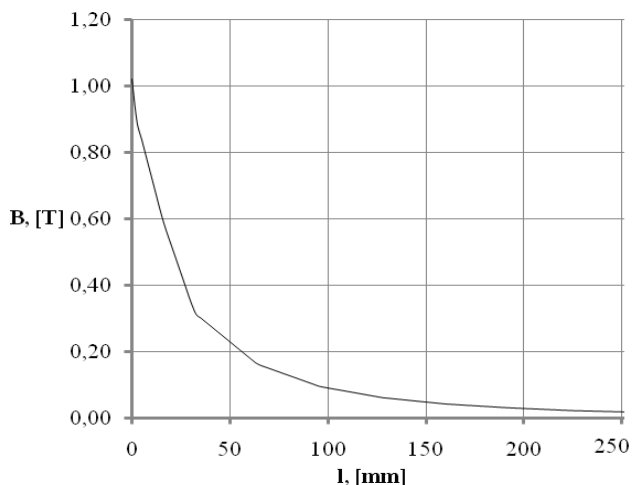
Фиг. 15

На фиг. 16 и фиг. 17 са показани съответно стойностите на индукцията в статорните пакети и индукцията по височината на крайния пакет, при размагнитваща реакция на тока на котвата, а на фиг. 18 и фиг. 19 при намагнитваща реакция на тока на котвата.

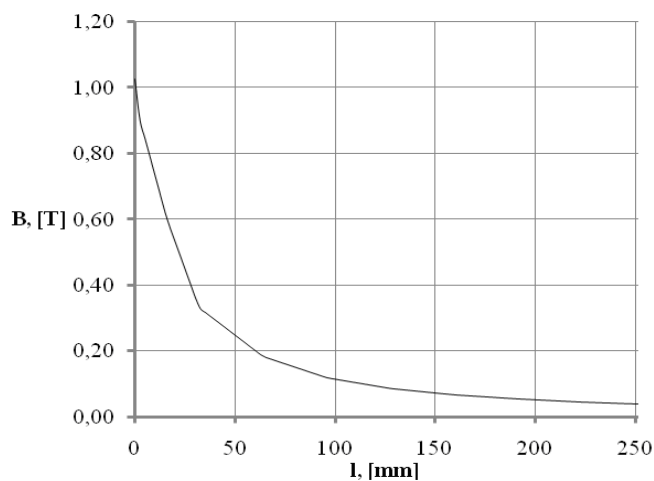


Фиг. 16

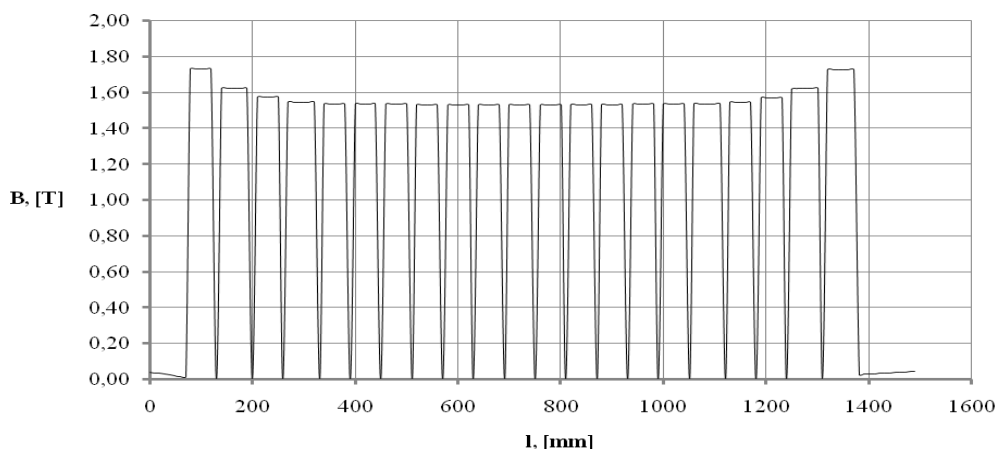
В случая характера на реакцията на тока слабо влияе на полето на разсейване, като и в двата случая има чувствително нарастване на магнитната индукция в крайните пакети спрямо режима на празен ход, което води до значително увеличение на загряването им.



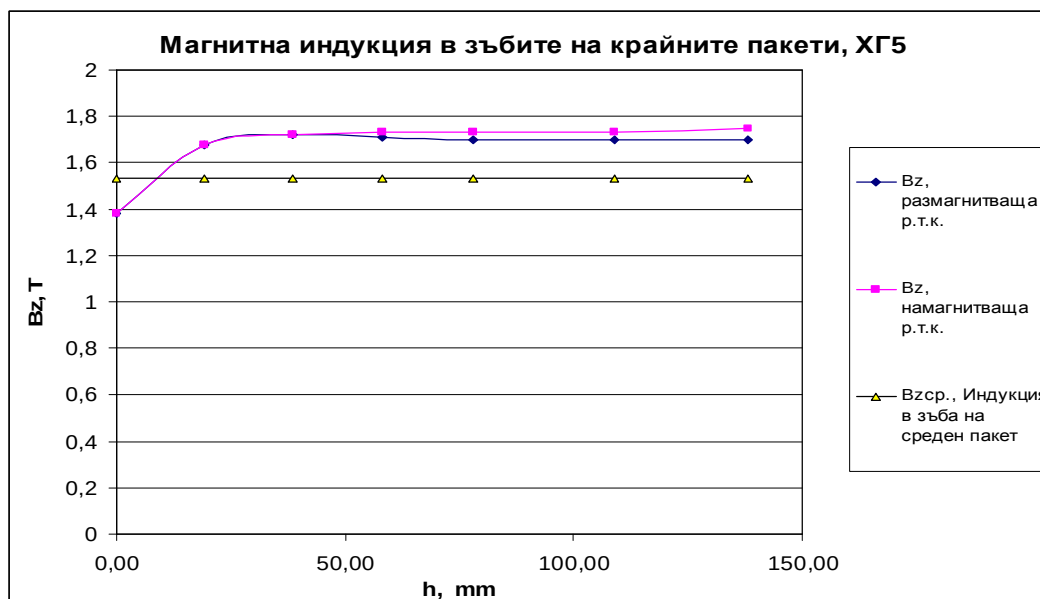
Фиг. 17



Фиг. 19



Фиг. 18

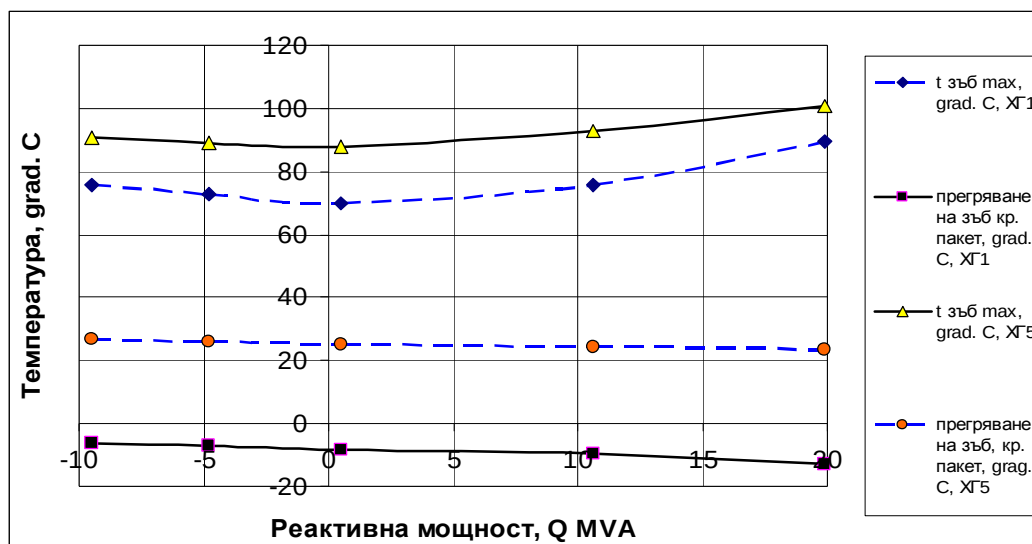


Фиг. 20

При генератора с разгледаната конструкция няма отчетлива разлика в големината на магнитната индукция в зъбите на крайните пакети при размагнитваща р.т.к. ($\cos\phi$ индуктивен) и при намагнитваща р.т.к. ($\cos\phi$ капацитивен). Както се вижда от фиг. 20 и при размагнитваща и при намагнитваща р.т.к. индукцията в крайните пакети е значително по-висока от тази в средните пакети, като и в двата случая потока на челно разсейване нараства значително и по височина на зъба h потока в зъба също нараства, съответно нараства индукцията в зъба. Разликата в големината на потока на разсейване при размагнитваща и при намагнитваща р.т.к. е минимална, като има слабо нарастване при намагнитваща р.т.к.

Тези резултати имат пълно съответствие с експериментално определеното загряване на крайните статорни пакети [2] при режим на превъзбуждане и

недовъзбуждане, показано на фиг. 21. На тази фигура са дадени максималните измерени температури на зъбите на крайните пакети и прегряването на зъбите на крайните пакети спрямо зъбите на средните пакети за двата генератора - ХГ1 е на Siemens, а ХГ2 – на СКД – Прага. Очевидно загряването на зъбите на крайните пакети на ХГ5 е до по-висока температура, като прегряването им почти не зависи от големината на реактивната мощност.



Фиг. 21

При ХГ1 зъбите на крайните пакети загряват до по-ниски температури, като поради по-доброто охлаждане на крайните пакети те са по-студени от зъбите на средните пакети. При това загряването на зъбите на крайните пакети е с най-ниска температура при размагнитваща реакция на р.т.к. (индуктивен $\cos\phi$), съответно най-висока температура при намагнитваща реакция на р.т.к.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработената методика за изследване на разсейването в зоната на крайните статорни пакети с използване на 2D модели позволява да се изследват различни конструкции на зоната на крайните пакети на синхронни генератори. В съчетание с натрупаните данни от експериментално определяне на загряването на крайните статорни пакети тази методика може да се използва и за определяне на $P - Q$ диаграмите, съответно границите на разумна експлоатация на синхронни хидрогенератори както на съществуващи, така и на ново разработвани конструкции. Методиката е приложима при използване на достъпен софтуер и хардуер.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вольдек, А. И., Я. Б. Данилевич, В. И. Косачевский, В. И. Яковлев. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин, «Энергоатомиздат», Ленинградское отделение, 1983.
- [2] Сотиров Д., М. Михов, Ст. Баташки, Експериментално определяне на допустимите граници на изменение на реактивната мощност на хидрогенератори в зависимост от заграването на крайните пакети на статора, I-ва научна конференция ЕФ 2009, Созопол.
- [3] Ангелов, А. М., Д. А. Димитров, Електрически машини II част, ДИ «Техника», София, 1988.
- [4] Копылов, И. П., Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. Проектирование электрических машин, Москва ФГУП Издательство “Высшая школа”, 2005.
- [5] Копылов, И. П., Электрические машины, Москва ГУП Издательство “Высшая школа”, 2000.
- [6] Kuchinskaia, Z. M., New Design Of Hydrogenerator Poles, Department of Hydrogenerators, Electrosila, St.Petersburg, Russia.

Автори: доц. д-р Димитър Сотиров – кат. „Електрически машини”, Стоян Баташки - НЕК – ЕАД клон “ВЕЦ – група Родопи” - Пловдив, маг. инж. Димитър Станев – „ЕЛПРОМ ЗЕМ” АД

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРОДУКТ ANSYS ЗА РЕШАВАНЕ НА ЗАДАЧИ С МКЕ И ПРИЛОЖЕНИЕТО ИМ В ОБЛАСТТА НА ВЪРТЯЩИ СЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ

Ивайло Панайотов, Димитър Сотиров

Резюме. *Обект на разглеждане са предлаганите възможности на софтуерния продукт ANSYS за решаване на 2D задачи с М.К.Е. и приложението им в изследването на въртящи се електрически машини. Предложени са и добри практики за съставяне на модел на електрическа машина с насоченост към параметризация на геометрията на напречното сечение с цел автоматизация на рутинните дейности в процеса на изследване.*

APPLICATION OF ANSYS SOFTWARE TO SOLVE PROBLEMS WITH FEM AND ITS APPLICATION IN FIELD OF ROTATING ELECTRICAL MACHINERY

Ivaylo Panayotov, Dimitar Sotirov

Abstract. *Under review are the opportunities of the software ANSYS to solve 2D problems with FEM and their application in the study of rotating electrical machines. Are proposed and better practices to establish a model of electric machine oriented in parameterization of the geometry of the cross section for automation of routine activities in the study.*

1. Въведение

Предлаганите възможности на продукта ANSYS за изследване на въртящи се машини са изключително големи. С този продукт могат да се решават следните типове задачи:

- Анализ на магнитно поле – магнитостатична; с променлива честота; с преходни процеси; с роторна динамика.
- Анализ на електрическо поле – квазистатична; с променлива честота и с преходен процес.
- Смесени задачи – електромагнитна към топлинна, електромагнитна към механична якост и др.

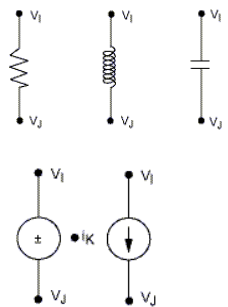
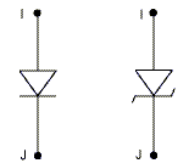
Разглеждания продукт се отличава с изключителна функционалност изразяваща се във възможността за избор на използваните типове крайни елементи, отличаващи се с различна „степен на свобода“. Това преимущество на софтуера е удобно при решаване на сложни сечения в които има различни области със различни физични свойства, прилагането на типове елементи с различна степен на свобода в различните области позволява да се създаде

относително по-малка матрица, което от своя страна значително намалява времето за получаване на решение.

2. Основни типове крайни елементи при решаването на 2D задачи

В таблица 1 са описани част от най-често използваните типове крайни елементи при решаването на 2D задачи за изследване на електрически машини и апарати.

Таблица 1

Наименование на К.Е. и приложение	Степени на свобода	Брой възли на елемента
PLANE 13	TEMP, AZ, UX, UY, VOLT- температура, магнитен вектор потенциал, преместване по X и Y, време-интегриран електрически потенциал	
PLANE 53	VOLT, AZ, CURR, EMF- време-интегриран електрически потенциал, магнитен вектор потенциал, ток, магнито движещо напрежение	
PLANE 223	UX, UY, TEMP, VOLT – преместване по X и Y, температура, напрежение	
PLANE 233	AZ, VOLT – магнитен вектор потенциал, време-интегриран електрически потенциал	
CIRCU 124	VOLT, CURR, EMF - време-интегриран електрически потенциал, ток, магнито движещо напрежение	
CIRCU 125	VOLT – време - интегриран електрически потенциал	

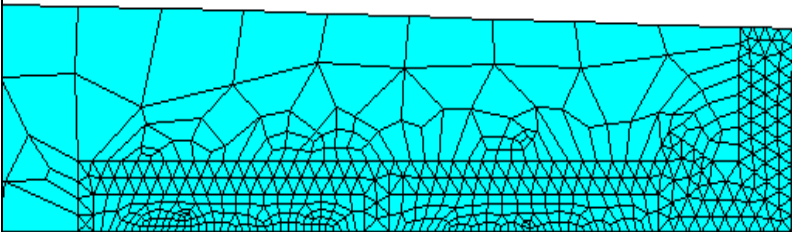
В зависимост от типа на изследваната задача се използва даден тип елементи отличаващи се с различна степен на свобода т.е. всеки възел от елемента има възможност да се получи числена стойност за различна физична величина. Възможните комбинации са описани подробно в таблица1. Например при задачи за бърз анализ или визуализация на поле и др. за

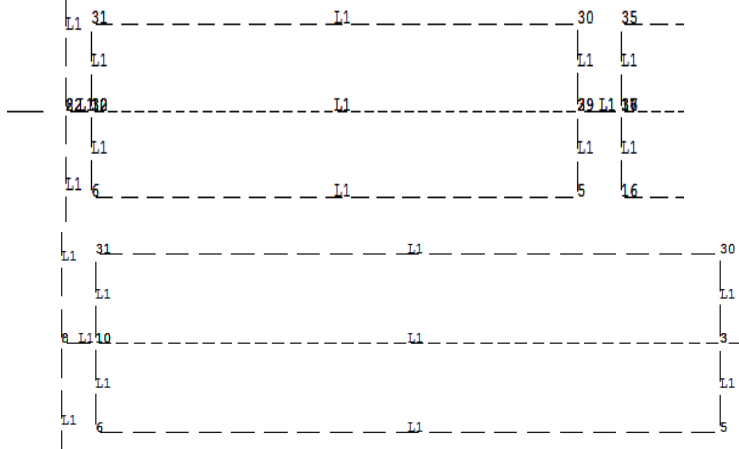
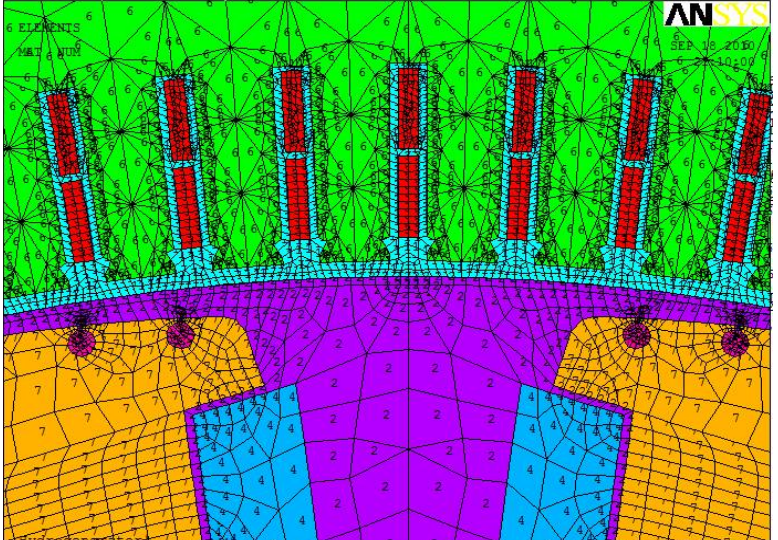
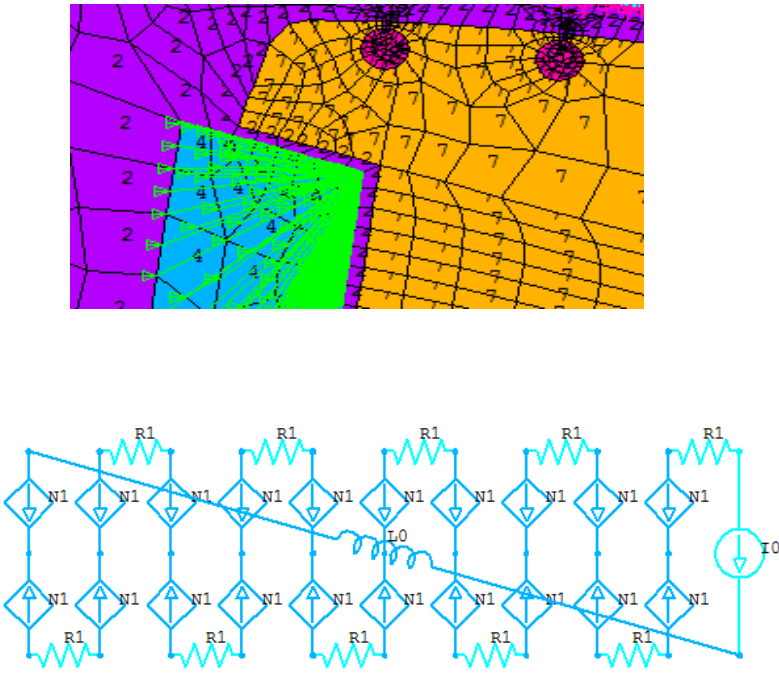
получаване на бързо решение е за предпочитане да се ползва PLAN223, защото се решават само две степени на свобода и се получава по малка матрица на решението.

3. Създаване на модели на въртящи се електрически машини

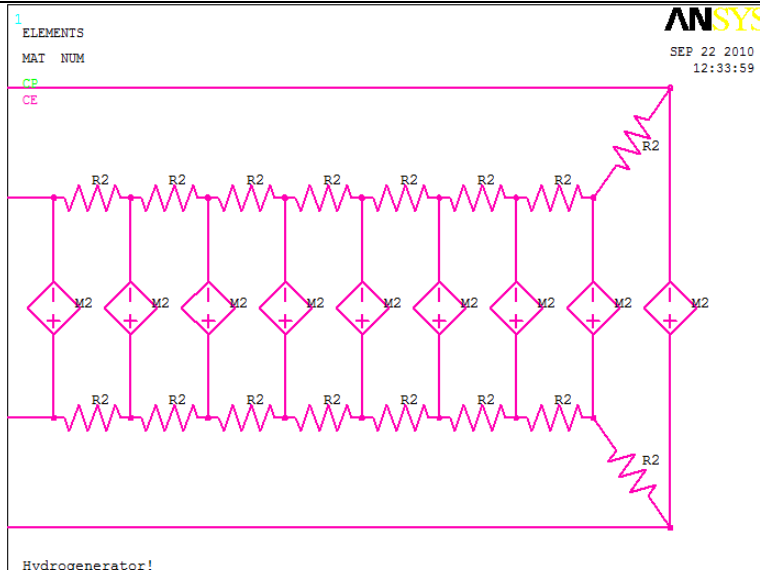
При създаване на модел на въртяща се електрическа машина е изключително удобно да се подходи по начина, описан в таблица 2. Предимството на този подход към създаване на сечение е краткото време за генериране на мрежа в сравнение с омрежване на цяла машина, също така се постига и по висока точност понеже всички циклично повтарящи се зони от сечението имат еднакви и циклично повтарящи се елементи.

Таблица 2

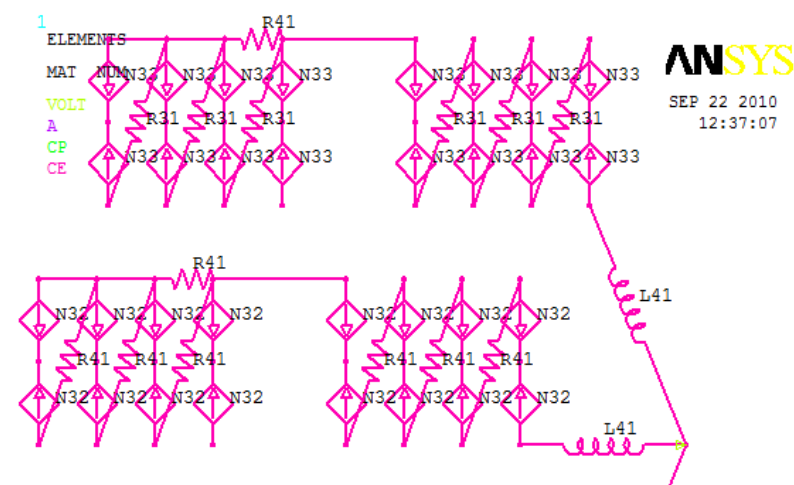
№	Наименование на процедурата	Визуален пример
1	Създаване на напречно сечение с периодичен характер.	
2	Пълно дефиниране на свойства на материалите към областите и генериране на мрежа от крайни елементи.	
3	Огледално копиране по една от границите.	

4	Премахване на дублираните възли след копирането	
5	Копиране по оста на въртене и създаване на финална геометрия и повторно премахване на дублиращи се възли.	
6	Асоцииране на отделните намотки със съответната електрическа верига. -част от сечението на полюсна бобина обвързано с ел. верига, еквивалентна на възбудителната намотка. -възбудителна намотка - изградена от независим източник на ток I_0, $R1$ – връзка между отделните сечения на бобините с еквивалентно съпротивление на челната част от намотката, $N1$ – елемент на намотка съставена от елементарни проводници, L_0 – обща индуктивност на намотката.	

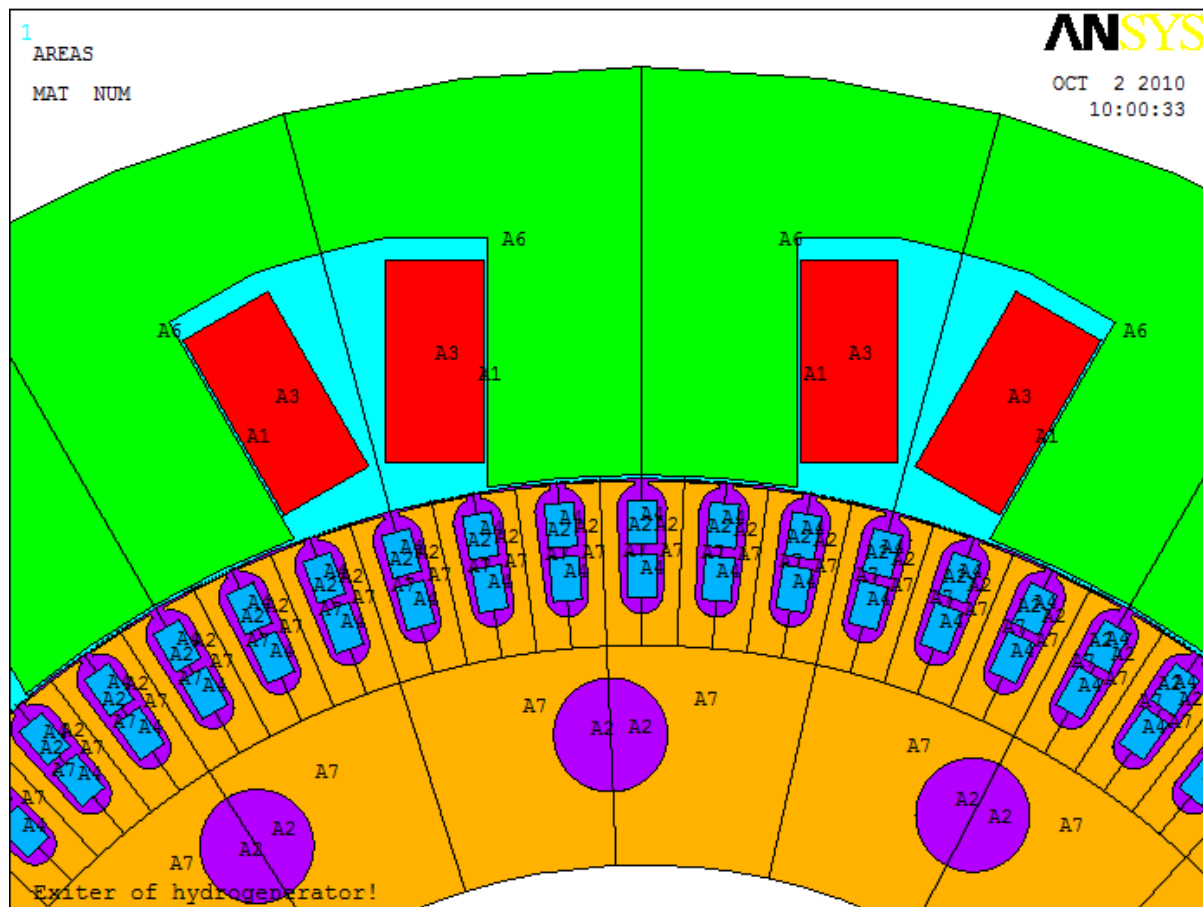
-част от демпферна намотка – изградена от R2 – челни части с клонящо към нула съпротивление, M2 – елемент на намотка, съставена от плътен проводник.



-част от статорна намотка – L41 – обща индуктивност на съответната фаза, свързана към общ звезден център, R31;R41 – активно съпротивление, заместващо челното съединение, N33;N32 – елемент на електрическа верига, съответстващ на намотка състояща се от елементарни проводници.

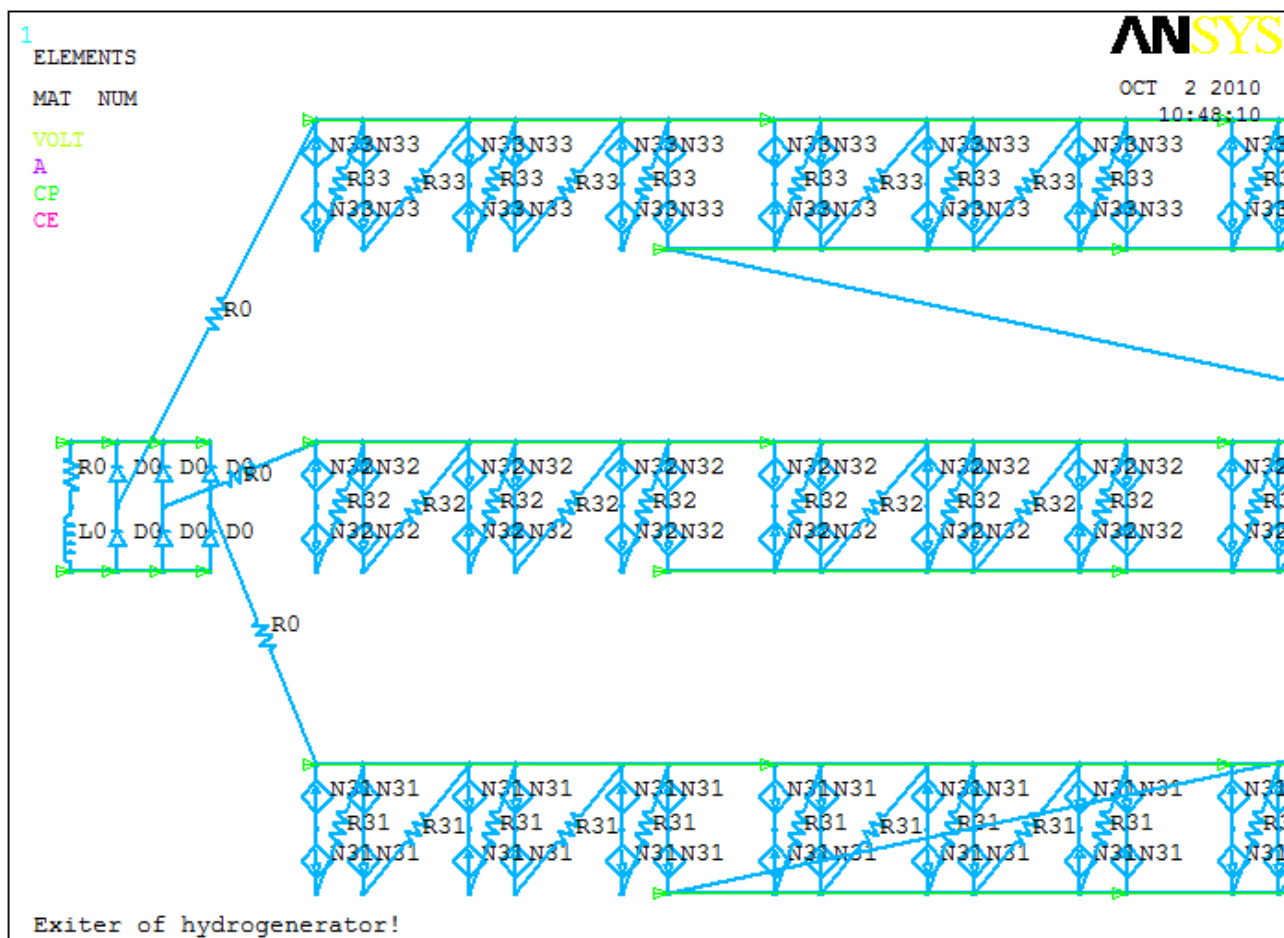


С приложението на комбиниран подход при изследване на електрически машини с метода на крайните елементи и електрически вериги се създава модел, който се доближава изключително много до реалния обект на изследването. Например при изследване на синхронен генератор и решаване на време – интегрална задача с роторна динамика може да се получат данни (форма, амплитуда) за напрежението и тока на машината директно, чрез сваляне на време интегрирания потенциал на изводите на намотката. Могат да се изследват основни режими на работа като: режим на празен ход, късо съединение, преходни процеси, режим на форсировка, симетрични и несиметрични натоварвания, ексцентричност на въздушната междина и влиянието и върху електромагнитните параметри и др.

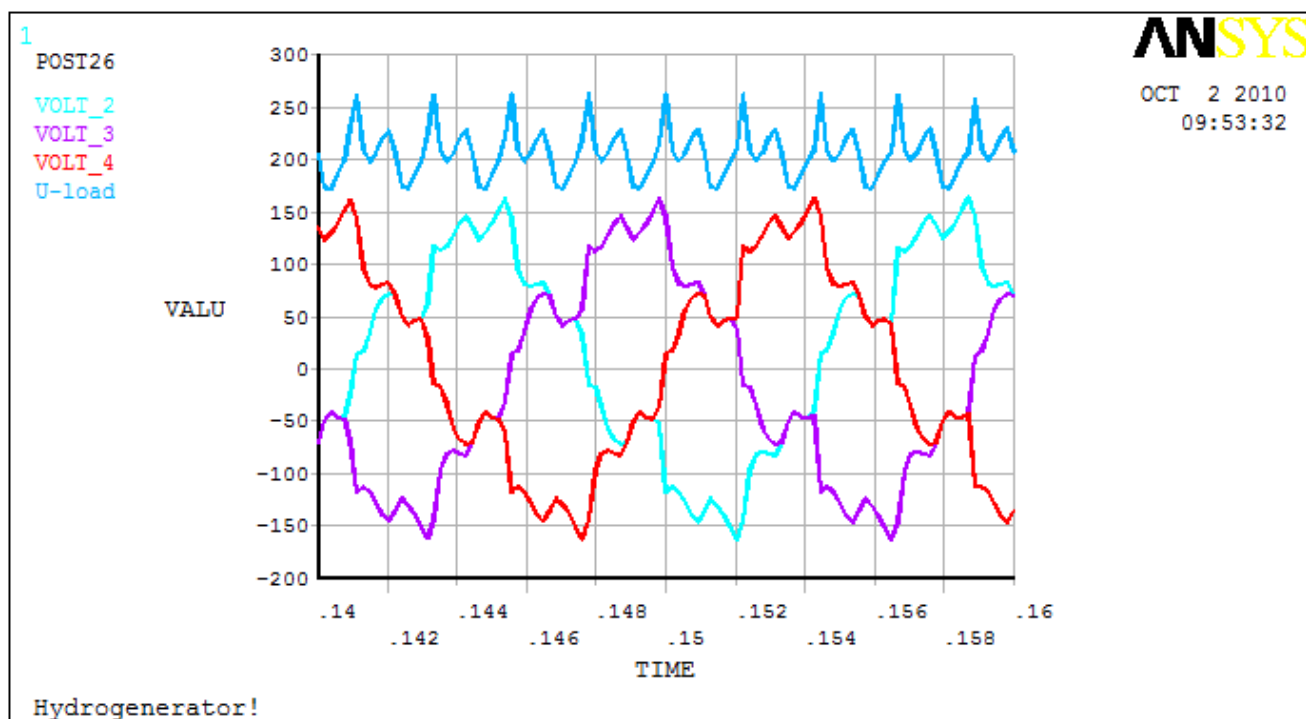


Фиг. 1. 2D сечение на възбудител за ХГ с въртящ се изправител

На фиг. 1 е показано напречно сечение на възбудител с въртящ се изправител за синхронен хидрогенератор, а на фиг. 2 е изобразена част от схемата на котвената намотка с диоден изправител и товар възбудителната намотка на синхронен генератор. В показания пример са използвани елементи PLAN53, за дефиниране на свойствата на материалите на разглеждания модел. За модела на електрическата верига са използвани елементи CIRCU124 – съпротивления еквивалентни на челните връзки на реалната машина, елемент отговарящ на сечение на намотка съставена от елементарни проводници, елемент индуктивност еквивалентен на общото индуктивно съпротивление на намотката. Диодът е представен с елемент CIRCU125. Еквивалентният товар – т.е. възбудителната намотка на ХГ е представен с неговите еквивалентни параметри активно и индуктивно съпротивление. На фиг. 3 е показан резултатът от решаване на време интегрирана задача с получаване на формата на напрежението на фазите на възбудителя и съответното изправено напрежение. В това решение е отчетено влиянието на реакцията на тока на котвата, което в случая води до силно деформиране на магнитното поле във въздушната междина и силно несинусоидална форма на е.д.н. на котвената намотка.



Фиг. 2. Схема на статорната намотка на възбудителя с токоизправител и товар



Фиг. 3. Форма на фазните и изправено напрежение на показания възбудител

Заклучение

Разгледания продукт се отличава с изключителна гъвкавост във всичките етапи на създаване на модела – пред-калкулатор, калкулатор, пост-калкулатор – статичен и време интегриран. Основно предимство е възможността за работа с графичен интерфейс и/или команден език, водещ до създаване на възможност за автоматизация на изследователската работа. Намалена вероятност за допускане на грешки при създадените модели, благодарение на възможността за обвързване на модела с електрическите вериги, даващи резултати за токовете и напреженията в отделните възли на изследвания модел.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абрамов, А. И., А. В. Иванов-Смоленский, Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, Высшая школа, Москва, 2001.
- [2] Копылов, И. П. Электрические машины, Изд. “Высшая школа”, Москва, 2000.
- [3] Bernd Aschendorf - Optimized Transient Simulation of Moving and Rotating Electrical Machines Using ANSYS.
- [4] Wei Wu – Modeling of electrical machines by using a circuit-coupled finite element method.
- [5] Joshua Lorenz, John T. Fowler - Synchronous Generator Sub-transient Reactance Prediction Using Transient Circuit Coupled Electromagnetic Analyses & Odd Periodic Symmetry

Автори: доц. д-р Димитър Сотиров – кат. „Електрически машини”, маг. инж. Ивайло Панайотов – „ЕЛПРОМ – ЗЕМ” АД

ИСЛЕДВАНЕ НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА ВИСШИ ХАРМОНИЦИ В КРИВАТА НА Е.Д.Н. НА ЯВНОПОЛЮСЕН СИНХРОНЕН ГЕНЕРАТОР С ANSYS И РЕШАВАНЕ НА СМЕСЕНА ЗАДАЧА С ЕЛ. ВЕРИГИ И МКЕ

Димитър Сотиров, Ивайло Панайотов

Резюме. Този доклад представя смесен нелинеен 2D модел на синхронен генератор изграден съвместно по метод на крайните елементи и електрически вериги. Създадена е динамична симулация на електрическата машина със съвкупно действие на всички съставляващи намотки, обвързани към съответната електрическа верига на модела. Разгледани са предимствата и недостатъците на двата подхода при изследване на хармоничния състав в кривата на ЕДН.

STUDING OF CONTENTS OF HIGER HARMONIC IN VOLTAGE SHAPE WITH ANSYS SOFTWARE AND SOLVING A CIRCUIT-COUPLED FEM MODEL

Dimitar Sotirov, Ivaylo Panayotov

Abstract. This report presents a nonlinear circuit-coupled 2D finite element model of synchronous generator for use in the dynamic simulation of electrical machines with a total effect of all windings attached to the corresponding circuit model. Made a comparison in the presence and absence of a damper winding in the model of the generator, advantages and disadvantages of both approaches in the study of harmonic contents in the curve of EMF.

1. Въведение

Въртящите се електрически машини са най-разпространеното средство за двупосочно преобразуване на механична към електрическа енергия. Към тях постоянно се поставят нови по-високи технически изисквания като: по-висок К.П.Д., по-високи моменти, по-нисък шум, електромагнитна съвместимост с други устройства и др. Това налага използването на нови изследователски методи и средства при създаването на нови електрически машини в условие на силно конкурентен пазар. Един от инструментите, позволяващ изследване на електрически машини който се отличава с висока точност и бързо получаване на резултати е компютърното прототипиране. Този метод на анализ позволява да се получат данни за техническите параметри на изследвания обект които се припокриват с тези на реални машини с много висока точност, също така този подход спестява време и средства при различните стадии на разработката на нов продукт. Един от водещите софтуерни продукти за компютърно

прототипиране е АНСИС, този продукт се отличава с възможност за моделиране на много физически процеси, срещащи се в различни машини и механизми в света на техниката, включително изследване на аеродинамични задачи, структурна устойчивост на конструкции, електромагнитни, топлинни и други задачи, както и смесени задачи от вида магнитна към топлинна, топлинна към механична, електромагнитна и електрически вериги.

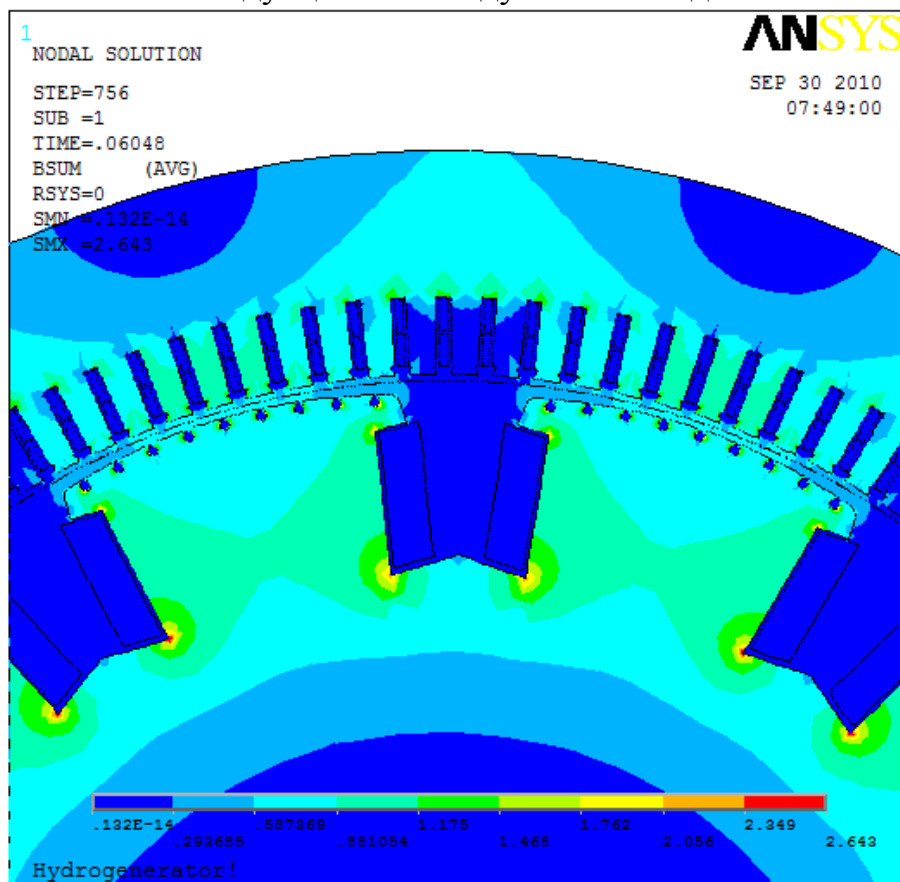
1. СЪСТАВЯНЕ НА МОДЕЛ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХАРМОНИЦИТЕ В КРИВАТА НА Е.Д.Н. НА СТАТОРНАТА НАМОТКА

Към електрическите машини работещи в режим на генератор се поставят високи технически изисквания, като едно от тях е електромагнитна съвместимост и по точно допустимо съдържание на висши хармоници в кривата на ЕДН. В настоящия доклад е представен модел на явнополусен синхронен генератор със следните данни:

Номинална пълна мощност	$S_n = 35 \text{ MVA}$
Номинална активна мощност	$P_n = 28 \text{ MW}$
Номинално напрежение	$U = 10500 \text{ V}$
Номинален ток	$I = 1870 \text{ A}$
Номинален фактор на мощността	$\cos\varphi=0.8$
Брой полюси	$2p=10$
Въздушна междина	$\delta_{\min}=23.5\text{mm}$
Външен диаметър на статора	$D = 3430\text{mm}$
Вътрешен диаметър на статора	$D = 2659\text{mm}$
Дължина на статорния пакет	$l = 1439,5\text{mm}$
Брой статорни зъби	$Z_1 = 120$
Стъпка на намотката	$y = 10$
Тип на намотката –	вълнова, с цяло q .

Съставен е модел с използване на PLANE53 – елементи и CIRCU124 – за съставяне на електрическа верига съответстваща на статорна, възбудителна и демпферна намотка. Създаден е динамичен 2D модел с решаване на време интегрирана задача. Предимство на приложения подход е получаване на решение, което съдържа стойности на възловите потенциали във времето – ток, напрежение, МДН и други прилежащи на степените на свобода на съответните елементи. Тези резултати позволяват достъп до стойности на величини, които в конвенционалните машини е невъзможно да се измерят, например токове в демпферната намотка. Друго съществено предимство е възможността за получаване на резултат с отчитане на взаимното влияние на всички намотки в машината. Например при изследване с магнитостатичен модел е изключително трудоемко да се създаде модел с отчитане на влиянието на демпферната намотка – това се постига чрез изчисление на токовете в отделните сечения на намотките. На фиг. 1 е показан 2D модел на генератора, представляващ напречен разрез, на който е роказана картината на магнитното поле при празен

ход за номинално напрежение. С прекъснатата линия е показан контура по който се определя магнитната индукция във въздушната междина.



Фиг. 1. Картина на полето при п.х. в напречен разрез на генератора

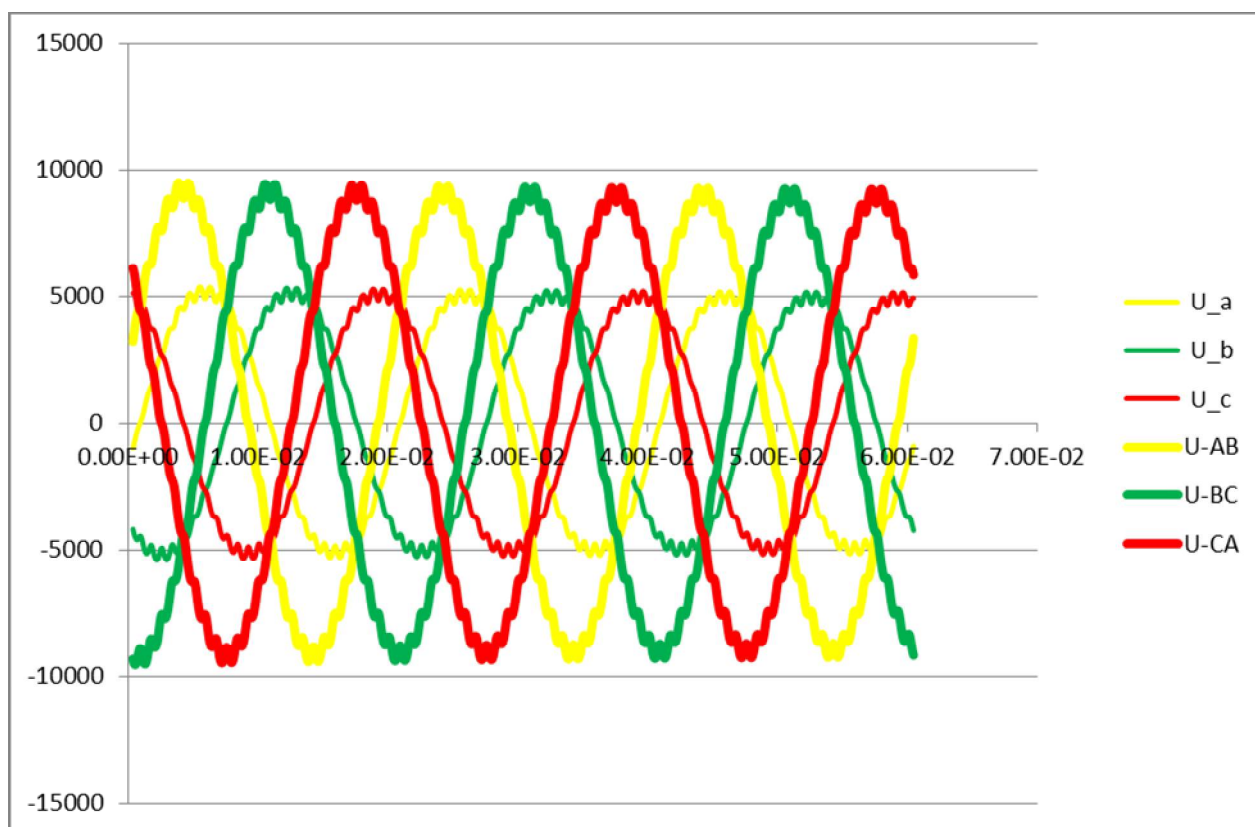
3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХАРМОНИЦИТЕ В КРИВАТА НА Е.Д.Н. НА СТАТОРНАТА НАМОТКА ПРИ НАЛИЧИЕ НА ДЕМПФЕРНА НАМОТКА

С помощта на направения модел е направено изчисление на хармониците на фазните и линейните е.д.н. на разглеждания генератор. Получените криви по изчислителен път са показани на фиг. 2, а на фиг. 3 са показани експериментално снета и теоретично определена крива на е.д.н., които са наложени една върху друга за да се сравнят.

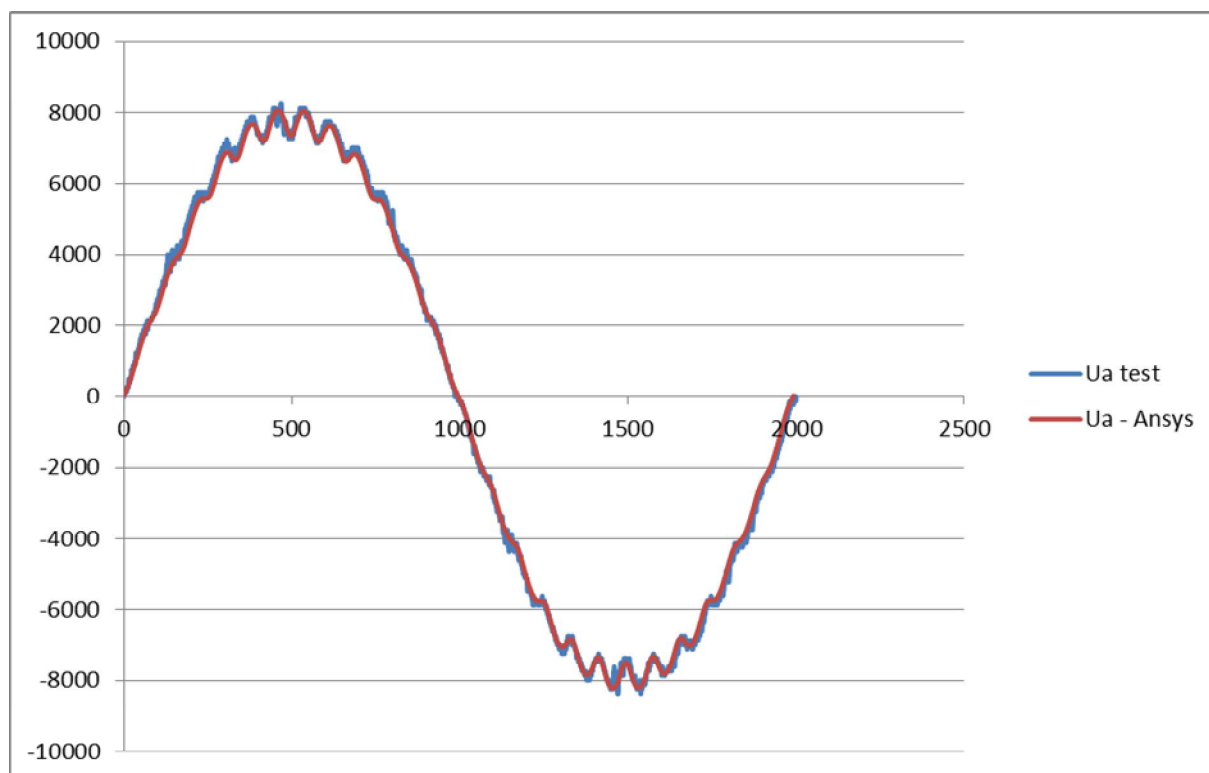
Вижда се, че двете криви практически съвпадат, което показва почти пълно съвпадение на теоретичните и експериментално снетите резултати. С използване на програма за фуриеров анализ двете криви са разложени в хармоничен ред. Получените резултати са показани на фиг. 4, от където се вижда, че най-силно се проявяват 3-ти, 7-ми и 9-ти хармоник и зъбните хармоници с номера 23 и 25. Изчисленията показват, че съдържанието на висши хармоници в кривата на линейното е.д.н. достига 3,5%, което надвишава допустимата стойност, съгласно БДС EN60034-1. За да се направи сравнение между двата подхода за определяне на хармоничния състав във фазното е.д.н.

на фиг.4 е показана крива на разпределение на хармониците, получена с използване на статичен 2D модел в средата на FEMM [10]. Кривата на е.д.н. е получена чрез разлагане на кривата на магнитната индукция във въздушната междина във фуриеров ред, изчисляване на е.д.н. на хармониците и умножаването им с коефициентите на разпределение и скъсяване на намотката за всеки хармоник.

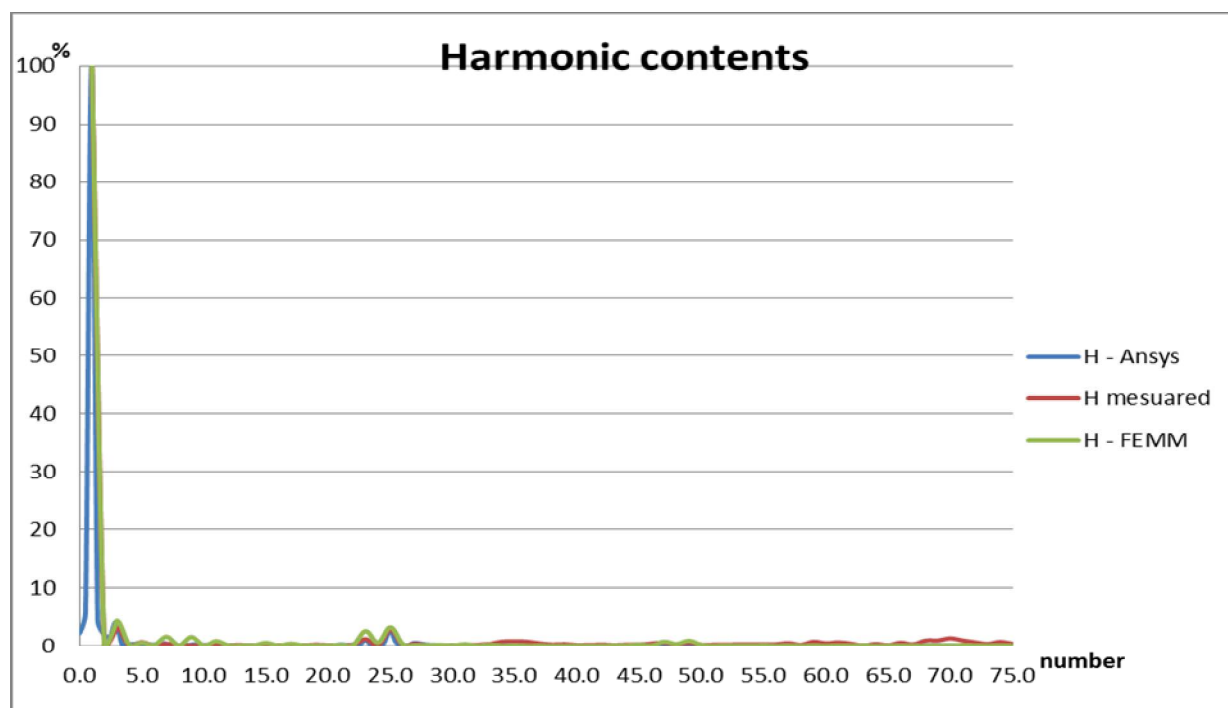
Предимство на предложения подход е възможността за получаване на моментните стойности на напрежението във всяко отделно решение. Това позволява след решаване на N стъпки в даден възел прилежащ на намотката да се измери неговия потенциал, а натрупването на потенциалите от всяка стъпка на решението дава крива в цифров и/или графичен вид подобна на такава снета с осцилоскоп. Прилагането на този подход в сравнение с решаване на статична задача спестява много изследователска работа изразяваща се в разлагане в ред на Фурие на кривата на магнитната индукция във въздушната междина и пресмятането на индивидуалното е.д.н. на всеки съдържащ се хармоник. Освен това се постига по-висока точност и се избягва възможността за допускане на грешка. От фиг.4 се вижда, че стойностите на 3, 7, 9 ти хармоници, получени чрез решаване на статична задача са силно завишени в сравнение със стойностите, получени от решаване на динамичния модел. В таблица 1 е дадено процентното съдържание на трети и зъбните хармоници, получени по двата метода.



Фиг. 2. Криви на фазно и линейно напрежения



Фиг. 3. Криви на фазното напрежение, получени от изпитания и от модел в Ансис

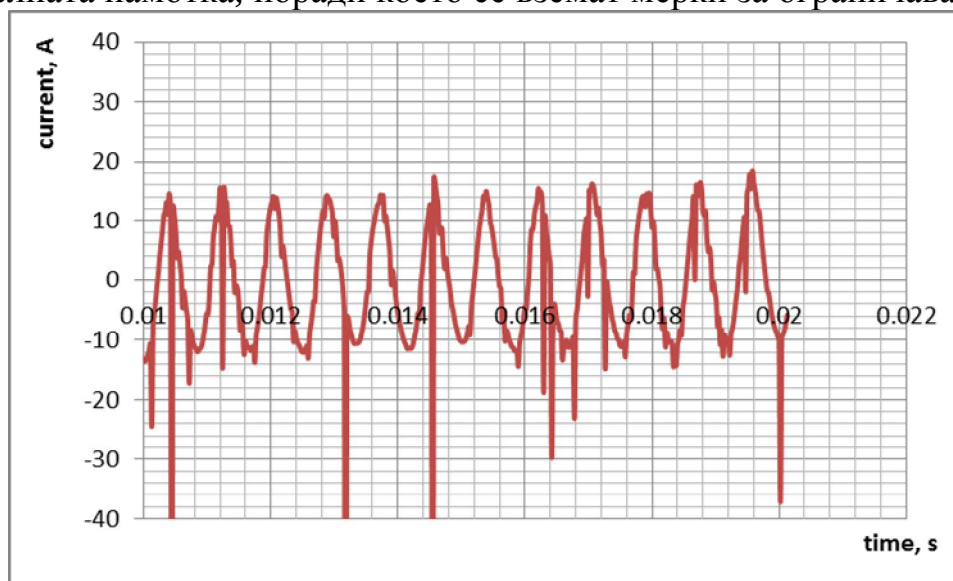


Фиг. 4. Хармоничен състав на фазното напрежение, получено от изпитания и от модел в Ансис

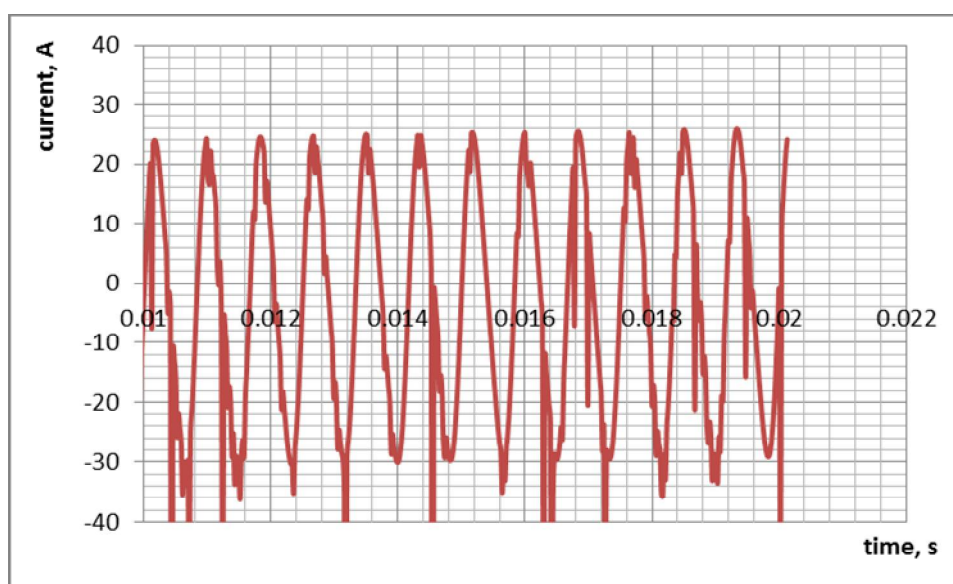
Таблица 1

Номер	3	5	7	9	23	25
измерване	3,18%	0,62%	0,35%	0,36%	1,15%	2,77%
ANSYS	4,07%	0,46%	0,43%	0,25%	0,99%	2,74%
FEMM	4,3 %	0,54%	1,56%	1,51%	2,53%	3,2%

На фиг. 5, 6 и 7 са показани изчислените криви на тока в три пръта на успокоителната намотка, които са предизвикани от зъбните хармоници на магнитната индукция във въздушната междина, които при не добре подбрана стъпка на успокоителната намотка индуцират е.д.н. в проводниците и. Ефектът от действието на тези токове е появата на допълнителни загуби в успокоителната намотка, поради което се вземат мерки за ограничаването им.

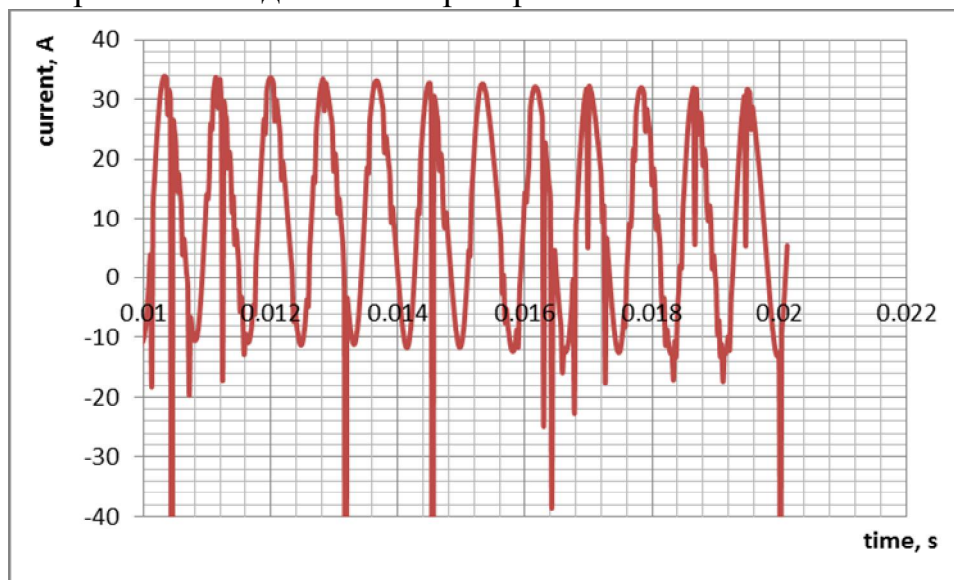


Фиг. 5

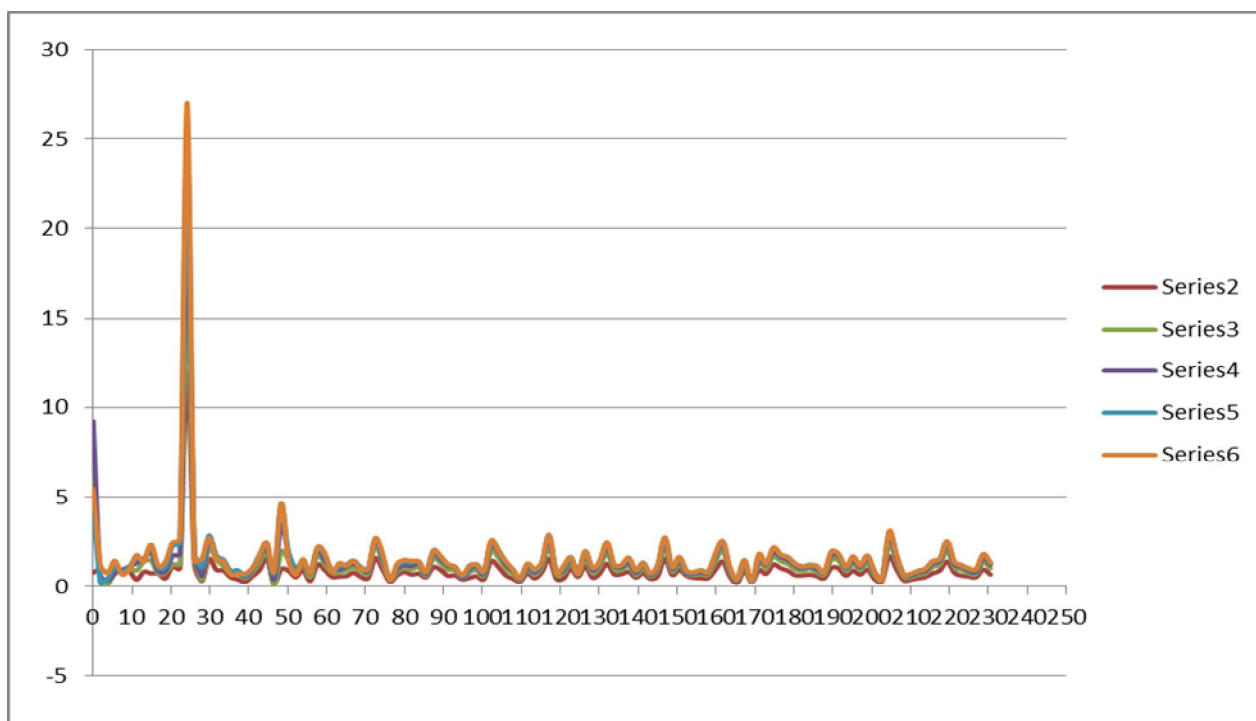


Фиг. 6

Както показват изследванията токовете в успокоителната намотка, породени от е.д.н. на зъбните хармоници, водят до усиление на хармониците на магнитната индукция на полето във въздушната междина. В съчетание със загубите, породени от тези токове, ефектът от неправилно подбраната стъпка на проводниците на успокоителната намотка е влошаване на показателите на генератора по отношение на коефициента на полезно действие и наличието на хармоници в кривата на е.д.н. на генератора.



Фиг. 7



Фиг. 8. Хармоничен състав на токовете в отделните пръти на демпферната намотка

4. Заключение

Получените резултати показват много добро съвпадение между теоретичните и експерименталните резултати за кривата на е.д.н. на разглеждания генератор. Това позволява да се направи извода, че използвания подход осигурява висока точност при изследване на хармониците на е.д.н. и е подходящ за анализ на нови конструкции на синхронни генератори. Получените резултати за токовете в прътите на успокоителната намотка позволяват да се оцени големината на загубите в тях, предизвикани от хармониците на магнитната индукция във въздушната междина. Създаденият модел има съществени предимства в сравнение със статични модели при изследване на хармичния състав, отличава се с висока точност и позволява да се избегнат грешки при проектиране на синхронни генератори.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ангелов, А., Д. Димитров, Електрически машини I част, ДИ „Техника“, София, 1987.
- [2] Абрамов, А. И., А. В. Иванов-Смоленский, Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, Высшая школа, Москва, 2001.
- [3] Копылов, И. П. и др., Проектирование электрических машин, Высшая школа, Москва, 2005.
- [4] Копылов, И. П. Электрические машины, Изд. “Высшая школа”, Москва, 2000.
- [5] Шуйский В. П. Расчет электрических машин, Изд. “Энергия”, Ленинград, 1968.
- [6] БДС EN60034-1+A1+A2:2001. ВЪРТЯЩИ СЕ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ, част 1: Обявени данни и работни характеристики.
- [7] Bernd Aschendorf - Optimized Transient Simulation Of Moving And Rotating Electrical Machines Using ANSYS
- [8] Wei Wu – Modeling of electrical machines by using a circuit-coupled finite element method
- [9] Joshua Lorenz, John T. Fowler - Synchronous Generator Sub-transient Reactance Prediction Using Transient Circuit Coupled Electromagnetic Analyses & Odd Periodic Symmetry
- [10] Sotirov, D., Pl. Rizov, I. Panayotov, Study on harmonics spectrum in wave form of magnetic induction in air gap and e.m.f. of the synchronous hydro generators”, XVI-TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM SIELA 2009, BOURGAS 2009, 4 – 6.06.2009, VOL. 1, p.262-271.

Автори: доц. д-р Димитър Сотиров – кат. „Електрически машини“, маг. инж. Ивайло Панайотов – „ЕЛПРОМ – ЗЕМ” АД

СЪВРЕМЕННИ СРЕДСТВА ЗА ТЪРГОВСКО ИЗМЕРВАНЕ НА КОЛИЧЕСТВА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ В ПРЕНОСНИТЕ И РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ I ЧАСТ: МРЕЖИ ВИСОКО И СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Петко Костадинов, Живко Даскалов, Стефчо Гунински,
Калинка Тодорова

Резюме. Всяка система за търговско измерване на количества електрическа енергия в преносните и разпределителни мрежи за високо и средно напрежение се състои от измервателни трансформатори за ток и напрежение и електромер(и) за измерване на активна и реактивна електрическа енергия. В статията е представен е преглед на техническите, метрологични и експлоатационни характеристики на основните средства за измерване, влизащи в състава на такава система, в съответствие със специфичните изисквания, заложен в действащите стандартизационни документи.

MODERN DEVICES FOR MEASUREMENT OF THE ENERGY QUANTITY IN ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION NETWORKS PART 1: HIGH AND AVERAGE VOLTAGE NETWORKS

Petko Kostadinov, Jivko Daskalov, Stefcho Guninski, Kalinka Todorova

Abstract. Each system for trade measurement of the quantity of the electrical energy in high and average voltage electrical transmission and distribution networks includes instruments current and voltage transformers and electricity meter(s) for measuring the active and reactive electrical energy.

In the paper, an overview of the technical, metrological and operating characteristics of the main devices for measuring, included in this system, is presented. These modern measuring devices concern the specific requirements in the basic standards.

1. Увод

Заявеното от ДКЕВР твърдо намерение да се въведе в течение на една година реален пазар на електрическа енергия налага да се направи преглед на техническите, метрологични и експлоатационни характеристики на системите за търговско измерване на:

- количествата електрическа енергия в мрежите високо (ВН) и средно (СН) напрежение;
- количествата електрическа енергия в електроразпределителните мрежи ниско напрежение (НН).

Това разделение се определя както от различния състав на средствата, участващи в системите за измерване на количества електрическа енергия в мрежите ВН, СН и НН, така и от различните показатели за ефективност на преноса и разпределението (съотношение активна / реактивна енергия, среден $\cos j$ на мрежата, върхова енергия, брой на тарифи и т.н.).

В настоящата първа част на доклада е направен преглед и анализ на средствата за измерване в мрежите ВН и СН. Поради голямото разнообразие на инсталираните в мрежите НН електромери по отношение на вида (индукционни и статични), производителите (български и чуждестранни), метрологичните характеристики (клас на точност) и броя на тарифите (едно-, дву- и тритарифни) оценка на тяхната пригодност в новите пазарни условия ще бъде направена в „Част II : мрежи ниско напрежение”

2. Системи за измерване на количества електрическа енергия в мрежи ВН и СН

Според авторите състоянието на съвременните системи за измерване на количества електрическа енергия трябва да се извърши на базата на специфичните изисквания, заложи в действащите стандартизационни документи.

2.1. Състав на измервателната система

Тъй като мрежите от този тип са трипроводни, то най-икономичната система за измерване на количества електрическа енергия включва:

- три измервателни трансформатора за ток във всяка фаза;
- три измервателни трансформатора за напрежение във всяка фаза;
- един многофункционален или няколко отделни статични електромери за измерване на активна и реактивна енергия в две посоки.

В съответствие с основното метрологично изискване класовете на точност на измервателните трансформатори за ток и напрежение трябва да бъдат като минимум с един порядък по-високи от класовете на точност на електромерите.

2.2. Изисквания към измервателните трансформатори за ток и напрежение

Съгласно Правилата за измерване на количества електрическа енергия [1] електромерът трябва да бъде свързан към отделен токов и напрежителен трансформатор, откъдето следва, че в статията ще бъдат разгледани само специфичните изисквания към измервателните трансформатори за ток и напрежение, предназначени за измервателни цели.

Понастоящем всички технически, експлоатационни и метрологични изисквания към известните разновидности измервателни трансформатори за ток и напрежение са нормирани в осем стандарта [2]. Първите пет стандарта нормират съвременните изисквания към традиционните измервателни трансформатори за ток и напрежение (индуктивни токови и напрежителни,

комбинирани, капацитивни напрежителни). Последните два стандарта нормират изискванията към принципно новата разновидност **електронни** напрежителни и токови трансформатори. Като правило те съдържат първични сензори (при токовите трансформатори те могат да бъдат сензори, основани на ефекта на Хол, въздушни бобини на Роговски или оптични сензори, основани на ефекта на Фарадей за въздействие на магнитното поле върху поляризацията на светлината, а при напрежителните – подходящо разположени сензори, основани на ефекта на Покел) и комплекс от устройства, осигуряващи аналогов и цифров изход. Последният е от особено значение за повишаване на общата точност на измерване на количества електрическа енергия. При еднакви метрологични характеристики с тези на традиционните трансформатори те се характеризират със значително по-широк честотен обхват – от 10 Hz до 6 kHz (което е особено важно за консуматори с високо съдържание на висши хармоници в тока и напрежението – дъгови електропечи, електрическият транспорт и др.), както и с разширен обхват на измерване (от 1A до 3 600 A и от 69 до 765 kV).

Основни характеристики на токовите трансформатори

- номинална вторична мощност, VA : 2,5 ; 5 ; 10 ; 15 и 30;
- номинален вторичен ток, A : 1 , 2 и 5 ;
- клас на точност за измервателни цели: 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 0,2S и 0,5S;
- допустими преводни и ъглови грешки – съгласно таблица 1.

Таблица 1. Допустими преводни и ъглови грешки

Клас на точност	Граници на преводната грешка $\pm e_I$, в %					Граници на ъгловата грешка $\pm d_I$, в минути				
$m = I / I_n \cdot 100$	5	20	100	120		5	20	100	120	
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1		15	8	5	5	
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2		30	15	10	10	
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5		90	45	30	30	
1	3,0	1,5	1,0	1,0		180	90	60	60	
$m = I / I_n \cdot 100$	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30

Забележки:

1. Допустимите грешки на трансформаторите с допълнително означение „S” са в сила само за номинален вторичен ток 5 A.
2. Преводните и ъгловите грешки на токовите трансформатори не трябва да превишават стойностите, посочени в таблица 1, при товари от $(0,25 \div 100)$ % от номиналния.
3. За трансформатори с номинална вторична мощност, равна или по-голяма от 5 VA, товарът трябва да бъде с фактор на мощността $\cos \varphi = 0,8$ (инд.). За трансформатори с мощност < 5 VA, товарът трябва да бъде с фактор на мощността $\cos \varphi = 1$.

4. Във всички случаи минималната стойност на товара, за която се гарантират грешките, е 1 VA.

5. Определянето на грешките на токови трансформатори с няколко вторични намотки, трябва да се извършва при два режима на неизпитваните вторични намотки:

- а) свързани накъсо;
- б) свързани към номинален товар.

Основни характеристики на напржителните трансформатори

- номинална вторична мощност, VA : 10, 15, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 и 500. Подчертаните стойности са препоръчителни.
- номинално вторично напрежение, V : 110, 100, $110/\sqrt{3}$, $100/\sqrt{3}$;
- клас на точност за измервателни цели: 0,1 ; 0,2 ; 0,5 и 1;
- допустими преводни и ъглови грешки – съгласно таблица 2.

Таблица 2. Допустими преводни и ъглови грешки

Клас на точност	Граници на преводната грешка $\pm e_U$, в %	Граници на ъгловата грешка $\pm d_U$, в минути
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1,0	40

Забележки:

1. Преводните и ъгловите грешки на напржителните трансформатори не трябва да превишават стойностите в таблица 2 при вторични напрежения от $(80 \div 120)$ % от номиналното и при товари от $(0,25 \div 100)$ % от номиналния.
2. Определянето на грешките на напржителни трансформатори с няколко напржителни намотки трябва да се извършва при два режима на неизпитваните вторични намотки:
 - а) празен ход;
 - б) свързани към номинален товар.

Много често измервателните трансформатори за ток и напрежение се изпълняват като комбинирани, при което се спестява една изолационна система. Това е особено важно при трансформаторите за високи и свръхвисоки напрежения.

2.3. Изисквания към статичните електромери за активна и реактивна енергия

Към момента всички технически, експлоатационни и метрологични изисквания към известните разновидности променливотокови уреди за измерване на електрическа енергия са нормирани в 12 стандарта. От тях метрологични изисквания към статични електромери се предявяват само в три [3].

При условията, предписани в тези стандарти, грешките на електромерите за активна енергия за съответния клас на точност не трябва да превишават стойностите, дадени в таблица 3 и таблица 4, а тези на електромерите за

реактивна енергия – не трябва да превишават стойностите, дадени в таблица 5 и таблица 6.

Ако електромерът е предназначен да измерва енергията в две посоки, стойностите на грешките в таблиците се отнасят за всяка посока.

Таблица 3. Допустими основни грешки на електромерите за активна енергия за еднофазни и натоварени симетрично във всяка фаза трифазни електромери

Стойност на тока (за електромери за трансформаторно свързване)	Фактор на мощността $\cos \varphi$	Граници на грешката, % , за електромери с клас на точност			
		0,2S	0,5S	1	2
$0,01 I_n \leq I < 0,01 I_n$ ¹⁾	1	$\pm 0,4$	$\pm 1,0$	-	-
$0,02 I_n \leq I < 0,05 I_n$	1	-	-	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$
$0,05 I_n \leq I \leq I_{\max}$	1	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	-	-
$0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	1	-	-	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
$0,02 I_n \leq I \leq 0,1 I_n$	0,5 (индуктивен)	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	-	-
	0,8 (капацитивен)	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	-	-
$0,05 I_n \leq I \leq 0,1 I_n$	0,5 (индуктивен)	-	-	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$
	0,8 (капацитивен)	-	-	$\pm 1,5$	-
$0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	0,5 (индуктивен)	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	-	-
	0,8 (капацитивен)	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	-	-
$0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	0,5 (индуктивен)	-	-	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
	0,8 (капацитивен)	-	-	$\pm 1,0$	-
При особени изисквания:					
$0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	0,25 (индуктивен)	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	-	-
	0,5 (капацитивен)	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	-	-
$0,1 I_n \leq I_n \leq I_{\max}$	0,25 (индуктивен)	-	-	$\pm 3,5$	-
	0,5 (капацитивен)	-	-	$\pm 2,5$	-

¹⁾ Електромерите с класове на точност 0,2S и 0,5S трябва да се свързват чрез токови измервателни трансформатори с класове на точност 0,2S и 0,5S.

Таблица 4. Допустими основни грешки на електромерите за активна енергия за трифазни електромери, натоварени само в една (коя да е) фаза при симетрично трифазно напрежение в напрежителните вериги

Стойност на тока (за електромери за трансформаторно свързване)	Фактор на мощността $\cos \varphi$	Граници на грешката, % , за електромери с клас на точност:			
		0,2S	0,5S	1	2
$0,05 I_n \leq I \leq I_{\max}$	1	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	-	-
$0,05 I_n \leq I \leq I_{\max}$	1	-	-	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$
$0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	0,5 (индуктивен)	$\pm 0,4$	$\pm 1,0$	-	-
$0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	0,5 (индуктивен)	-	-	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$

Таблица 5. Допустими основни грешки на електромерите за реактивна енергия за еднофазни и натоварени симетрично във всяка фаза трифазни електромери

Стойност на тока (за електромери за трансформаторно свързване)	Фактор на мощността $\sin \varphi$ (индуктивен или капацитивен)	Граници на грешката, % , за електромери с клас на точност:	
		2	3
$0,02 I_n \leq I < 0,05 I_n$	1	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$
$0,05 I_n \leq I \leq I_{\max}$	1	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$
$0,1 I_n \leq I < 0,2 I_n$	0,5	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$
$0,2 I_n \leq I \leq I_{\max}$	0,5	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$
$0,2 I_n \leq I \leq I_n$	0,25	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$

Таблица 6. Допустими основни грешки на електромерите за реактивна енергия за трифазни електромери, натоварени само в една (коя да е) фаза при симетрично трифазно напрежение в напрежителните вериги

Стойност на тока (за електромери за трансформаторно свързване)	Фактор на мощността $\sin \varphi$ (индуктивен или капацитивен)	Граници на грешката, % , за електромери с клас на точност:	
		2	3
$0,05 I_n \leq I < I_{\max}$	1	$\pm 3,0$	$\pm 4,0$
$0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	0,5	$\pm 3,0$	$\pm 4,0$

Допълнителните грешки, причинени от изменение на влияещите величини спрямо предписаните условия не трябва да надвишават стойностите, дадени в таблица 7.

Таблица 7. Допустими допълнителни грешки на електромери с класове на точност 0,2S и 0,5S

Влияеща величина	Стойност на тока (уравновесена, ако не е посочено друго)	Фактор на мощността	Среден температурен коэффициент % / К за електромери клас	
			0,2S	0,5S
Изменения в температурата на околната среда ⁹⁾	$0,05 I_n \leq I \leq I_{\max}$ $0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	1 0,5 инд.	$\pm 0,01$ $\pm 0,02$	$\pm 0,03$ $\pm 0,05$
			Гранични стойности на промените на процентната грешка за електромери от клас	
			0,2S	0,5S
Изменения в напрежението $\pm 10\%$ ^{1), 8)}	$0,05 I_n \leq I \leq I_{\max}$ $0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	1 0,5 инд.	$\pm 0,1$ $\pm 0,2$	$\pm 0,2$ $\pm 0,4$
Изменения в честотата $\pm 2\%$ ⁸⁾	$0,05 I_n \leq I \leq I_{\max}$ $0,1 I_n \leq I \leq I_{\max}$	1 0,5 инд.	$\pm 0,1$ $\pm 0,1$	$\pm 0,2$ $\pm 0,2$
Обратна фазова последователност	$0,1 I_n$	1	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$
Несиметрично напрежение ³⁾	I_n	1	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Спомагателно напрежение $\pm 15\%$ ⁴⁾	$0,01 I_n$	1	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$
Наличие на хармоници в токовете и напреженията в вериги	$0,5 I_{\max}$	1	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$
Субхармоници в променливотоковата верига	$0,5 I_n$ ²⁾	1	$\pm 0,6$	$\pm 1,5$
Продължителна магнитна индукция на външен източник ⁵⁾	I_n	1	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$
Магнитна индукция на външен източник $0,5 \text{ mT}$ ⁵⁾	I_n	1	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Електромагнитни ВЧ полета	I_n	1	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
Работа на принадлежности ⁷⁾	$0,01 I_n$	1	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$
Смущения, причинени от радиочестотни полета	I_n	1	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
Бързи преходни процеси/пакети импулси	I_n	1	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
Устойчивост на затихващи колебания	I_n	1	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
¹⁾ За напрежениови обхвати от минус 20 % до минус 10 % и от + 10 % до + 15 % граничните стойности на промените на процентната грешка са равни на три пъти стойностите, посочени в таблицата. Под 8 % U_n грешката на електромера може да се изменя в границите от + 10 % до минус 100 %.				

- 2) Коефициентът на изкривяване на напрежението трябва да бъде по-малък от 1 %. За условията на изпитване виж 8.2.2.
- 3) Многофазни електромери с три измервателни елемента трябва да измерват и регистрират, в границите на промените на процентната грешка, показани в тази таблица, ако са прекъснати следните фази:
- при трифазна четирипроводникова мрежа, една или две фази;
 - при трифазна трипроводникова мрежа (ако електромерът е проектиран за тази функция), една от трите фази.

Тук се разглежда само прекъсване на фаза и не се разглеждат случаи като повреди на предпазител на трансформатор.

- 4) Прилага се само ако спомагателното захранване не е свързано вътрешно към напреженовата измервателна верига.
- 5) Магнитна индукция на външен източник от 0,5 mT , генерирана от ток със същата честота като тази на напрежението, приложено на електромера и при най-неблагоприятните условия за фаза и посока, не трябва да води до отклонение в процентната грешка на електромера, по-голямо от стойностите, посочени в тази таблица.

Магнитната индукция трябва да бъде получена чрез поставяне на електромера в центъра на кръгла бобина, със среден диаметър 1 m, с квадратно сечение, малка радиална дебелина по отношение на диаметъра и да има 400 At (ампер-навивки).

- 6) Такава принадлежност, която е вътре в кутията на електромера, когато се захранва периодично с електрическа енергия, например от електромагнитна на многотарифен регистър.

За предпочитане е свързването с външно(и) устройство(а) да е маркирано, за да показва правилния начин на свързване. Ако тези свързвания са направени с помощта на щепсели и гнезда, те трябва да се поставят еднозначно.

При липса на такова маркиране или еднозначно свързване промяната на грешката не трябва да превишава стойностите, посочени в тази таблица, ако електромерът е изпитван при свързване, което създава най-неблагоприятни условия.

- 7) Препоръчва се изпитвателната точка за промяна на напрежението и на честотата да бъде I_n .
- 8) Средният температурен коефициент трябва да бъде определен за целия работен обхват. Работният температурен обхват трябва да бъде разделен на подобхвати, като се извършат измервания 10 K и над 10 K под средата на обхвата. По време на изпитването не трябва да има случай температурата да излиза извън специфицирания температурен обхват

Забележка: В БДС EN 62053-21 и БДС EN 62053-23 са дадени аналогични таблици за допустимите допълнителни грешки на електромери за активна енергия с класове на точност 1 и 2 и на електромери за реактивна енергия с класове на точност 2 и 3.

Освен основните метрологични характеристики са нормирани и редица технически и експлоатационни изисквания:

- загуби на мощност в напрежителните и токовите вериги, както и тези във външния захранващ източник (ако има такъв);
- влияние на кратковременни свръхтокове върху грешката;
- влияние на самонагриването;
- изисквания към изолацията;
- изисквания към електромагнитната съвместимост;
- експлоатационни изисквания (отсъствие на самоход и праг на чувствителност)
- константа на електромера.

Трябва да се отбележи, че като правило техническите и метрологични характеристики на статичните електромери, произвеждани от водещите фирми –производителки, надхвърлят значително изискванията, заложи в цитираните стандарти. Това особено се отнася за точността на измерване на реактивна електрическа енергия. Повечето фирми декларираат точност на измерване на реактивна електрическа енергия, съответстваща на клас 0,5 вместо изискваните клас 2 и клас 3.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От представеното изследване могат да се направят следните изводи:

- Ø Класът на точност на статичните електромери удовлетворява напълно практическите изисквания;
- Ø В редица случаи класът на точност на измервателните трансформатори за ток и напрежение е по-нисък от този на статичните електромери, което води до намаляване на точността на измерване.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Правила за измерване на количеството електрическа енергия, ДВ бр.67/02.08.2004.
- [2] БДС EN 60 044 “Измерителни трансформатори”: части 1 ÷ 8.
- [3] БДС EN 62 053 “Променливотокови уреди за измерване на електрическа енергия”: части 21, 22 и 23.

Автори: доц. д-р Петко Костадинов, доц. д-р Живко Даскалов, доц. д-р Стефчо Гунински, гл. ас. инж. Калинка Тодорова – кат. „Обща Електротехника”

ОБОБЩЕН ИЗРАЗ НА ФУНКЦИЯТА НА РЕАКЦИЯ НА СРЕДАТА ПРИ ВИХРОВОТОКОВ КОНТРОЛ НА ПЛОСКИ ФЕРОМАГНИТНИ МНОГОСЛОЙНИ ОБЕКТИ

Живко Даскалов, Стефчо Гунински, Калинка Тодорова

Резюме. В доклада е изведен обобщен аналитичен израз на функцията на реакцията на плоска n -слойна проводяща среда, в случая когато тя се намира в полето на допиращ вихровотоков преобразувател. С въвеждане на т.н. локална магнитна проникваемост са отчетени специфичните условия на локално пренамагнитване на ферромагнитните слоеве. Предложен е алгоритъм за получаване от обобщения израз на изрази за функцията на средата за по-прости практически случаи.

A GENERALIZED ANALYTICAL EXPRESSION OF THE FUNCTION OF THE RESPONSE OF THE MEDIUM IN EDDY CURRENT TESTING OF FLAT FERROMAGNETIC MULTI-LAYER OBJECT

Jivko Daskalov, Stefcho Guninski, Kalinka Todorova

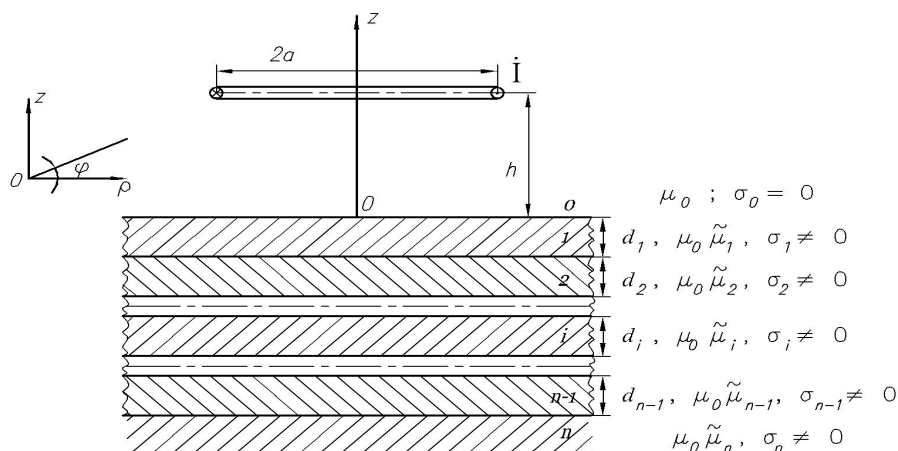
Abstract. The report is based on a generalized analytical expression of the function of the response of flat n -layer conductive medium in the case when it is located in the field of eddy current transducer. With the introduction of so called local magnetic permeability are taken into account the specific conditions of local magnetization of ferromagnetic layers. An algorithm for obtaining generalized presentation of the function of environment for more simple practical cases, is proposed.

1. Увод

За количествено изследване на влиянието на електрофизичните и геометрични характеристики на плоска многослойна среда върху параметрите на разположен в близост до нея допиращ вихровотоков преобразувател е необходимо да се реши граничната електродинамична задача за определяне на полето на кръгов токов контур в присъствие на плоска проводяща, и в най-общ случай нелинейна, среда и оттам да се определят „внесените” в контура активно и реактивно съпротивления.

2. Физическа постановка на задачата

В случая като най-обща може да се счита задачата за определяне на полето на кръгов токов контур, през който протича синусоидално изменящ се ток $Ie^{j\omega t}$ с кръгова честота ω и комплексна ефективна стойност I , разположен над многослойна нелинейна среда (фиг. 1).



Фиг. 1

Решаването на така формулираната задача в най-общ случай е свързано със значителни математически трудности поради нелинейната зависимост на магнитната проницаемост m от напрегнатостта на магнитното поле H .

В много случаи, когато феромагнетикът се намира в достатъчно слаби синусоидалноизменящи се полета, съществува възможност възникващите задачи да се решават с достатъчна точност с методите, разработени за линейни уравнения като се използва въведената още от Аркадьев [1] комплексна магнитна проницаемост на веществото. Тази възможност се основава на факта, че във феромагнетиците, намиращи се в слаби магнитни полета, индукцията се изменя също по синусоидален закон, но изостава по фаза на ъгъл y от напрегнатостта на магнитното поле и следователно хистерезисният цикъл добива формата на елипса, което пък от своя страна позволява той лесно да се изрази в аналитичен вид. (Действително, като се следва [2] и се запише напрегнатостта на магнитното поле във вида $H(t) = H_m \sin \omega t$, а индукцията в същата точка $B(t) = B_m \sin(\omega t - y)$, в координати B, H се получава уравнение на елипса в параметричен вид.)

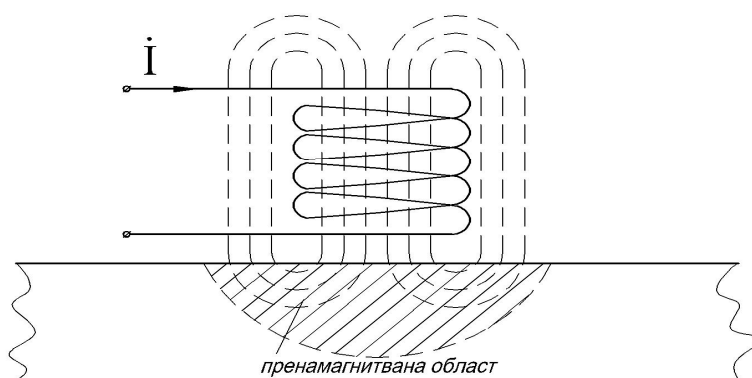
Като се изразят индукцията и напрегнатостта в комплексен вид и се вземе тяхното отношение се получава следният израз за комплексната магнитна проницаемост, характеризираща реалните свойства на феромагнетика в слаби синусоидални полета:

$$\mu_a = \frac{B_m}{H_m} = m_0 \mu = m_0 m e^{-iy} = m_0 (m' - jm''), \quad (1)$$

където:

$$y = -\arg \mathring{m} = -\arctg \frac{m''}{m'}$$

Когато се изследва взаимодействието на електромагнитни полета с феромагнитни среди за целите на вихровотоковата дефектометрия следва да се отчита факта, че под въздействието на слабото, съсредоточено в малка обемна област електромагнитно поле, се пренамагнитва не цялата, а само определена област от феромагнетика, намираща се в непосредствена близост до възбудителя (фиг. 2).



Фиг. 2

Следователно за отразяване на спецификата на пренамагнитване на феромагнетика в този случай най-подходящо е използването на въведената от Кифер [2] локална комплексна магнитна проницаемост, която се дефинира като магнитна характеристика на ограничена област на феромагнитното тяло, пренамагнитвана в слабо, синусоидално изменящо се електромагнитно поле, насочено перпендикулярно към горната гранична повърхност на плоския обект.

3. Определяне на магнитния вектор-потенциал по метода за непосредствено конструиране на решението

Анализът на структурата на диференциалното уравнение на Хелхолц за магнитния вектор-потенциал

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} + k^2 \dot{\mathbf{A}} = -m_0 \dot{\mathbf{J}}_B, \text{ където } k^2 = -j\omega m_0 \mathring{m}s \quad (2)$$

и решението му по класическия метод [3] показва, възможността да се използва методиката, предложена в [4] за непосредствено определяне на внесения магнитен вектор-потенциал във въздушната среда $\dot{\mathbf{A}}_{0BH}$, в която е разположен възбудителния контур (източника):

$$A_{0BH} = \int_0^{\infty} F_{ИЗТ}(\lambda) \cdot F_{СР}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

където: $F_{ИЗТ}(\lambda)$ – функция на източника (възбудителя), зависеща само от параметрите и разположението на източника на възбудителното поле;

$F_{СР}(\lambda)$ – функция на реакция на средата (накратко „функция на средата“), която зависи само от вида, структурата и параметрите на средата;

λ – параметър на интегралната трансформация на Ханкел.

4. Определяне на обобщен израз за функцията на реакция на средата

За практическо прилагане на метода за непосредствено конструиране на решението за A_{0BH} в [5] са дадени в табличен вид изрази за $F_{ИЗТ}(\lambda)$ за различни по форма възбудители.

Функцията на средата $F_{СР}(\lambda)$ за най-общия случай на плоска многослойна среда, състояща се от n - слоя (фиг. 1) се определя с изказа:

$$F_{cp}(\lambda) = F_{0n} = F_{01} \frac{1 + \frac{F_{1n}}{F_{01}} \exp(-2q_1 d_1)}{1 + F_{01} F_{1n} \exp(-2q_1 d_1)} \quad (4)$$

където:

$$F_{01} = \frac{\mu_1 l - q_1}{\mu_1 l + q_1}, \quad F_{1n} = F_{12} \frac{1 + \frac{F_{2n}}{F_{12}} \exp(-2q_2 d_2)}{1 + F_{12} F_{2n} \exp(-2q_2 d_2)}$$

$$F_{12} = \frac{\mu_2 q_1 - \mu_1 q_2}{\mu_2 q_1 + \mu_1 q_2}, \quad F_{2n} = F_{23} \frac{1 + \frac{F_{3n}}{F_{23}} \exp(-2q_3 d_3)}{1 + F_{23} F_{3n} \exp(-2q_3 d_3)}$$

$$F_{23} = \frac{\mu_3 q_2 - \mu_2 q_3}{\mu_3 q_2 + \mu_2 q_3}, \quad F_{3n} = F_{34} \frac{1 + \frac{F_{4n}}{F_{34}} \exp(-2q_4 d_4)}{1 + F_{34} F_{4n} \exp(-2q_4 d_4)}$$

$$\dots \dots \dots$$

$$F_{i-1,i} = \frac{\mu_i q_{i-1} - \mu_{i-1} q_i}{\mu_i q_{i-1} + \mu_{i-1} q_i}, \quad F_{i,n} = F_{i,i+1} \frac{1 + \frac{F_{i+1,i}}{F_{i,i+1}} \exp(-2q_i d_i)}{1 + F_{i,i+1} F_{i+1,i} \exp(-2q_i d_i)}$$

$$\dots \dots \dots$$

$$F_{n-1,n} = \frac{\tilde{m}_n q_{n-1} - \tilde{m}_{n-1} q_n}{\tilde{m}_n q_{n-1} + \tilde{m}_{n-1} q_n}.$$

В горните изрази са използвани и следните означения:

$$q_0 = l \quad (\text{тъй като } \sigma_0 = 0)$$

$$q_1 = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \tilde{m}_1 s_1}, \quad q_2 = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \tilde{m}_2 s_2},$$

$$q_i = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \tilde{m}_i s_i}, \dots, \quad q_n = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \tilde{m}_n s_n},$$

$\tilde{m}_1, \tilde{m}_2, \dots, \tilde{m}_i, \dots, \tilde{m}_n$ - относителни комплексни локални магнитни
проницаемости на съответните слоеве;

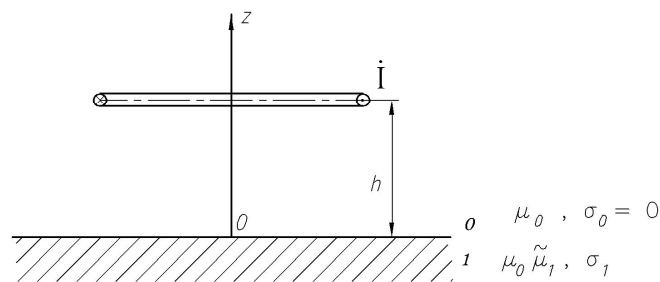
$s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$ - специфични електрически проводимости
на отделните области (слоеве)

$d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{n-1}$ - дебелини на отделните слоеве.

Анализът на горните изрази показва, че получаването на израз за функцията на средата за $(n-1)$ – слойна среда от изказа за функцията на средата за n – слойна среда, става чрез формална последователна замяна на индексите „0n” и „1n”, като се отстранява слоя, разположен непосредствено до средата, в която се намира преобразувателя.

На базата на получения по-горе обобщен израз лесно могат да бъдат определени изрази за функцията на средата за следните по-важни за практиката случаи:

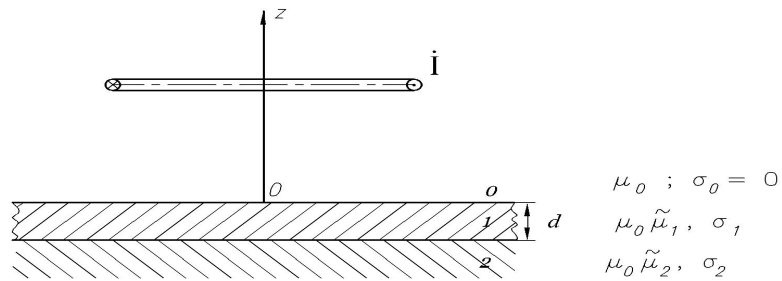
- *проводящо феромагнитно полупространство* (фиг. 3)



Фиг. 3

$$F_{CP}(l) = F_{01} = \frac{\tilde{m}_1 l - q_1}{\tilde{m}_1 l + q_1}, \quad \text{където } q_1 = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \tilde{m}_1 s_1} \quad (5)$$

- *двуслойна среда* (фиг. 4)



Фиг. 4

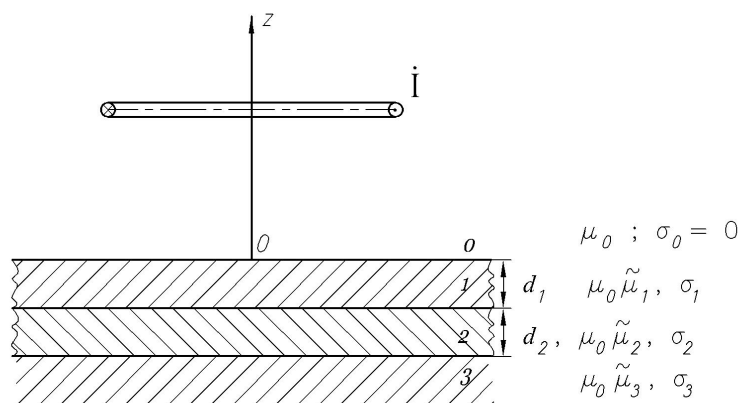
$$F_{CP}(l) = F_{02} = \frac{F_{01} + F_{12} \exp(-2q_1 d)}{1 + F_{01} F_2 \exp(-2q_1 d)}, \quad (6)$$

където

$$F_{01} = \frac{\tilde{m}_1 l - q_1}{\tilde{m}_1 l + q_1}, \quad q_1 = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \tilde{m}_1 s_1},$$

$$F_{12} = \frac{\tilde{m}_2 q_1 - \tilde{m}_1 q_2}{\tilde{m}_2 q_1 - \tilde{m}_1 q_2}, \quad q_2 = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \tilde{m}_2 s_2}.$$

- *трислойна среда* (фиг. 5)



Фиг. 5

$$F_{CP}(l) = \frac{F_{01} [1 + F_{12} F_{23} \exp(-2q_2 d_2)] + [F_{12} + F_{23} \exp(-2q_2 d_2)] \exp(-2q_1 d_1)}{1 + F_{12} F_{23} \exp(-2q_2 d_2) + F_{01} [F_{12} + F_{23} \exp(-2q_2 d_2)] \exp(-2q_1 d_1)}, \quad (7)$$

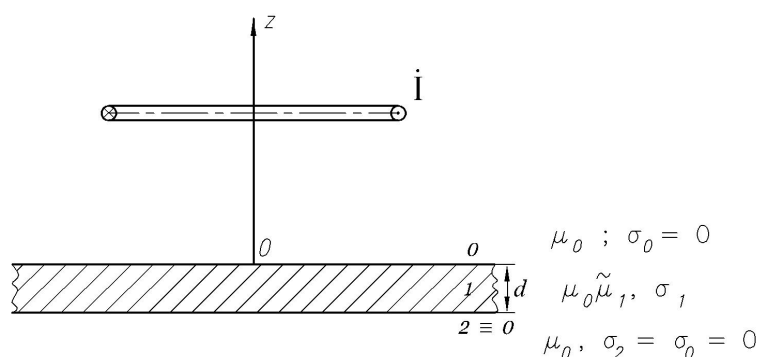
където:

$$F_{01}(l) = \frac{\hbar_1 l - q_1}{\hbar_1 l + q_1}; \quad F_{12}(l) = \frac{\hbar_2 q_1 - \hbar_1 q_2}{\hbar_2 q_1 + \hbar_1 q_2}; \quad F_{23}(l) = \frac{\hbar_3 q_2 - \hbar_2 q_3}{\hbar_3 q_2 + \hbar_2 q_3}$$

$$q_1(l) = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \hbar_1 s_1}; \quad q_2(l) = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \hbar_2 s_2};$$

$$q_3(l) = \sqrt{l^2 + j\omega m_0 \hbar_3 s_3}$$

- *еднослойна пластина (фиг. 6)*



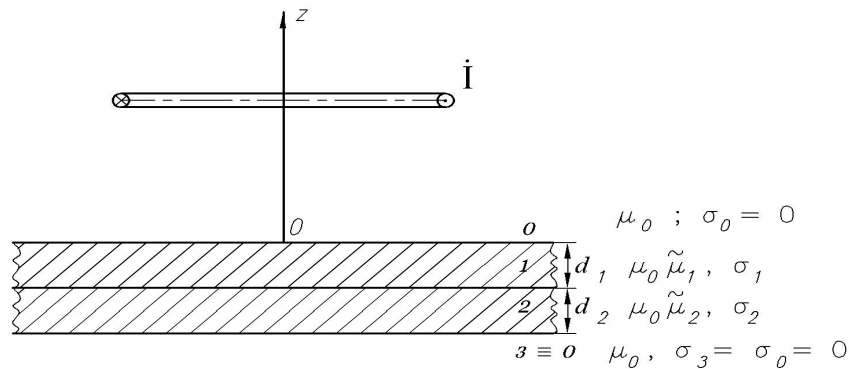
Фиг. 6

$$F_{CP}(l) = \frac{F_{01} + F_{12} \exp(-2q_1 d)}{1 + F_{01} F_{12} \exp(-2q_1 d)}, \quad (8)$$

където:

$$F_{01}(l) = \frac{\hbar_1 l - q_1}{\hbar_1 l + q_1}; \quad F_{12}(l) = \frac{q_1 - \hbar_1 l}{q_1 + \hbar_1 l};$$

- **двуслойна пластина (фиг. 7)**



Фиг. 7

$$F_{CP}(l) = \frac{F_{01} [1 + F_{12} F_{23} \exp(-2q_2 d_2)] + [F_{12} + F_{23} \exp(-2q_2 d_2)] \exp(-2q_1 d_1)}{1 + F_{12} F_{23} \exp(-2q_2 d_2) + F_{01} [F_{12} + F_{23} \exp(-2q_2 d_2)] \exp(-2q_1 d_1)}, \quad (9)$$

където:

$$F_{01} = \frac{\hbar_1 l - q_1}{\hbar_1 l + q_1} \quad F_{12} = \frac{\hbar_2 q_1 - \hbar_1 q_2}{\hbar_2 q_1 + \hbar_1 q_2} \quad F_{23} = \frac{q_2 - \hbar_2 l}{q_2 + \hbar_2 l}$$

5. Заключение

1. Нелинейната електродинамична задача за определянето на полето на навивка в присъствието на многослойна феромагнитна среда е сведена към линейна с използването на понятието „комплексна локална магнитна проникваемост“, което отразява по-пълно физическата същност на явлениято.
2. Записана е в най-общ вид функцията, отразяваща влиянието на n – слойна плоска феромагнитна среда и е предложен алгоритъм за непосредственото ѝ записване при намаляване на броя на слоевете. Дадени са изрази за повечето случаи, представляващи практически интерес.
3. Получените резултати могат да се използват за определяне на съставките на внесения импеданс, анализът на които позволява да се определи влиянието на електрофизичните и геометрични параметри на контролираните обекти върху сигнала от преобразувателя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аркадьев, В. К. Электромагнитные процессы в металлах, 4.2, Энергоиздат, М., 1936.
- [2] Кифер, И. И. и В. С. Фастрицкий. О магнитной проницаемости участка ферромагнетика, перемагничиваемого переменным магнитным полем. Дефектоскопия, 1965, № 2.
- [3] Соболев, В. С. Шкарлет, Ю. М. Накладные и экранные датчики. Наука, СО АН СССР, Новосибирск, 1967.
- [4] Цветков, Д. Н. Към въпроса за непосредствено получаване на решенията при вихровотоковата дефектоскопия на плоски изделия. Известия на ВМЕИ „Ленин”, София, том XXXIV, кн. 2, 1975.
- [5] Цветков, Д. Н. и др. Электромагнитна дефектометрия. Техника, София.

Автори: доц. д-р Живко Даскалов, доц. д-р Стефчо Гунински, гл. ас. Калинка Тодорова, кат. „Обща Електротехника”

ИЗХОДЕН СИГНАЛ НА ТРАНСФОРМАТОРЕН ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С ДИАГОНАЛНО ОТМЕСТЕНИ ПРАВОЪГЪЛНИ НАМОТКИ ПРИ НАЛИЧИЕ НА ДВИЖЕНИЕ

Стефчо Гунински, Валери Иванов, Калинка Тодорова

***Резюме.** В работата е изследвано влиянието на посоката на относителната скорост върху изходния сигнал на трансформаторен електромагнитен преобразувател с диагонално отместени правоъгълни намотки, разположен над плоска провяща среда. Числените експерименти са проведени при различни отмествания и различни стойности на скоростта и обобщения параметър. Показани са отликията при диагонално отместване и при отместване по посока на страните на възбудителната намотка.*

OUTPUT SIGNAL OF TRANSFORMER ELECTROMAGNETIC TRANSDUCER WITH DIAGONAL DISPLACEMENT PERPENDICULAR WINDINGS AT PRESENT OF MOVEMENT

Stefcho Guninski, Valeri Ivanov and Kalinka Todorova

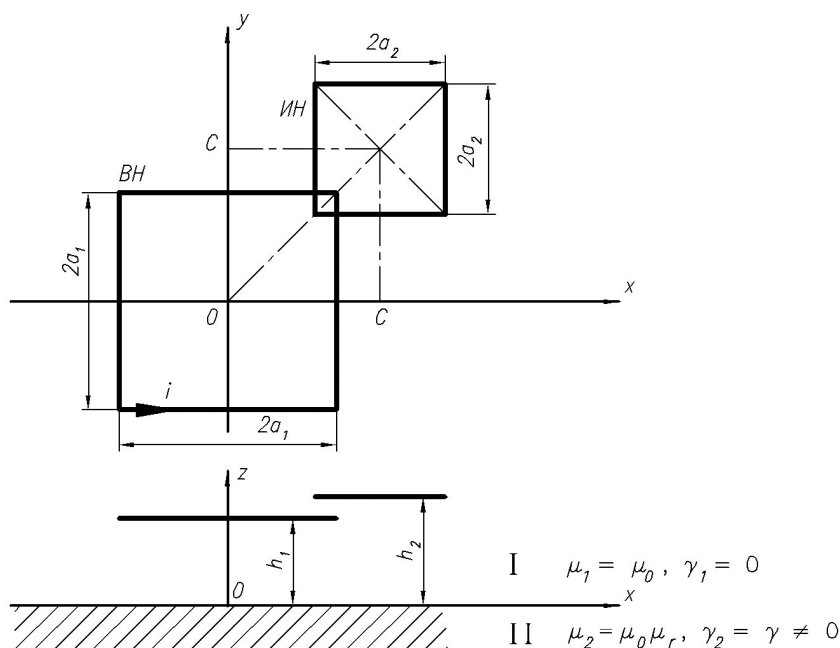
***Abstract.** The paper was studied the influence of the direction of relative velocity on the output signal of the transformer electromagnetic transducer with diagonally shifted rectangular coils, located above the flat conductive object. Numerical experiments were provided for different shifts and different values of velocity and β parametar. Defferences between diagonally offset and shift toward the side of the excitation coil is shown.*

1. Въведение

Когато се цели да се увеличи чувствителността на трансформаторните електромагнитните преобразуватели (ЕМП) към посоката на относителната им скорост между тях и контролирания обект (КО) обикновено при намотките им се избягва осевата симетрия и се въвежда отместване между центровете им [1]. Обикновено и възбудителната (ВН), и измервателната (ИН) намотки са правоъгълни, а отместването на ИН може да бъде успордно на някоя от страните на ВН или на произволен ъгъл. В [2,3] е изследвано влиянието на посоката на относителната скорост в първия случай. В настоящата работа е анализирано влиянието на посоката на скоростта при отместване в посока на диагоналите на намотки. Разглежда се случая, когато ВН и ИН представляват подобни правоъгълници с успоредни страни с малко напречно сечение, поради което се представят като контури. Счита се, че повечето от размерите на ЕМП са много по-малки от размерите на КО, поради което той се разглежда като

хомогенно изотропно полупространство с константни електрофизични параметри (фиг. 1).

Въвежда се декартова координатна система $Oxyz$ с начало върху граничната повърхност и се разглеждат две области (фиг. 1):



Фиг. 1. ЕМП с квадратни диагонално отместени намотки, разположен над феромагнитно проводящо полупространство

I – $z > 0$ – въздушната област над КО, където е разположен ЕМП, която се характеризира с относителна магнитна проницаемост $\mu_{r1} = 1$ и специфична електрическа проводимост $\gamma_1 = 0$;

II – $z < 0$ – областта на КО, която се характеризира с относителна магнитна проницаемост $\mu_{r2} = \mu_r \geq 1$ и специфична електрическа проводимост $\gamma_2 = \gamma \neq 0$.

ВН и ИН са квадратни със страни съответно с дължина $2a_1$ и $2a_2$, които са успоредни на координатните оси Ox и Oy (фиг. 1). Центърът на ВН е с координати $(0, 0, h_1)$, а на ИН е с координати (c, c, h_2) , т. е. Отместени са по посока на диагоналите им (ъглополовящата на равнината Oxy).

2. Определяне на аналитичния израз за изходния сигнал

Както е известно [4], изходния сигнал на трансформаторния ЕМП при синусоиден възбудителен ток във ВН е комплексната ефективна стойност на е.д.н., индуктирано в ИН от магнитния поток на вихровите токове в КО, т. е. „внесеното” напрежение [4]. В случая интерес представляват основно вихровите токове в следствие на движението, а не от трансформаторния

(промяната във времето) ефект. Затова се търси израз за относителното внесено напрежение, нормирано чрез изходния сигнал при покой:

$$(1) \quad \mathcal{U}_v^* = \frac{\mathcal{U}_{\text{ИН}} - \mathcal{U}_0}{U_0} ,$$

където $\mathcal{U}_{\text{ИН}}$ е комплексната ефективна стойност на напрежението, индуктирано в ИН, $\mathcal{U}_0$ е комплексната ефективна стойност на напрежението, индуктирано в ИН при липса на относително движение, U_0 е неговата ефективна стойност.

Комплексните ефективни стойности в [1] се изчисляват по изрази, получени чрез магнитния вектор-потенциал, който е определен аналитично по метода с интегралните трансформации в [5]:

$$(2) \quad \mathcal{U}_{\text{ИН}} = -j\tilde{g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p l^{-2} n^{-2} f_m F \sin n a_1 \sin l a_2 \sin n a_2 dl dn ,$$

където

$$(3) \quad \tilde{g} = 2p^{-2} m_0 w N_1 N_2 , \quad f_m = f_1 / f_2 , \quad F = \sin l a_1 e^{-p(h_1+h_2)} e^{jc(l+n)}$$

$$(4) \quad f_1 = m_r p - q_v , \quad f_2 = m_r p + q_v$$

$$(5) \quad p = \sqrt{l^2 + n^2} , \quad q_v = \sqrt{p^2 + k^2 + jmg(lv_x + nv_y)} , \quad k_i^2 = j\omega\mu_r\mu_0\gamma .$$

λ и v са параметрите на двойната безкрайна Фурие-трансформация, а v_x и v_y са проекциите съответно по осите x и y на относителната скорост между ЕМП и КО.

Нормиращото напрежение $\mathcal{U}_0$ се изчислява също по (2) като в q_v от (5) се замества $v_x = v_y = 0$.

3. Числени експерименти за изчисляване и анализ на изходния сигнал

Доказано е, че решението на двойният несобствен интеграл от (2) не може да се изрази чрез конвенционално използваните функции. Затова интегрирането е извършено числено, като преди това е преминато към безразмерни величини:

- линейните размери се нормират към половината дължина на ВН a_1 , т. е.

$$(6) \quad w^* = w/a_1 , \quad w = a_2 , h_1 , h_2 , c ;$$

- въведен е обобщеният параметър β

$$(7) \quad \beta^2 = \omega\mu_0\gamma a_1^2 ;$$

- интегрира се по безразмерните променливи

$$(8) \quad \xi = a_1\lambda , \quad \eta = a_1v ;$$

- нормираната относителна скорост v

$$(9) \quad \tau = v/\omega a_1 .$$

Комплексната ефективна стойност на нормирания изходен сигнал от (1) е изчислена при

$$a_2^* = 0,5 ; h_1^* = 0,055 ; h_2^* = 0,06 ; \mu_r = 1 , \beta = 5 .$$

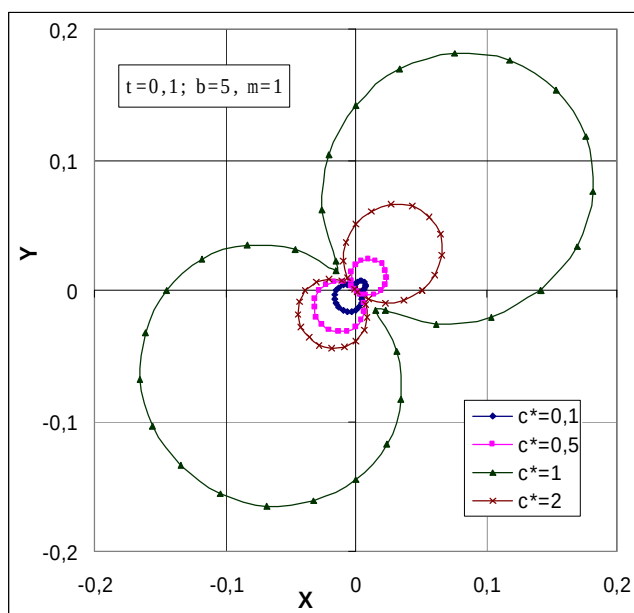
За диагоналното отместване са давани поредицата относителни стойности $c^* = 0,1; 0,5; 1; 2$, а за относителната скорост $\tau = 0,1; 0,5; 1; 5$.

Според авторите най-пълна представа за влиянието на *посоката* на скоростта дават *ориентировъчните диаграми* [2,3]. Това са равнинни криви, при които в полярна координатна система $O\rho\alpha$ е представена зависимостта на ефективната стойност на нормирания изходен сигнал U_v^* като функция на полярния ъгъл α , по който е насочен векторът на относителната скорост. Тъй като връзката между полярната координатна система и декартовата координатна система е добре известна, на графиките с цел по-добра нагледност са изобразени осите Ox и Oy , но зависимостите трябва да се разглеждат като $U_v^*(\alpha)$.

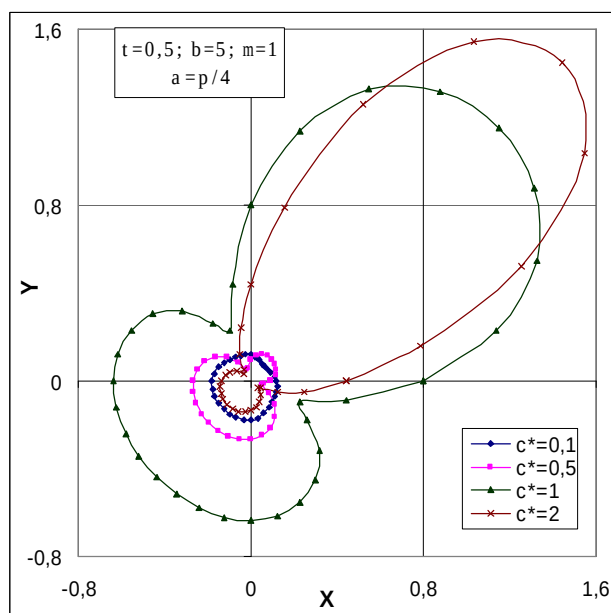
С отчитане на факта кои са най-често използваните параметри на изходния сигнал [1,4] при обработката му, показани са също и зависимостите в декартова координатна система на ефективната стойност на изходен сигнал U_v^* като функция на ъгъла α , който скоростта сключва с декартовата координатна ос Ox и зависимостта на фазата $y = \arg U_v^*$ от същия ъгъл α .

Показани са и аналогичните зависимости от α и на реалната и имажинерната част на изходния сигнал от (1).

На фиг. 2, 3, 4 и 5 са дадени ориентировъчните диаграми съответно за $\tau = 0,1; 0,5; 1; 5$ при параметър посочените стойности на *диагонално* ($\alpha = \pi/4$) относително отместване c^* . На фиг. 6 е показана ориентировъчната диаграма при същите данни, но при относителни отмествания по оста Ox ($\alpha = 0$).



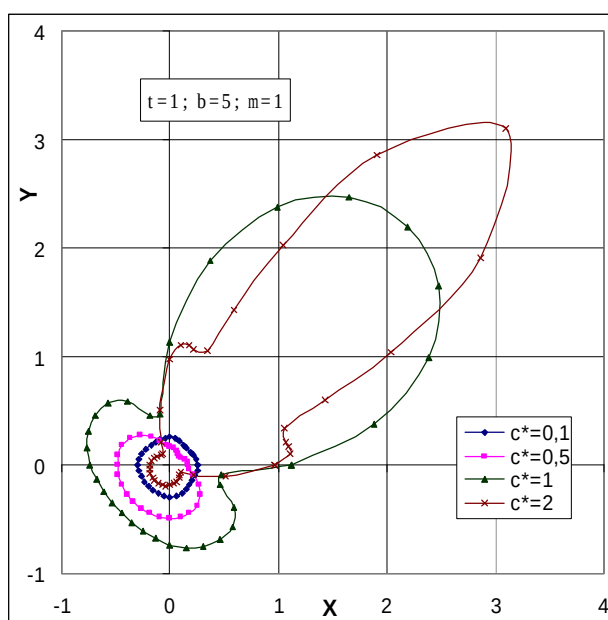
Фиг. 2. Ориентировъчни диаграми – диагонално отместване, $\tau = 0,1$



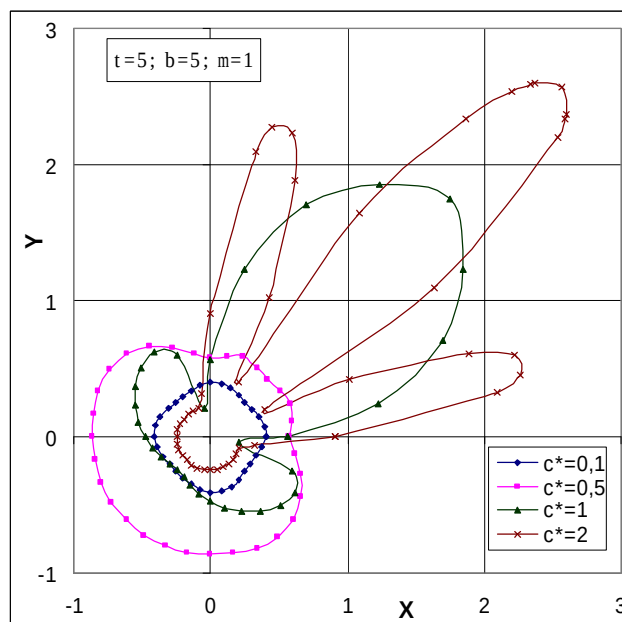
Фиг. 3. Ориентировъчни диаграми – диагонално отместване, $\tau = 0,5$

При малки относителни скорости (фиг. 2) ориентировъчните диаграми имат подобна форма (тип „осмица“). При по-малко диагонални отмествания чувствителността е по-голяма при движение в посока обратна на отместването ($\alpha = 5\pi/4$). С увеличаване на отместването ($c^* > 1$) чувствителността става по-голяма по посока на отместването ($\alpha = \pi/4$). При по-големи относителни скорости (фиг. 3, 4, 5) настъпват съществени изменения във вида на ориентировъчните диаграми:

- с увеличаване на c^* чувствителността по посока на отместването става много по-голяма отколкото в противоположната посока;
- при малки отмествания графиката от „осмица“ става тип „заоблен квадрат“;
- при големи скорости и отмествания при ъгли, близки до посоката на отместване на ИН се получават неочаквани минимума на ефективната стойност на изходното напрежение (фиг. 5, $c^* = 2$).



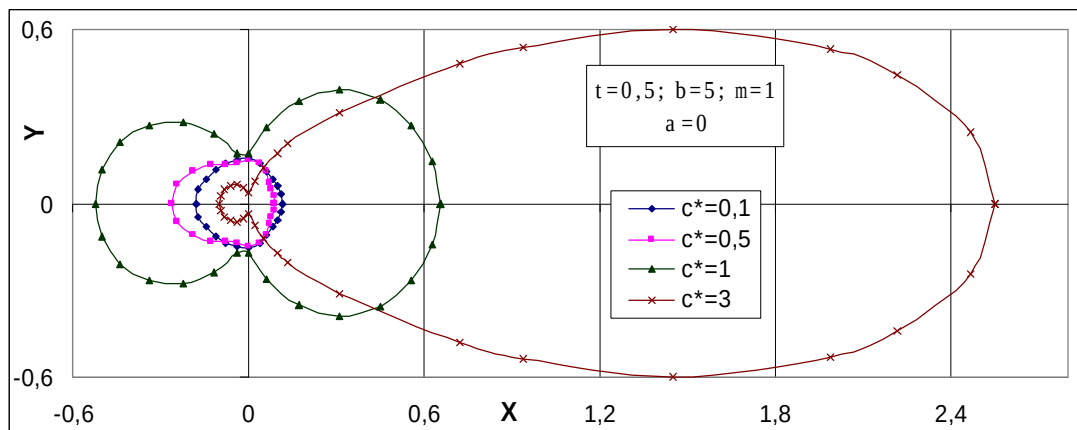
Фиг. 4. Ориентировъчна диаграма – диагонално отместване, $\tau = 1$



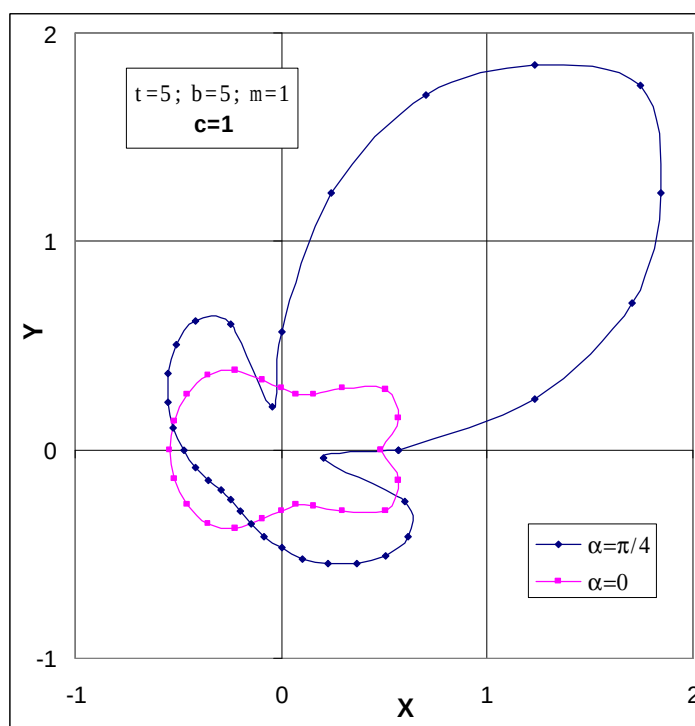
Фиг. 5. Ориентировъчни диаграми – диагонално отместване, $\tau = 5$

От сравнението на ориентировъчна диаграми от фиг. 3 и фиг. 6 може да се видят разликите между диагоналното отместване фиг. 3 и хоризонталното фиг. 6 при $\tau = 0,5$ и $\beta = 5$. в този случай съществена разлика има при средни отмествания ($c^* = 0,5$). При много малки и при по-големи относителни отмествания диаграмите са сходни. Не е така при много големи скорости. На фиг. 7 са показани ориентировъчните диаграми при $\tau = 5$ и $\beta = 5$ за двата вида отместване. Вижда се от една голямата разлика във вида им. И от друга страна много по-голямата чувствителност при диагонално отместване в посока на отместването. При него силно са изразени споменатите минимума, докато при $\alpha = 0$ такива няма.

Зависимостите на компонентите на комплексния изходен сигнал от посоката α на относителната скорост са показани при големи отмествания ($c^* = 2$), при които няма припокриване на ВН и ИН.



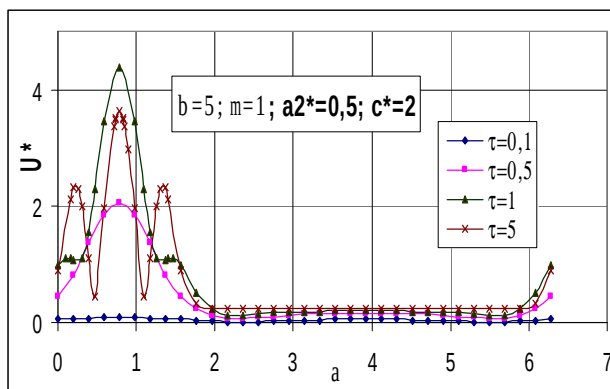
Фиг. 6. Ориентировъчни диаграми – хоризонтално отместване, $\tau = 0,5$



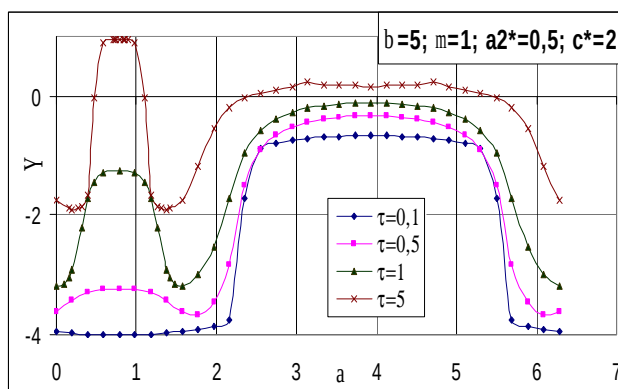
Фиг. 7. Ориентировъчни диаграми при двата вида отместване - $c^* = 1$ и $\tau = 5$

От фиг. 8 се вижда, че при големи отмествания чувствителността на ефективната стойност на изходния сигнал към малки скорости не е голяма. В големия интервал за $\alpha = 2 - 5,8$ изходният сигнал е твърде малък. При големи скорости чувствителността има максимум при движение по посока на диагоналното отместване. При много големи скорости ($\tau = 5$) около този абсолютен максимум се появяват и два добре изразени локални минимума и още два максимума. На фиг. 9 е показана аналогичната зависимост на фазата ψ

низходния сигнал. При много малки относителни скорости фазата има само две стойност, различаващи се приблизително с π rad. С увеличаване на τ започва увеличаване на фазата при и около $\alpha = \pi/4$ (посоката на диагоналното отместване).

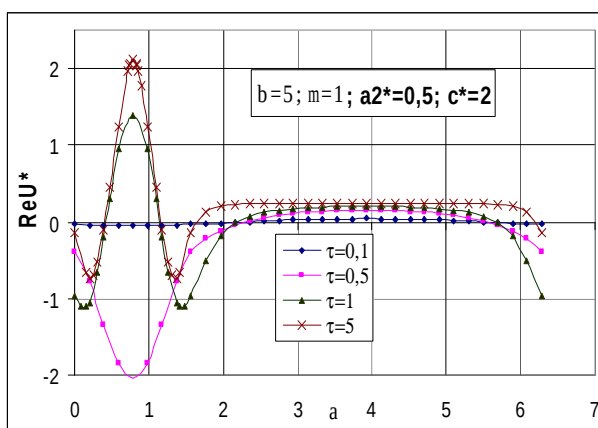


Фиг. 8. Зависимост на ефективната стойност от посоката, $c^* = 2$

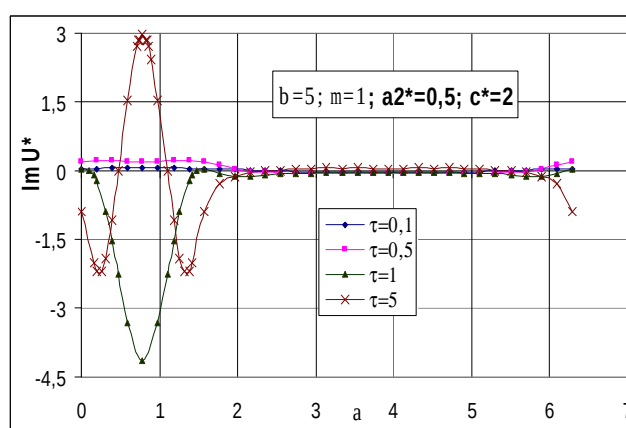


Фиг. 9. Зависимост на фазата от посоката, $c^* = 2$

На фиг. 10 и фиг. 11 са показани зависимостите от α на реалната и имажинерната част на комплексното изходно напрежение.



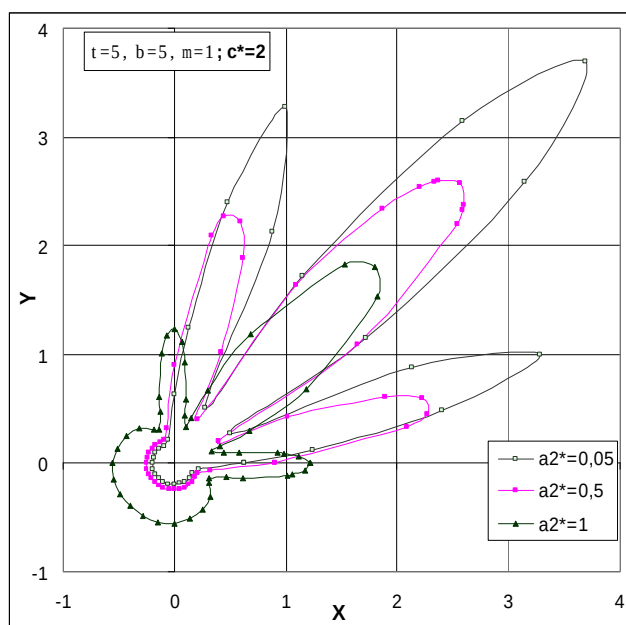
Фиг. 10. Зависимост на реалната част от посоката, $c^* = 2$



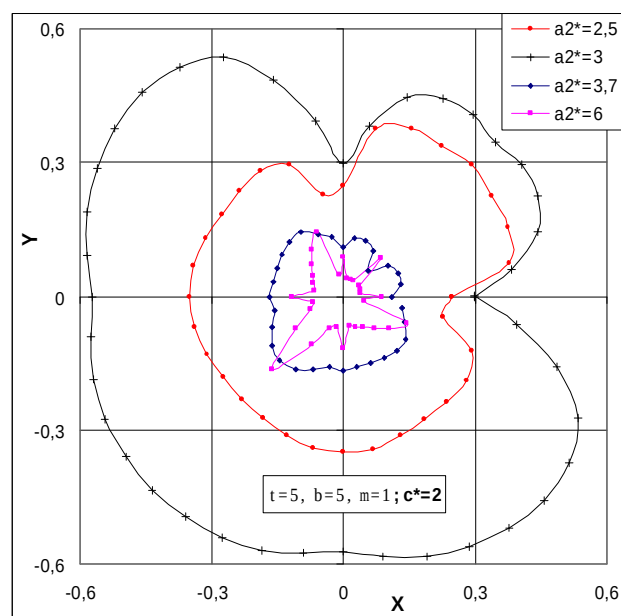
Фиг. 11. Зависимост на имажинерната част от посоката, $c^* = 2$

Както е логично, и двете компоненти са твърде малки в интервала $\alpha = 2 - 5,8$. при малки скорости сигналът е много малък, а при големи скорости и двете компоненти имат максимум в посоката на диагоналното отместване. Интересно е, че при $\tau = 0,5$ имажинерната съставка е пренебрежима спрямо реалната, докато при големи скорости имажинерната съставка има даже малко по-големи стойности от реалната. При $\tau = 5$ и реалната, и имажинерна част имат много сходен вид – абсолютен максимум при $\alpha = \pi/4$, ограден от два ясно изразени минимума. При $\tau = 1$ реалната част има пособен вид на тази при $\tau = 5$, но при имажинерната част двата минимума липсват.

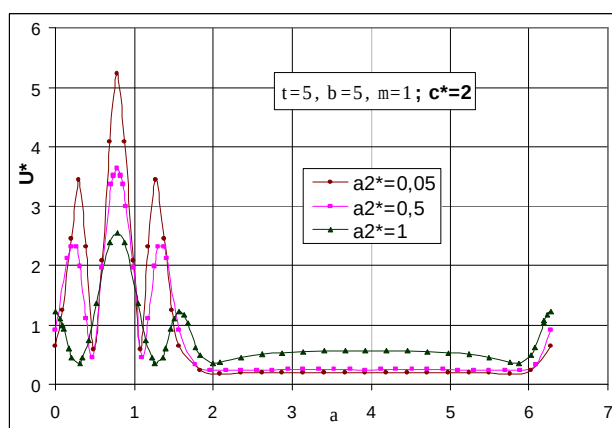
Влиянието на съотношението между дължините на страните ВН и ИН се вижда от фиг. 12 и фиг. 13. На тях са показани ориентировъчните диаграми при входни данни: $\tau = 5$; $\beta = 5$; $c^* = 2$, като половината относителна дължина на ИН a_2^* варира. Фиг. 12 е за $a_2^* < a_1^*$, а Фиг. 13 е за $a_2^* > a_1^*$. Вижда се, че вида на ориентировъчните диаграми когато ИН е по-малка от ВН е еднотипен. При големи стойности на a_2^* вида на ориентировъчните диаграми е различен като общо взето чувствителността към изменението на посоката на относителната скорост намалява.



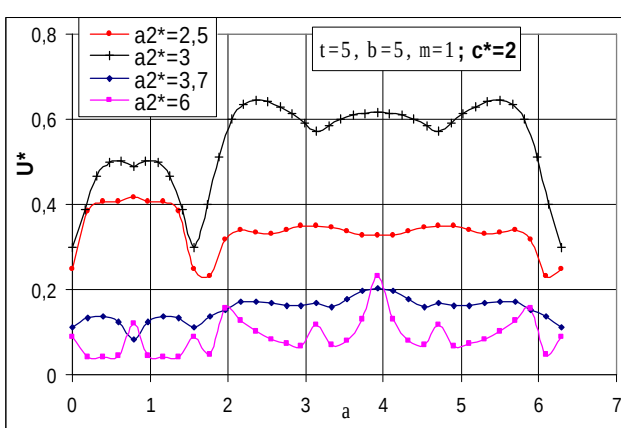
Фиг. 12. Ориентировъчни диаграми – диагонално отместване, $\tau = 5$, $\beta = 5$; $c^* = 2$, $a_2^* \leq a_1^*$.



Фиг. 13. Ориентировъчни диаграми – диагонално отместване, $\tau = 5$, $\beta = 5$; $c^* = 2$, $a_2^* > a_1^*$.

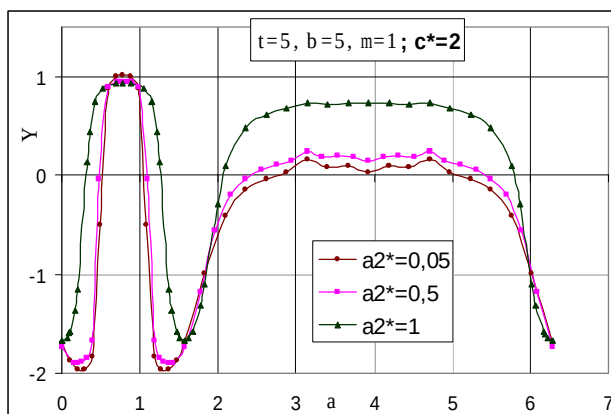


Фиг. 14. Зависимост на ефективната стойност от посоката, $\tau = 5$, $\beta = 5$; $c^* = 2$, $a_2^* \leq a_1^*$.

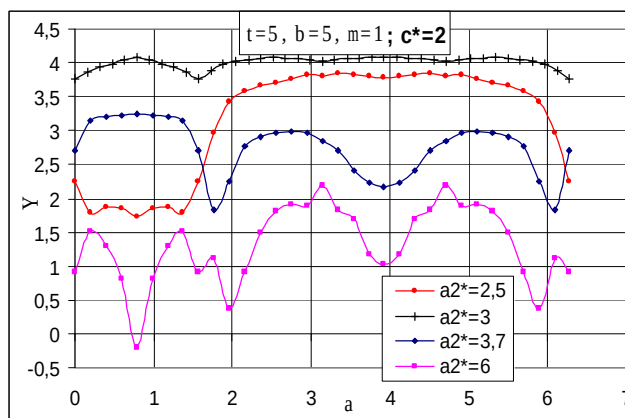


Фиг. 15. Зависимост на ефективната стойност от посоката, $\tau = 5$, $\beta = 5$; $c^* = 2$, $a_2^* > a_1^*$.

На фиг. 14 и фиг. 15 са показани зависимостите на ефективната стойност на нормирания изходен сигнал от ъгъла на посоката на относителната скорост при входните данни от фиг. 12 и фиг. 13. При ИН с по-малка дължина (фиг. 14) са налице три максимума и два минимума, които при увеличаването на a_2^* се получават при стойности на ъгъла α по отдалечени от $\alpha = \pi/4$. С намаляването на a_2^* всички екстремуми стават „по-остри”. Когато ИН е по-голяма от ВН (фиг. 15) тези екстремуми отсъстват или са съвсем слабо изразени. Изключение прави случая $a_2^* = 6$ (много по-голяма ИН), когато има 8 максимума.



Фиг. 16. Зависимост на фазата от посоката, $\tau = 5$, $\beta = 5$; $c^* = 2$, $a_2^* \leq a_1^*$.



Фиг. 17. Зависимост на фазата от посоката, $\tau = 5$, $\beta = 5$; $c^* = 2$, $a_2^* > a_1^*$.

На фиг. 16 и фиг. 17 са показани аналогичните зависимости на фазата на нормирания изходен сигнал от ъгъла на посоката на относителната скорост. При $a_2^* \leq 1$ (фиг. 16) зависимостите са еднотипни – с два минимума, равноотдалечени от $\alpha = \pi/4$. При ИН с по-голяма дължина на страната, отколкото ВН (фиг. 17) изменението на фазата от ъгъла α е много разнообразно. При $a_2^* = 3$ съвсем слабо изменяща се, при $a_2^* = 2,5$ се изменя скокообразно между две нива, а при $a_2^* = 3,7$ и $a_2^* = 6$ има няколко екстремума, които стават по-остри с увеличаването на a_2^* .

4. Заключение

От направените изследвани може да се направят следните по-важни изводи:

- зависимостите на изходния сигнал от посоката на относителното движение при диагонално отместване са сходни с тези при отместване успоредно на някоя от страните (хоризонтално отместване), но има и някои съществени особености. И при диагонално отместване в зависимост от отместването и условията на контрол по-голяма чувствителност може да се получи както при движение в посока на отместването, така и при движение в обратната посока. Разработеният софтуер позволява да се подберат размери и честота така че чувствителността и в двете посоки да е еднаква;

- на първо място чувствителността на изходния сигнал към скоростта е забележимо по-висока;

- „особените” форми в ориентировъчните диаграми и другите характеристики като появата на допълнителни добре изразени екстремуми, наличието на графики във вид на почти „квадрати” и на други във вид на „осмици”, при това както симетрични, така и със силна несиметрия, налагат детайлно изучаване на разпределението на вихровите токове в КО за да се обяснят не плавните изменения на магнитните потоци, обхващащи контури, разположени в различни посоки;

- промяната на съотношението между дължините на страните на ВН и ИН променя съществено ориентировъчните диаграми. Компонентите на нормирания изходен сигнал (ефективна стойност и фаза) зависят много съществено от това дали дължината на страната на ИН е по-голяма или е по-малка от дължината на страната на ВН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Герасимов, В., В. Ключев, В. Шатерников. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий, М., Энергоатомиздат, 1983.

[2] Гунински, С. Г., В. С. Иванов, Влияние на посоката на относителното движение върху изходния сигнал на трансформаторен електромагнитен преобразувател с отместени намотки, Сб. Доклади на I Научна конференция ЕФ 2009, Созопол, 1-4 Октомври, 2009 г., с. 46 – 52.

[3] Гунински, С., Възможности за измерване на ъглова скорост на проводящи среди с вихровотоков преобразувател с ъглово отместени намотки, Годишник на Техническият университет – София, том 52, 2003 г., с. 39 – 46

[4] Електромагнитна дефектометрия. Под ред. на Д. Цветков, Техника, София, 1981.

[5] Гунински, С., Изходен сигнал на трансформаторен електромагнитен преобразувател с перпендикулярни намотки, Сборник доклади от XIV-ти Научен Симпозиум с международно участие “Метрология и Метрологично Осигуряване 2004” (Созопол, 14-18 септември 2004), с. 176-179.

Автори: Стефчо Гунински, доцент, д-р, кат. „Обща електротехника”, Валери Иванов, гл. ас., ЮЗУ „Н. Рилски”, Калинка Тодорова, гл. ас., кат. „Обща електротехника”

ВЛИЯНИЕ НА ПОСОКАТА НА ОТНОСИТЕЛНАТА СКОРОСТ ВЪРХУ ИЗХОДНИЯ СИГНАЛ НА ДИФЕРЕНЦИАЛЕН ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С ПРАВОЪГЪЛНИ НАМОТКИ

Валери Иванов, Стефчо Гунински, Калинка Тодорова

Резюме. След провеждането на серия числени експерименти е анализирано влиянието на посоката на относителната скорост върху изходния сигнал на електромагнитен трансформаторен преобразувател (ЕМТП) с диференциална измервателна намотка. Изследвано е влиянието на големината на скоростта, обобщения параметър и геометричните размери.

INFLUENCE OF DIRECTION OF THE RELATIVE SPEED ON THE OUTPUT SIGNAL OF DIFFERENTIAL ELECTROMAGNETIC TRANSDUCER WITH RECTANGULAR COILS

Valeri Ivanov, Stefcho Guninski and Kalinka Todorova

Abstract. After performing a series of numerical experiments is analyzed the influence of the direction of relative velocity on the output signal of the electromagnetic transformer transducer (EMTT) with differential measurement coil. The influence of the velocity, parameter β and geometric dimensions, is examined.

1. Въведение

В [1,2] е проведено изследване на влиянието на посоката на относителната скорост върху изходния сигнал на ЕМТП с абсолютна измервателна намотка (ИН). Диференциалните ЕМТП имат две ИН, които са свързани насрещно. Техните предимства са добре известни, поради което в настоящата работа е изследвано влиянието на посоката на скоростта при две еднакви квадратни диференциално свързани ИН1 и ИН2 със страни $2a_2$, чийто центрове са отместени на разстояние s от центъра на възбудителната намотка (ВН) също квадратна със страна $2a_1$ (фиг. 1). Геометричните размери, свързани с ВН са индексирани с „1”, а тези с двете ИН имат индекс „2”. През ВН протича синусоиден ток с ефективна стойност I и честота f . Разглежда се случая, когато контролираният обект (КО) има размери много по-големи от тези на ВН и ИН1 и ИН2 и поради това може да се представи като проводящо хомогенно полупространство с линейни електрофизични параметри (Π област на фиг. 1).

2. Изчислителни формули

В [3] по метода с интегралните трансформации чрез магнитния вектор-потенциал аналитично е определен изходният сигнал на такъв ЕМТП. Това е комплексната ефективна стойност на разликата на напреженията, индуцирани в двете ИН. Работи се с т.н. „внесено” напрежение [1], което е разликата между изходното напрежение при наличието на КО и напрежението в двете ИН, когато проводящият обект липсва. За него в [3] е получено:

$$(1) \quad \mathcal{U}_{\text{MD}} = \tilde{g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p x^{-2} h^{-2} f_m F \sin h_1 \sin x a_2^* \sin h a_2^* dx dh ,$$

$$(2) \quad \tilde{g} = 4p^{-2} m_0 w k a_1 N_1 N_2 , \quad f_m = f_1 / f_2 , \quad F = \sin x \sin x c^* e^{-p(h_1^* + h_2^*)} ,$$

$$(3) \quad f_1 = m_r p - q_v , \quad f_2 = m_r p + q_v ,$$

$$(4) \quad p = \sqrt{x^2 + h^2} , \quad q_v = \sqrt{p^2 + k^2 + j m_r b^2 (1 + x t_x + h t_y)} ,$$

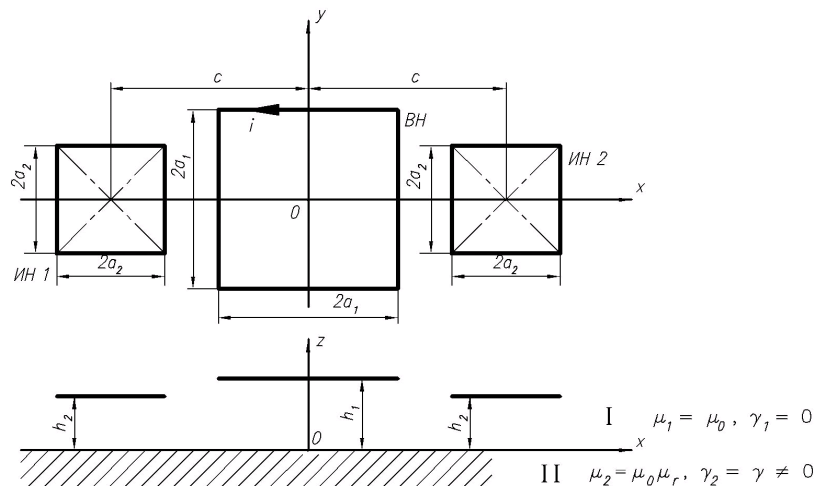
$$(5) \quad \tau = v / \omega a_1 , \quad \beta^2 = \omega \mu_0 \gamma a_1^2 , \quad \xi = \lambda a_1 , \quad \eta = v a_1 ,$$

където:

- N_1 е броят на навивките на ВН, а N_2 - на ИН1 и ИН2;
- λ и v са параметрите на двойната безкрайна Фурие-трансформация;
- v е относителната скорост между ЕМТП и КО, а

$$(6) \quad v_x = v \cos \alpha \text{ и } v_y = v \sin \alpha$$

са проекциите ѝ върху декартовите координатни оси от фиг. 1. С α е означен ъгълът, който скоростта сключва с оста Ox .



Фиг. 1. Изчислителен модел на диференциален ЕМТП с квадратни намотки, разположен над еднослоен плосък феромагнитен проводящ КО

Въведени са обичайните за електромагнитния безразрушителен контрол безразмерни величини [4]:

- относителните линейни размери

$$(7) \quad w^* = w / a_1, \quad w = a_2, c, h_1, h_2 ;$$

- комплексната ефективна стойност на нормираното внесено напрежение

$$(8) \quad \mathcal{U}_v^* = \mathcal{U}_{HD} / \tilde{g} .$$

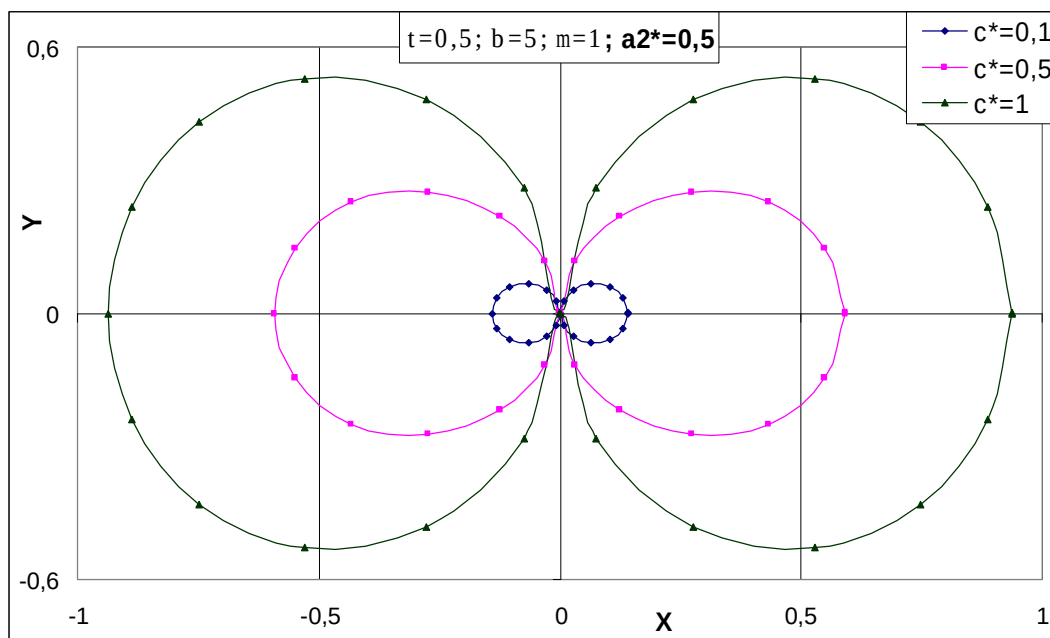
3. Числени експерименти

Разработени са компютърни програми за изчисляване на изходния сигнал на диференциалния ЕМТП от (8) и (1). Всички изчисления са правни при $\beta = 5$, $\mu_r = 1$ (неферромагнитен обект) и $a_2^* = 0,5$; $h_1^* = 0,055$ и $h_2^* = 0,06$.

На базата на изчислените комплексни ефективни стойности на изходния сигнал са построени:

- ориентировъчните диаграми [1,2] – зависимостите $U_v^*(\alpha)$ в полярна координатна система;
- ефективната стойност на изходен сигнал U_v^* като функция на ъгъла α , в декартовата координатна система (α е ъгълът, който скоростта сключва с декартовата координатна ос Ox);
- фазата $y = \arg \mathcal{U}_v^*$ от същия ъгъл α в декартовата координатна система.

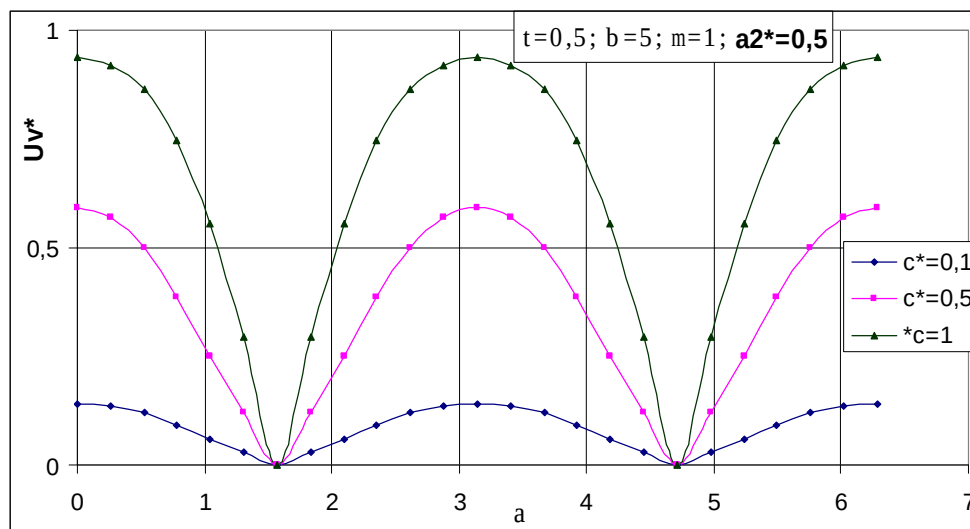
Изследвания при $\tau = 0,5$



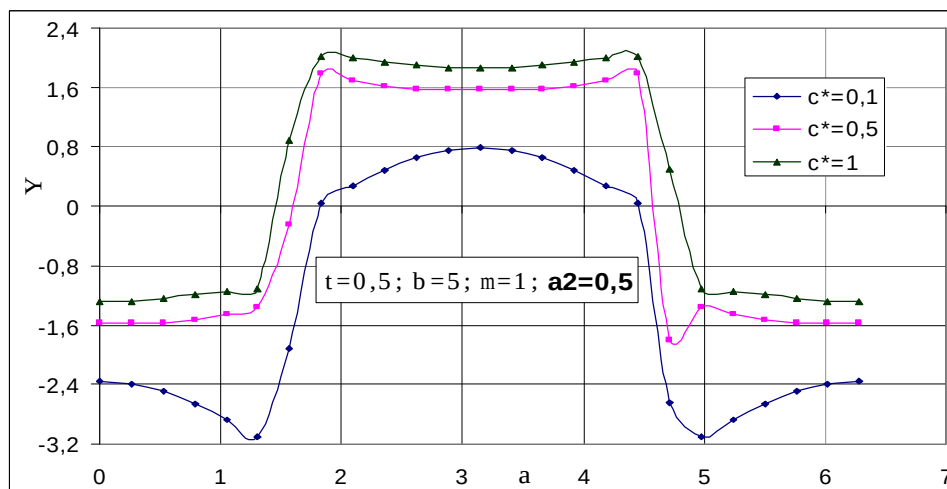
Фиг. 2. Ориентировъчна диаграма при $\tau = 0,5$ и $\beta = 5$

На фиг. 2 е показана ориентировъчната диаграма, а на фиг. 3 и фиг. 4 са показани съответно зависимостите на ефективната стойност и фазата от ъгъла α , определящ посоката на относителната скорост при три стойности на

относителното отместване c^* между центровете на ВН и двете ИН. От фиг. 2 се вижда, че и при трите отмествания диаграмите са еднотипни (симетрични „осмици“) и чувствителността расте с увеличаването на c^* .



Фиг. 3. Зависимост на ефективната стойност от посоката при $\tau = 0,5$ и $\beta = 5$



Фиг. 4. Зависимост на фазата от посоката при $\tau = 0,5$ и $\beta = 5$

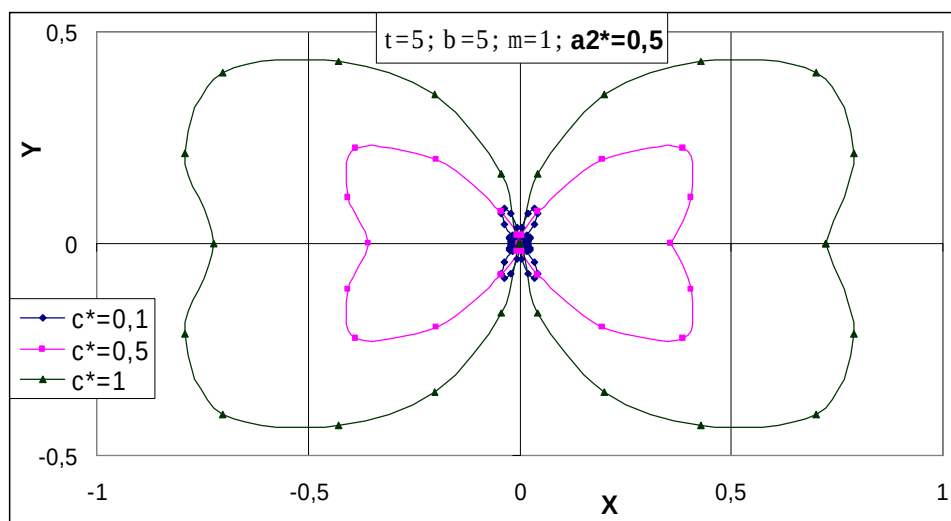
При ефективната стойност (фиг. 3) има максимална чувствителност по посока на отместване (оста Ox) и нулева чувствителност в перпендикулярната посока (оста Oy). Фазата (фиг. 4) при малки отмествания ($c^* \leq 0,5$) се изменя скокообразно между две нива – $\psi \approx -1,5$ и $\psi \approx 1,7$. При по-големи c^* тези нива съществено намаляват стойността си и се появява полегат максимум при $\alpha = \pi$ и минимума около $\alpha = 1,2$ и $\alpha = 5$.

Изследвания при $\tau = 5$ и $\beta = 5$

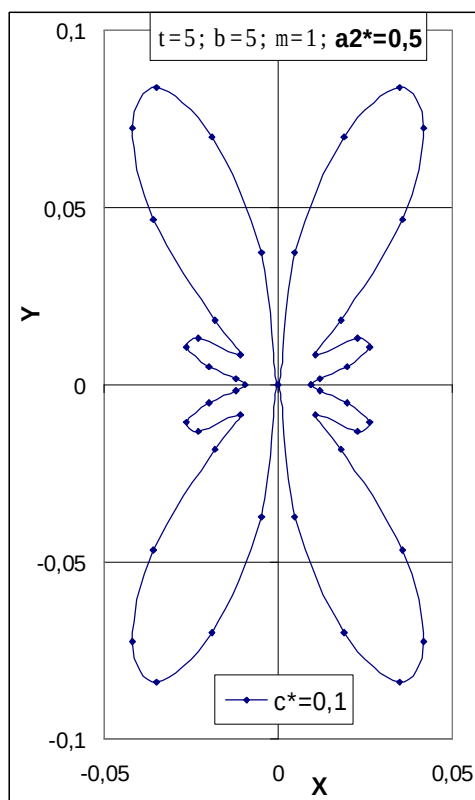
На фиг. 5, фиг. 6, фиг. 7 и фиг. 8 са показани резултатите от изследванията при същите входни данни, но при много по-голяма относителна скорост – $\tau = 5$.

При ориентировъчните диаграми (фиг. 5 и фиг. 6) и тук има пълна симетрия по отношение и на двете координатни оси, но при $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$ има минимуми (фиг. 7). Изненадващо особености има при малки отмествания - $c^* = 0,1$ (фиг. 6). Максимумите са цели осем, четири от които са ясно изразени (фиг. 7). Фазата (фиг. 8) отново се изменя между две нива, но тук те са около 0 и π радиана, като отново при малки отмествания фазата се изменя в по-малки интервали на α .

Изследвания при $\tau = 5$ и различни стойности на β



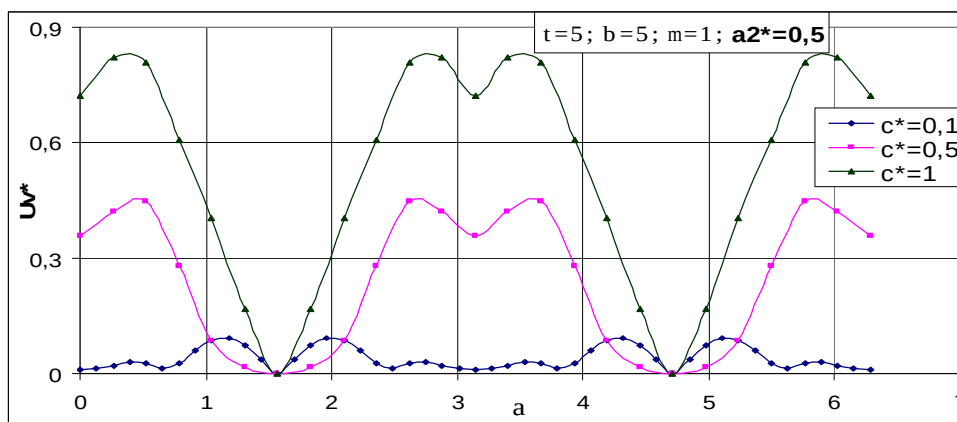
Фиг. 5. Ориентировъчна диаграма при $\tau = 5$ и $\beta = 5$



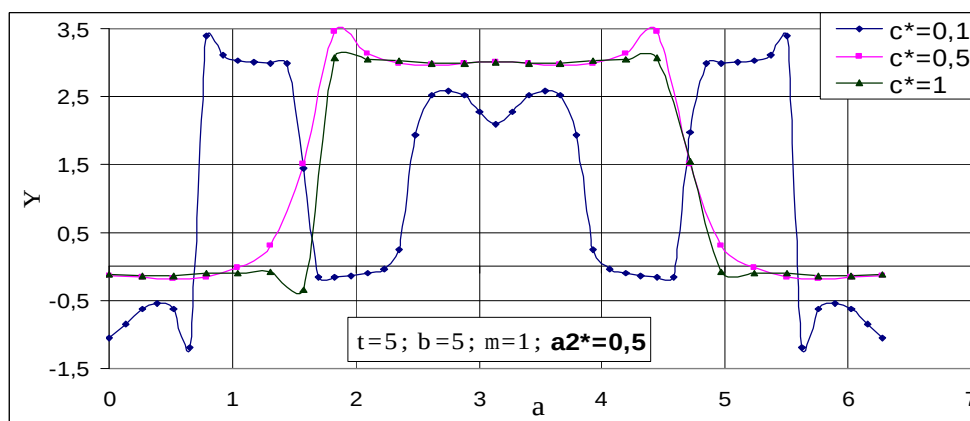
Фиг. 6. Ориентировъчна диаграма при $\tau = 5$, $\beta = 5$ и $c^* = 0,1$

Тъй като при големи относителни скорости τ и малки отмествания на ИН на фиг. 5 се установяват големи особености във формата на ориентировъчната диаграма, на фиг. 9 е изследвано влиянието на обобщения параметър при тези условия. Вижда се, че при $\beta = 3; 5$ и 10 графиката е силно начупена с множество екстремуми на ефективната стойност на изходния сигнал (фиг. 10). При $\beta = 1$ ориентировъчната диаграма е гладка симетрична „осмица“.

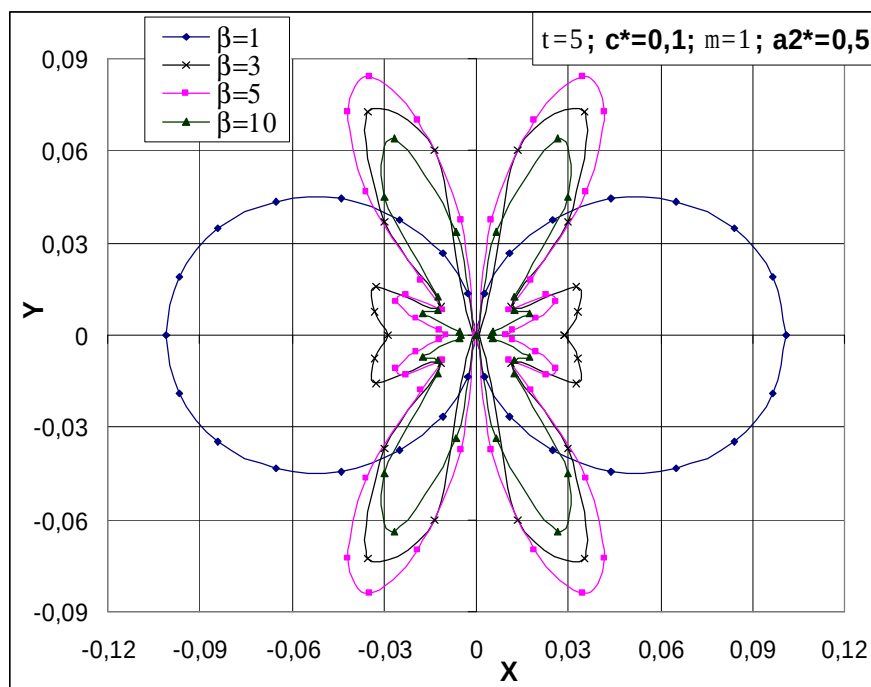
При големи скорости, но и големи отмествания (фиг. 11) ориентировъчните диаграми при малки стойности на β са тип „осмица“, в която с увеличаването на стойността на обобщения параметър при $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$ се получават вдлъбнатини, т.е. вместо максимуми в тези направления има минимум на ефективната стойност на внесеното напрежение.



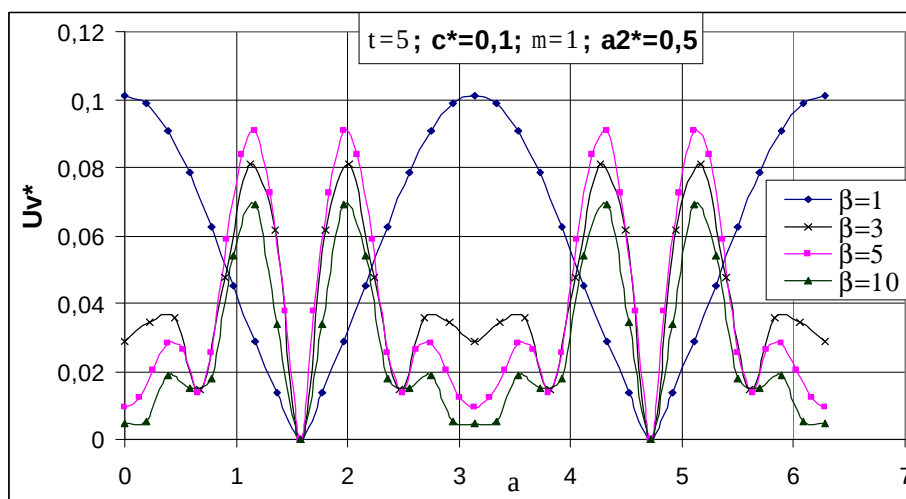
Фиг. 7. Зависимост на ефективната стойност от посоката при $\tau = 5$ и $\beta = 5$



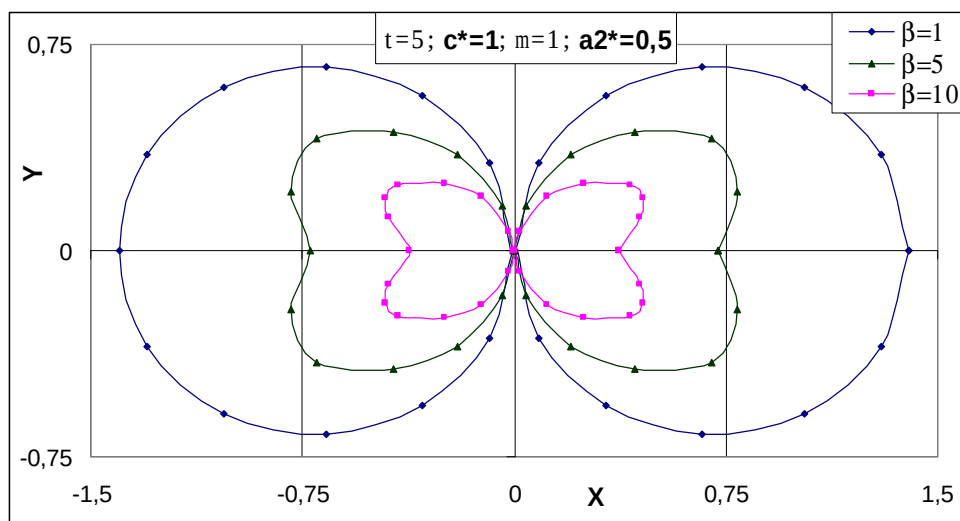
Фиг. 8. Зависимост на фазата от посоката при $\tau = 5$ и $\beta = 5$



Фиг. 9. Ориентировъчна диаграма при $\tau = 5$ и $c^* = 0,1$



Фиг. 10. Зависимост на ефективната стойност от посоката при $\tau = 5$ и $c^* = 0,1$



Фиг. 11. Ориентировъчна диаграма при $\tau = 5$ и $c^* = 1$

4. Заключение

От направения анализ на получените графични резултати може да се направят следните изводи:

- всички ориентировъчни диаграми са симетрични по отношение и на двете декартови координатни оси;
- чувствителността по отношение на скоростта е забележимо по-голяма при диференциалните ЕМТП, отколкото при тези с абсолютна ИН;
- при малки относителни скорости и малки стойности на обобщения параметър ориентировъчните диаграми имат формата на гладка „осмица“;
- с увеличаването на скоростта и на β вместо максимуми при $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$ се получават минимума;
- при големи стойности на τ и β , но за малки отмествания c^* ориентировъчните диаграми силно се „начупват“, т.е. появяват се до осем ясно

изразени максимуми на ефективната стойност на изходния сигнал със съответните минимуми между тях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гунински, С. Г., В. С. Иванов, Влияние на посоката на относителното движение върху изходния сигнал на трансформаторен електромагнитен преобразувател с отместени намотки, Сб. Доклади на I Научна конференция ЕФ 2009, Созопол, 1-4 Октомври, 2009 г., с. 46 – 52.
- [2] Иванов, В., С. Гунински, Влияние на скоростта върху изходния сигнал на електромагнитен преобразувател с отместени правоъгълни намотки, Годишник на Техническия университет – София, том 56, кн. 2, 2006 г., с. 351-359
- [3] Гунински, С., Изходен сигнал на електромагнитен преобразувател с перпендикулярни намотки при наличие на относително движение, Годишник на Техническия университет – София, том 53, 2004 г., с. 191 – 199.
- [4] Електромагнитна дефектометрия. Под ред. на Д. Цветков, Техника, София, 1981.

Автори: Валери Иванов, гл. ас., ЮЗУ „Н. Рилски“, Стефчо Гунински, доцент, д-р, Калинка Тодорова, гл. ас., кат. „Обща електротехника“.

ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ ЗА ТРАНСПОРТНО СРЕДСТВО СЪС СИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С ОРИЕНТАЦИЯ ПО СТАТОРНОТО ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕ

Емил Рац, Роберт Рац, Атанас Петров

Резюме. Представено е изследване на електрозадвижване със синхронен електродвигател с вградени постоянни магнити (СДВПМ) при векторно управление с ориентация на координатната система по пространствения вектор на статорното потокосцепление. За целта е разработен симулационен модел на електрозадвижването в Матлаб среда. Моделът на синхронната машина е построен на основа на математически модел на СДВПМ във въртяща се с ротора $[d,q]$ координатна система. Методът за векторно управление е моделиран в координатна система $[x,y]$, ориентирана по вектора на статорното потокосцепление. Получени са преходни процеси на скоростта, въртящия момент, напреженията, токовете и мощностите при отработване на задание за скорост с последващо натоварване.

Stator Flux Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electrical Vehicle

Emil Ratz, Robert Ratz, Atanas Petrov

Abstract. The report presents a study of electric drive of interior permanent magnets synchronous motor (IPMSM) at stator flux orthogonal system space vector control. For this purpose a simulation model of this electrical drive is developed in MATLAB environment. The model of the synchronous machine is developed on the basis of IPMSM rotating in accordance with to the rotor $[d,q]$ orthogonal system. The vector control method is modeled in $[x,y]$ orthogonal system oriented according to the stator flux vector. Obtained are transient processes of the speed, torques, voltages, currents and powers at processing of the requested speed and subsequent loading.

1. Увод

През последното десетилетие електрическите и хибридните автомобили привличат вниманието на все по голям брой специалисти. Наличието на автономно захранване с ограничени ресурси изисква висока енергийна ефективност от използваното в електромобила електрозадвижване [1]. В тази връзка с основание съществува повишен интерес към използването на синхронни машини (СМ), реактивни [2] и с постоянни магнити [3]. Качествено управление на СМ се постига след имплементация на метод за векторно

Годишник на ТУ-София, т. 60, кн. 2, 2010

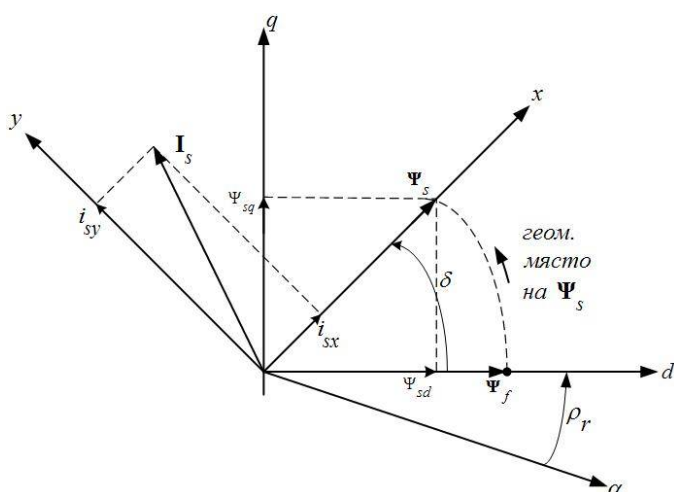
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 60, book 2, 2010

управление с използване на разработени за целта цифрови сигнални процесори [4]. Широко приложение намира метода за векторно управление на СМ с ориентация на координатната система по ротора [4, 5]. В настоящата статия е моделирано и изследвано електрозадвижване със синхронен електродвигател с вградени постоянни магнити при управление с ориентация на координатната система по пространствения вектор на статорното потокосцепление.

2. Моделиране на електрозадвижването в Матлаб среда

Въртящият електромагнитен момент на синхронната машина се изразява като векторно произведение от пространствените вектори на статорното потокосцепление и статорния ток.

$$M_e = \frac{3}{2} p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}), \quad (1)$$



Фиг. 1. Разположение на използваните ортогонални координатни системи

където: Ψ_{sd} и Ψ_{sq} са проекциите на статорното потокосцепление по оси d и q , а i_{sd} и i_{sq} са съставките на пространствения вектор на статорния ток в ортогонална координатна система $[d, q]$, ориентирана по ротора. Съставките на потокосцепления се изразяват със зависимостите:

$$\Psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \Psi_f \quad \text{и} \quad \Psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \quad (2)$$

Където: L_{sd} и L_{sq} са синхронните индуктивности по оси d и q .

След заместване в уравнението за въртящия момент (1) се получава

$$M_e = \frac{3}{2} p \{ \Psi_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} \} \quad (3)$$

Въртящият електромагнитен момент може да се изрази и със следната зависимост:

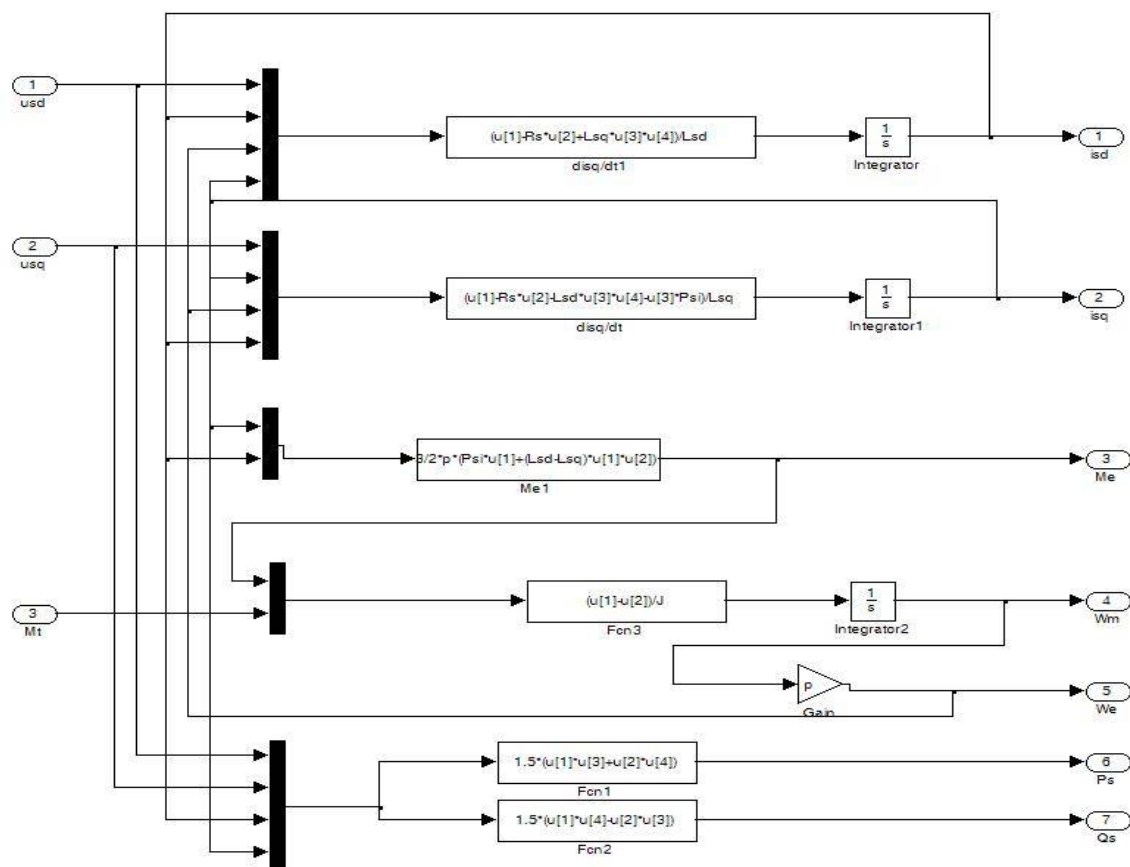
$$M_e = \frac{3}{2} p |\Psi_s| i_{sy}, \quad (4)$$

където, модулът на пространствения вектор на статорното произведение се изразява чрез съставките си в $[d, q]$ координатна система

$$|\Psi_s| = \left(\Psi_{sd}^2 + \Psi_{sq}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Компонентата на статорния ток i_{sy} е получена в координатна система $[x, y]$, ориентирана по статорното потокосцепление. Участващите величини са изобразени за установен режим на векторната диаграма на фиг. 1.

Компонентата i_{sy} е проекция на пространствения вектор на статорния ток върху ос y на координатната система $[x,y]$, въртяща се синхронно с вектора на статорното потокосцепление и ориентирана така, че ос x да съвпадне с вектора Ψ_s . Векторът на статорното потокосцепление сключва ъгъл d с ос d .



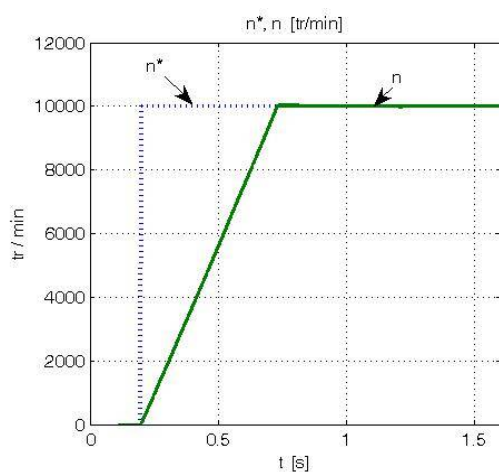
Фиг. 2. Модел на синхронна машина с вградени постоянни магнити в Матлаб/Симулинк

Синхронната машина с вградени в ротора постоянни магнити (СМВПМ) е явнополусна машина, при която синхронните индуктивности по двете оси са с различна големина. Следствие на това въртящия електромагнитен момент съдържа така наречения реактивен момент. Последното е взето предвид при създаване на подсистемата “модел на синхронна машина с вградени постоянни магнити (СМВПМ)” в компютърния модел на електрозадвижване с векторно управление с ориентация по статорното потокосцепление (фиг.2). Параметрите на симулираната синхронна машина са следните: $R_s = 0,0083\Omega$, $L_{sd} = 0,000174H$, $L_{sq} = 0,000293H$, $\Psi_f = 0.07112Vs$, $p = 4$ и $J = 0,05kgm^2$. Данните са на високооборотна синхронна машина с мощност $P = 100kW$, предназначена за електромобили. Моделът на СМВПМ (фиг. 2) е разработен в $[d,q]$ координатна система, ориентирана по магнитния поток, създаден от постоянните магнити на ротора. Управляващите въздействия се изчисляват в координатната система

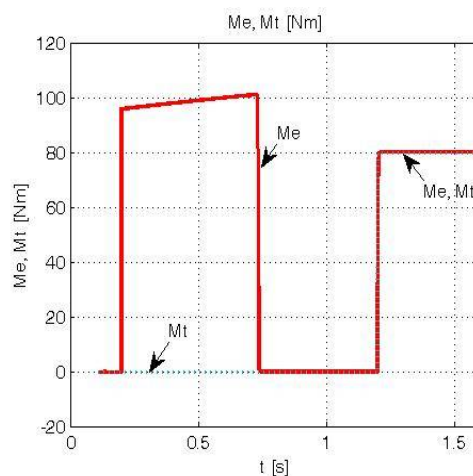
[illegible]

3. Преходни и установени процеси

338

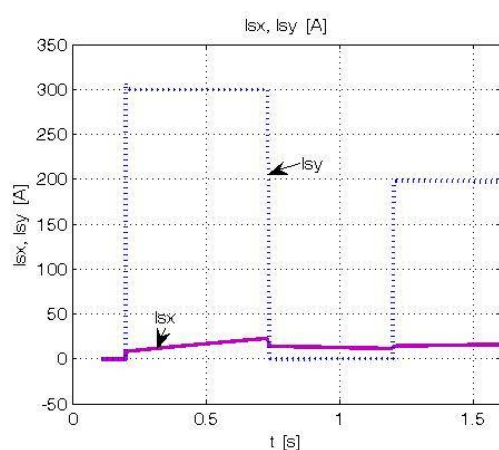


Фиг. 4. Осцилограми на зададената (n^*) и действителната (n) скорости в преходен режим

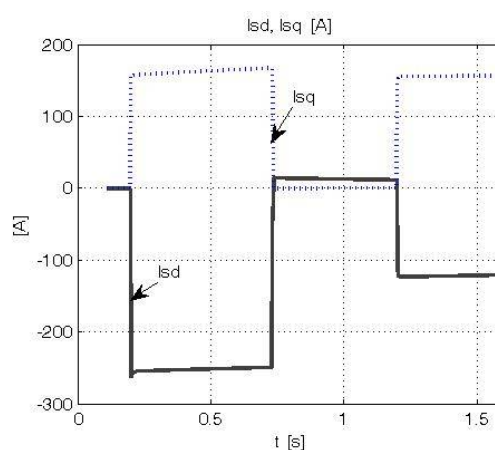


Фиг. 5. Преходни процеси на въртящия електромагнитен момент (M_e) и на товарния момент (M_t)

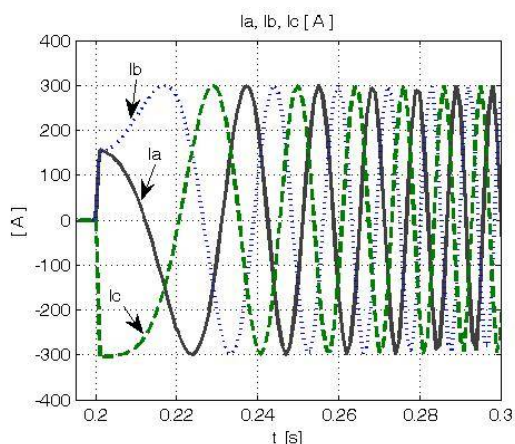
На фиг. 6 и фиг. 7 са дадени измененията на амплитудитена съответно на "ху" и "dq" съставките на пространствения вектор на статорния ток. Ускоряването на двигателя се извършва при постоянен по амплитуда статорен ток. Това се вижда от осцилограмите на фиг. 8, където са дадени трите фазни тока за начален времеинтервал на преходния процес. На фиг. 9 е показана осцилограма на трите фазни напрежения на статора на машината. Характерно за тях е практически линейното нарастване на напрежението с увеличаване на скоростта на въртене. Симулационни осцилограми на активната статорна мощност и реактивната статорна мощност са снети на фиг. 10.



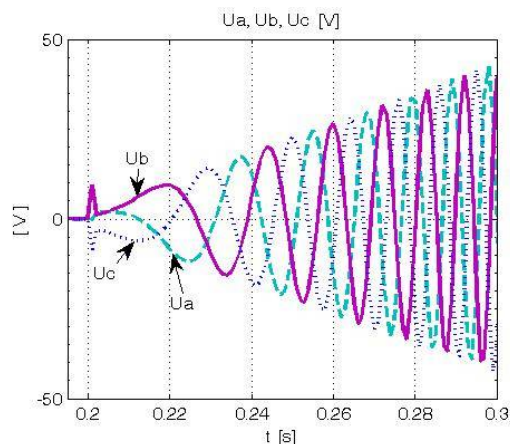
Фиг. 6. Преходни процеси на съставките I_{sx} и I_{sy} на вектора на статорния ток в преходен режим



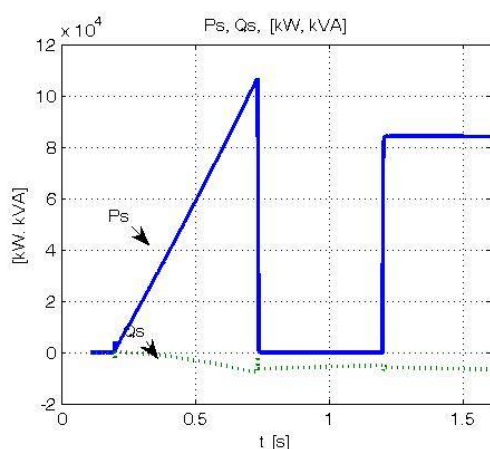
Фиг. 7. Преходни процеси на съставките I_{sd} и I_{sq} на вектора на статорния ток в преходен режим



Фиг. 8. Преходни процеси на фазните токове I_a , I_b и I_c в преходен режим при ускоряване на двигателя



Фиг.9. Преходни процеси на фазните напрежения U_a , U_b и U_c в преходен режим при ускоряване на двигателя



Фиг. 10. Преходни процеси на активната (P_s) и реактивната (Q_s) мощности на двигателя

Вижда се, че при ускоряване на висока скорост, активната статорна мощност достига и надминава стойности около сто киловата. Реактивната статорна мощност достига стойност около шест киловолтмпера. Двигателят работи с много висок фактор на мощност ($>0,99$). При необходимост, чрез допълнително регулиране на съставката I_{sd} се променя и реактивната статорна мощност.

4. Изводи

Резултатите от симулационните изследвания показват работоспособността на метода за векторно управление на синхронни електрически машини с вградени постоянни магнити при ориентация на координатната система по пространствения вектор на статорното потокосцепление. Възможността за управление на магнитния поток в машината позволява разширяване на диапазона на регулиране на скоростта и оптимизация на работата на електрозадвижването. Потвърждава се високото качество на управление, както и високата енергийна ефективност, които осигурява изследваното електрозадвижване.

Благодарност

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани със средства от договор МУФС-14 с Фонд "Научни изследвания" при МОМН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bossel, Ulf, Efficiency of Hydrogen Fuel Cell, Diesel-SOFC-Hybrid and Battery Electric Vehicles, European Fuel Cell Forum, Oberrohrdorf, 2003.
- [2] Hofman, H., Sanders S.R., High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.36, N2, 2000.
- [3] Levent, U. Gokdere, Khalid Benlyazid, Enrico Santi, Charles W. Brice and Roger A. Dougal, Hybrid Electric Vehicle with Permanent Magnet Traction Motor: A Simulation Model, Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'99), pp.502-504, Seattle, Washington, 1999.
- [4] Digital Signal Processing Solution for Permanent Magnet Synchronous Motor. Application Note BPRA044. Texas Instruments, 1997.
- [5] Brice C.W., Santi E., Kang X., Gokdere L.U., Reference frames for simulation of electric motors and drives, University of South Carolina, SC29208, USA, 2000.

Автори: д-р. Емил Рац, професор в кат. "Електрически машини", Технически университет – София, MEng PhD Robert Ratz, Senior Electronics Hardware Design Engineer, Ricardo, Prague, инж. Атанас Петров, докторант в кат. "Електрически машини", Технически университет – София

ИЗСЛЕДВАННИЕ НА ЕЛЕКТРОМОБИЛ С АВТОНОМНО ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕ

Емил Рац, Роберт Рац, Атанас Петров

Резюме. В доклада са представени резултати от симулационни изследвания на транспортно средство с електрозадвижване с автономно захранване. Разработен е програмен модел в среда Матлаб, включващ подсистеми: литиево-йонна акумулаторна батерия, синхронен двигател с вградени постоянни магнити, DC – DC преобразовател, динамичен модел на автомобил, трифазен транзисторен преобразовател и блок за управление. Проведени са изследвания в преходни и установени режими. Симулирано е движение по новия европейски драйвинг цикъл (NEDC). Снети са осцилограми на изменение на скоростта, въртящия момент, напрежението и състоянието на зареденост на акумулаторната батерия. Оценени са моментните стойности на консумираната и рекуперирана мощност.

AUTONOMOUSLY POWER SUPPLIED ELECTRICAL VEHICLE INVESTIGATION

Emil Ratz, Robert Ratz, Atanas Petrov

Abstract. The presented results in the report are from the simulation investigation of transport vehicle with electrical drive running on autonomously supply. A simulation model in MATLAB environment is developed. The model includes several subsystems i.e.; lithium-ion battery, interior permanent magnets synchronous motor, DC-DC converter, dynamic model of the vehicle, three phase transistor inverter and control block. Several investigations at transient and steady states are conducted. Simulation according the new European driving cycle - NEDC is performed. The transient characteristics of the vehicle speed, motor torque, battery voltage, battery state of charge-SOC are received. The moment values of the consumed and recuperated power are valuated.

1. Увод

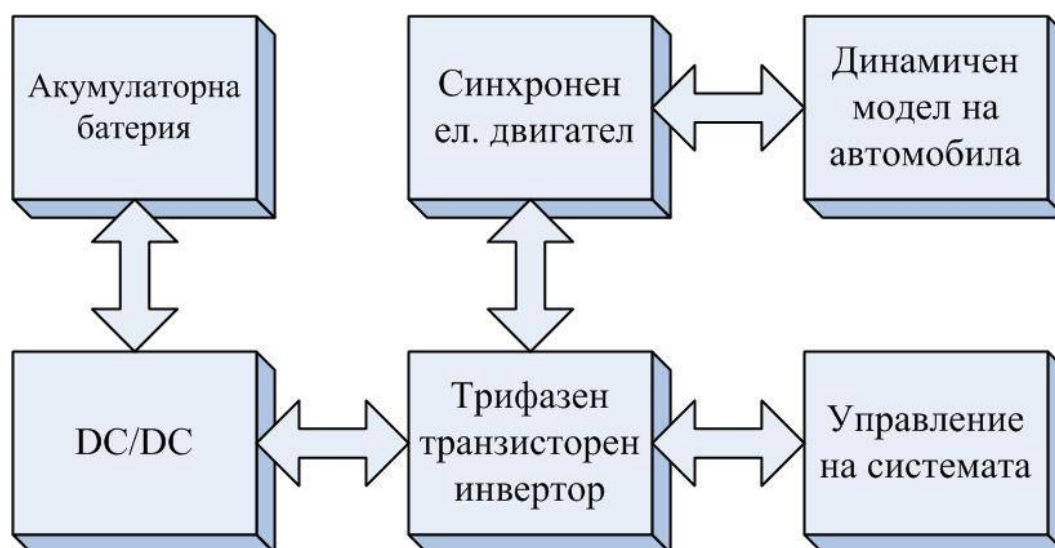
Ограничените запаси от нефт и екологичните проблеми, пред които е изправено човечеството стимулират все повече специалисти да търсят алтернативи за задвижване на автомобилния транспорт. Натрупаният опит свързан със задвижване на влакове, трамваи, трелеи насочва усилията на инженерите към разработване и внедряване на електрозадвижването системи в автомобилостроенето. Разработени са редица хибридни автомобили [1] и електромобили [2]. Изследователската работа е насочена към повишаване на

енергийната ефективност на с оглед удължаване на пробега на автомобила. Разработени са проблемно ориентирани микропроцесори чрез които се реализират все по-добри методи за управление на електрическите машини [3]. Широко използваните в миналото постояннотокови двигатели са измествани от синхронните и асинхронните електродвигатели. Реализацията на електромобила задължително е предхождана от подробни симулационни изследвания на енергийната ефективност с програмни модели.

2. Програмен модел

За целите на това изследване е разработен компютърен модел (фиг. 1), който включва:

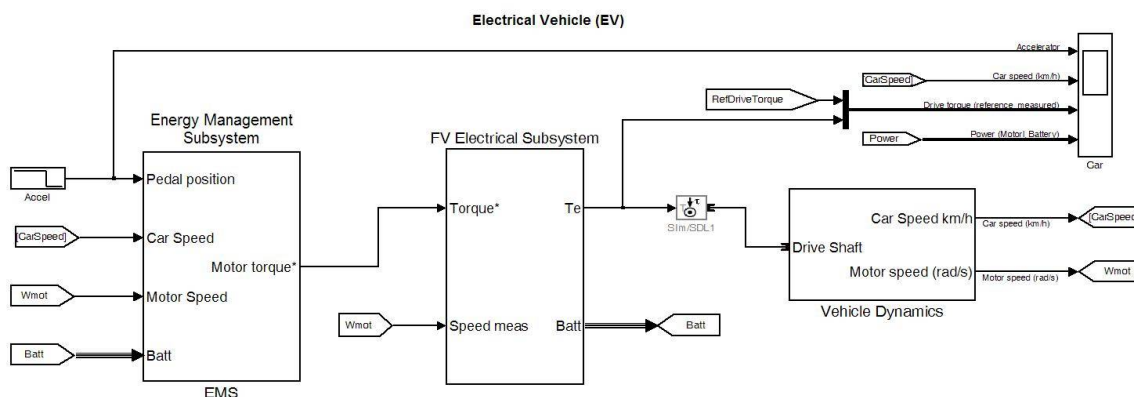
- Модел на автономен хранящ източник (литиево-йонна батерия 48,9 Ah , 288V_{dc}, 25kW)



Фиг. 1. Блок схема на модела на електромобил, задвижван от синхронен електродвигател с постоянни магнити с векторно управление при автономно храняване с литиево-йонна акумулаторна батерия

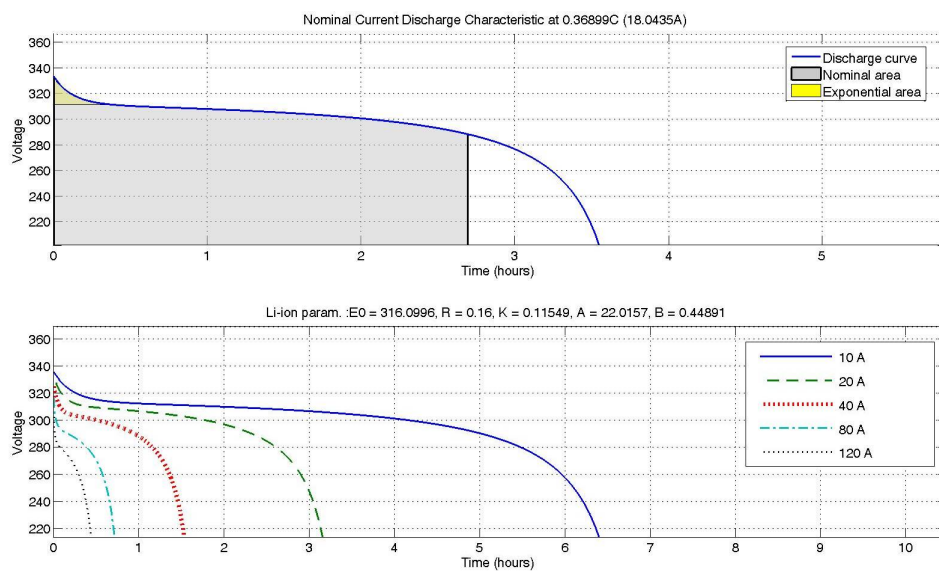
- Модел на DC – DC преобразовател на постояннотокова енергия в постояннотокова с променено напрежение. За движение на електромобила с висока скорост, преобразователят повишава напрежението осигурявано от акумулаторната батерия (288V) до напрежение 500V, с което се хранва транзисторния инвертор. Също DC – DC преобразователят е в състояние да преобразува генерираното от електрическата машина напрежение в напрежение подходящо за зареждане на акумулаторната батерия. Друга функция на DC – DC преобразователя е да конвертира електрическата енергия, получавана от допълнителен източник, например от блок с горивни клетки и да я подава към силовия инвертор. Тази функция се изпълнява в хибридните транспортни средства.

- Модел на трифазен транзисторен инвертор.
- Модел на електрическа машина. При симулацията е използвана синхронна явнополюсна машина с вградени постоянни магнити. При спиране, машината преминава в генераторен режим, преобразува кинетичната енергия в електрическа за зареждане на акумулаторната батерия.
- Динамичен модел на транспортното средство (автомобил)
- Модел на блок за управление. Блокът приема заданието за въртящ момент и го ограничава с оглед моментната скорост на въртене. Реализира също алгоритми за векторно управление. При наличие и на втори източник на енергия (при хибридни транспортни средства) този блок може да поеме функции, свързани с разпределение на необходимата обща мощност към двата енергийни източника.

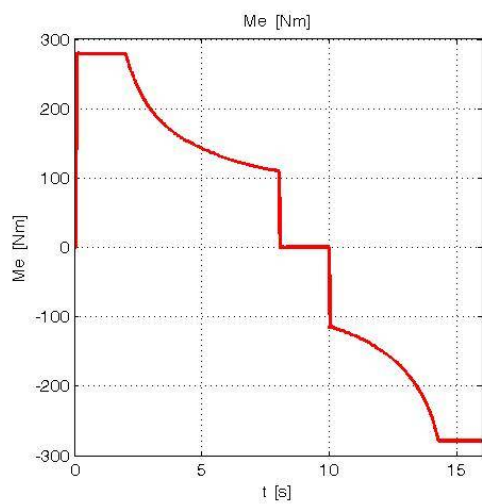


Фиг. 2. Модел на транспортно средство с автономно захранване с акумулаторна батерия и електрозадвижване с векторно управление

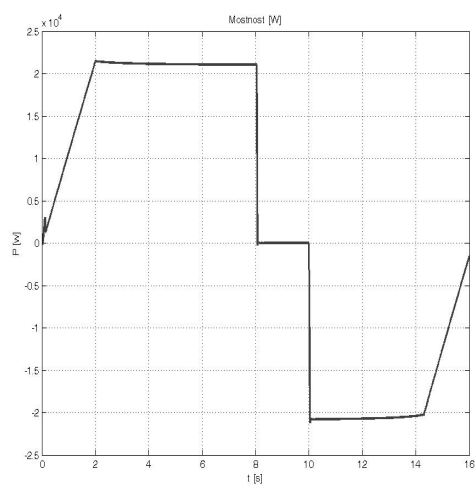
Разработеният компютърен модел (фиг. 2.) в симулационна среда Matlab/Simulink е структуриран и иерархично организиран с оглед максимално удобство при промяна на основните блокове. За целта, основните блокове (електродвигател, захранваща акумулаторна батерия, блок векторно управление и др.) са моделирани като подсистеми. Например, при смяна на синхронния електродвигател с асинхронен електродвигател, методът за управление се променя чрез смяна на подсистемата “векторно управление”. Теглителната сила на електромобила се определя от положението на педалите за ускоряване и за спиране (в модела те са обединени, като положителните амплитуди означават зададен теглителен момент, а отрицателните амплитуди – зададен спиращ момент).



Фиг. 3. Разрядни характеристики на литиево-йонна батерия, получени със симулационния модел



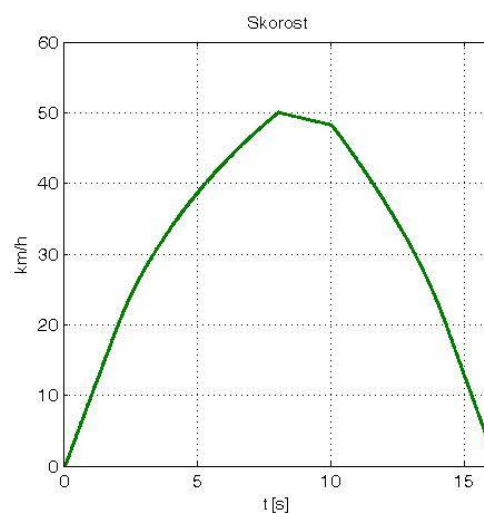
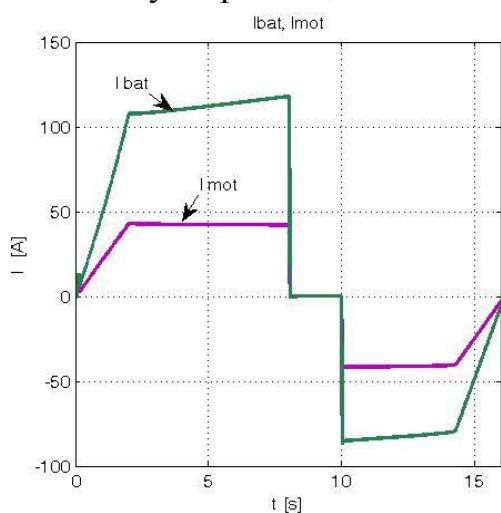
Фиг. 4. Зададена и действителна стойности на въртящия електромагнитен момент



Фиг. 5. Изменения на мощността на задвижващия електродвигател

3. Преходни и установени процеси

Големината на момента се определя от зададената с педала амплитуда. Допълнително, заданието за момент се ограничава (фиг. 4.) в зависимост от моментната скорост с оглед ограничението по максимална мощност на акумулаторната батерия. От фиг. 5 се вижда, че след втора секунда на ускоряване мощността се поддържа практически постоянна. В 10-та секунда се подава задание за спиране. Двигателят преминава в генераторен режим с мощност около 21 kW (фиг. 5.). С намаляване на скоростта (фиг. 6), спирачния момент се увеличава (фиг. 4.) и достига до 280 Nm. В периода между 8 и 10 секунда електромобилът се движи по инерция с нулев въртящ момент. При това скоростта спада (фиг. 6.) вследствие загубите в триене и в др. При симулация на цикъла с ускоряване, движение по инерция и

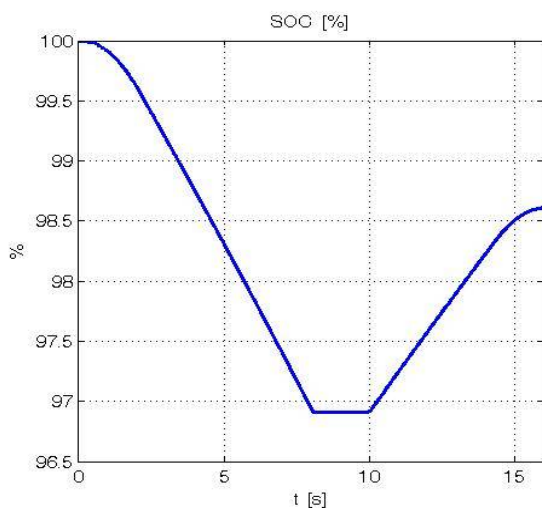


Фиг. 6. Осцилограма на скоростта на движение на електромобила през цикъл: ускоряване, по инерция и спиране

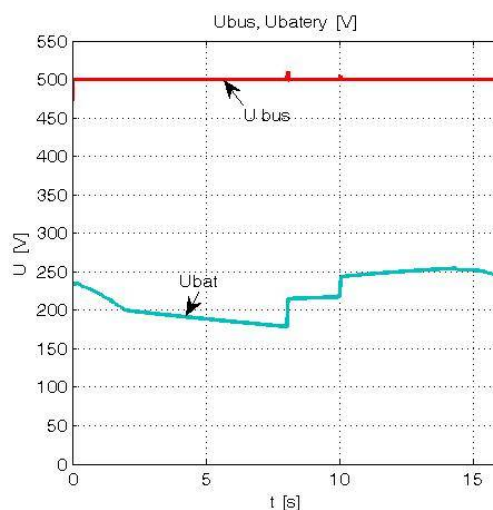
Фиг. 7. Изменения на тока на акумулаторната батерия I_{bat} и амплитудната стойност на статормния ток на двигателя I_{mot}

електродинамично спиране е осцилографирано изменението на тока на акумулаторната батерия и амплитудната стойност на тока през статормната намотка на електродвигателя (фиг. 7). Голямото различие в амплитудите на двата тока (фиг. 7) се дължи на различието в напреженията на акумулаторната батерия и на транзисторния инвертор. Последното се вижда от осцилограмата на фиг. 8. Очевидно, в периода на ускоряване напрежението на акумулаторната батерия спада, а при спиране, вследствие на рекупериранията енергия то се повишава.

Състоянието на акумулаторната батерия е отразено на фиг. 9, където съвсем отчетливо се вижда, че в периода на ускоряване на електромобила, при консумация на енергия, степента на зареждане на батерията спада под 97%. При движение по инерция, между 8 и 10 секунда нивото на зареденост на батерията е постоянно. При електродинамично спиране, след 10-та секунда, енергията се рекуперира и батерията се дозарежда до ниво 98,6 % (фиг.8). Разликата до 100% е разходвана за покриване на загубите.



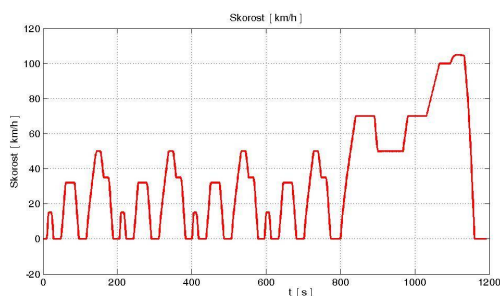
Фиг. 8. Осцилограми на
напрежението на акумулаторната
батерия, U_{bat} , и на постояннотоко-
вата магистрала на транзисторния
инвертор, U_{bus}



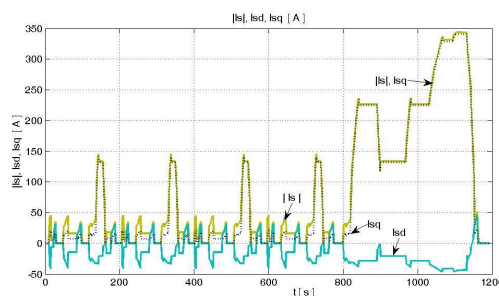
Фиг. 9. Ниво на зареждане в %
на акумулаторната батерия през
цикъла “ускорение-движение
по инерция-спиране”

4. NEDC тест на електромобил с автономно захранване

Във връзка с оценка на вредните емисии на автомобилите са дефинирани транспортни цикли. В Европа е въведен така наречения “New European Driving Cycle” (NEDC) – нов европейски транспортен цикъл, показан на фиг.10. Той се състои от четири градски цикъла със скорост на движение до 50 км/час и един магистрален със скорости до около 106 км/час (фиг.10). При симулация, управляващата система регулира въртящия момент на електродвигателя за реализация на моментните скорости, съгласно зададените от NEDC цикъла. Симулацията е проведена с маса на автомобила 600кг и синхронен електродвигател с обявена мощност 25kW. На фиг.11 са дадени осцилограми на модула на пространствения вектор на статорния ток и неговите съставки при изпълнение на NEDC цикъла.

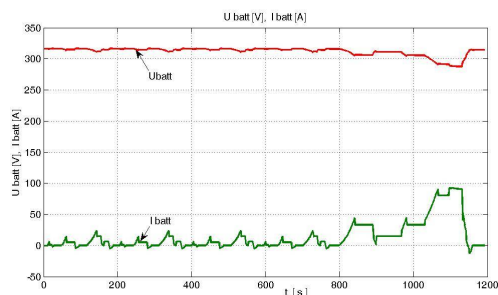


Фиг. 10. Изменение на скоростта
на движение според NEDC

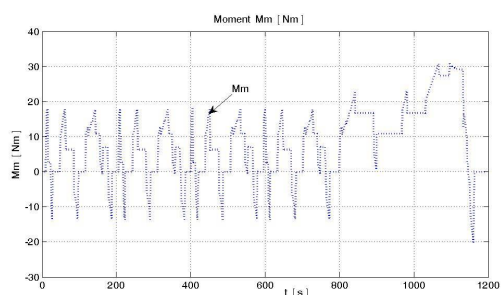


Фиг. 11. Осцилограми на
статорния ток и съставките му в
[d,q] координатна система

На фиг. 12 са показани моментните стойности на напрежението и тока на акумулаторната батерия. На фиг. 13 е дадена осцилограма на моментните стойности на въртящия електромагнитен момент по време на изпълнение заданията за скорост по новия европейски транспортен цикъл. Пиковите стойности на въртящия момент са в корелация с моментите, когато се реализира ускоряващо или закъсняващо движение. При осъществяване на намаление на скоростта с отрицателна стойност на въртящия момент, синхронната машина работи в генераторен режим и преобразува кинетичната енергия в електрическа.

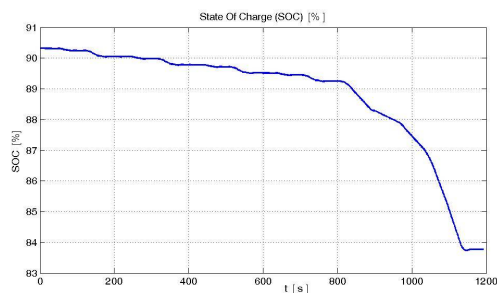


Фиг. 12. Осцилограми на напрежението и тока в акумулаторната батерия при изпълнение на NEDC

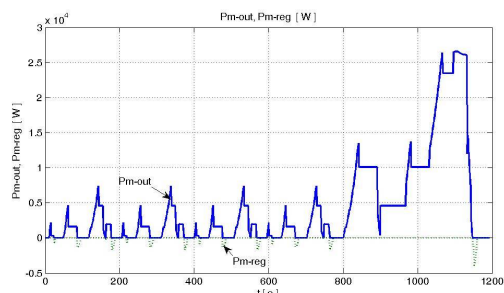


Фиг. 13. Изменение на въртящия електромагнитен момент при изпълнение на NEDC

Моментните стойности на степента на зареденост на акумулаторната батерия са отразени на фиг. 14. Разбираемо, при изпълнение на магистралния транспортен цикъл разходът на енергия е увеличен. Това е отразено конкретно на фиг. 15, където е показана и рекупериранията енергия (с отрицателни стойности).



Фиг. 14. Състояние на зареденост на акумулаторната батерия при изпълнение на NEDC



Фиг. 15. Моментни стойности на консумираната мощност при изпълнение на NEDC

В динамичния модел на механиката на електромобила са зададени големи коефициенти на загуби, съответстващи на автомобил с маса 1600 кг. При цялостен анализ на загубите, резултатите отрезени в таблица 1 показват общо к.п.д. около 66%.

Таблица 1.

<i>Загуби (%)</i>	<i>Процес, при който възникват загубите</i>	<i>К.П.Д.</i>
10%	Загуби между електроцентралата и дома	0,90
8%	Загуби на домашния AC-DC преобразовател за зареждане	0,92
20%	Загуби при зареждане и разреждане на батерията	0,80
10%	Електрически загуби на задвижването, захранвано от батериите и загуби на механичната система.	0,90
10%	Премия за рекуперация при спиране	1,10
34%	ОБЩО	0,66

5. Изводи

Представени са резултати от симулационни изследвания на автомобил с електрозадвижване със синхронен електродвигател с вградени постоянни магнити. Изследвани са разработените алгоритми за управление на този тип електродвигатели. Получените осцилограми показват работоспособността и високото качество на методите за управление. Проверена е способността на системата да рекуперира енергията при спиране. Тази способност е от решаващо значение за ефективността на електрозадвижването на транспортното средство с автономно захранване. От гледна точка на енергийна ефективност определено предимство има синхронния електродвигател с постоянни магнити. Проведените симулационни изследвания показват работоспособността на разработените компютърни модели на съставните подсистеми (акумулаторна батерия, електродвигател, динамичен модел на механиката на електромобила). Те потвърждават енергийната ефективност и много добрата перспектива на транспортните средства с автономно захранване и електрозадвижване с векторно управление и рекуперация при спиране.

Благодарност

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор МУФС-14 с Фонд "Научни изследвания" при МОМН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bossel, Ulf, Efficiency of Hydrogen Fuel Cell, Diesel-SOFC-Hybrid and Battery Electric Vehicles, European Fuel Cell Forum, Oberrohrdorf, 2003.
- [2] Levent, U. Gokdere, Khalid Benlyazid, Enrico Santi, Charles W. Brice and Roger A. Dougal, Hybrid Electric Vehicle with Permanent Magnet Traction Motor: A Simulation Model, Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'99), pp.502-504, Seattle, Washington, 1999.
- [3] Robert Bosch GmbH, Automotive Electrics and Automotive Electronics, Wiley, 2007.
- [4] Standart Lithium-ion Battery Packs, SANYO Electric Co. Ltd., Japan, 2002.
- [5] Nickel Cadmium Batteries, SANYO Electric Co. Ltd., Japan, 2003.
- [6] Digital Signal Processing Solution for Permanent Magnet Synchronous Motor. Application Note BPRA044. Texas Instruments, 1997.
- [7] Hofman, H., Sanders S.R., High-Speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.36, N2, 2000.
- [8] Brice, C.W., Santi E., Kang X., Gokdere L.U., Reference frames for simulation of electric motors and drives, University of South Carolina, SC29208, USA, 2000.

Автори: д-р Емил Рац, професор в катедра “Електрически машини”, Технически университет – София, MEng PhD Robert Ratz, Senior Electronics Hardware Design Engineer, Ricardo, Prague, инж. Атанас Петров, докторант в катедра “Електрически машини”, Технически университет – София

РАЗДЕЛЯНЕ НА МЕХАНИЧНИТЕ И ВЕНТИЛАЦИОННИТЕ ЗАГУБИ НА ЕДНОФАЗНИ КОЛЕКТОРНИ ДВИГАТЕЛИ ЗА РЪЧНИ ЕЛЕКТРОИНСТРУМЕНТИ

Ганчо Божилов, Адриан Иванов, Михо Михов, Димитър Пенев

Резюме. В работата са представени резултати и анализи от изследването на еднофазни серийни колекторни двигатели за ръчни електроинструменти с цел разделяне на механичните и вентилационните загуби на мощност на двигателя с инструмента като цяло. За целта е използван методът на самоспиране на машината на празен ход с последваща математическа обработка на данните. Установено е, че загубите от триене в лагерите и четките в колектора са пропорционални на първата степен на ъгловата скорост на ротора, а тези от триене на въздуха във въртящите се части на машината и в елементите на вентилационната верига, както и за задвижване на самия вентилатор, са пропорционални на втората степен на скоростта.

DIVIDING OF THE MECHANICAL AND VENTILATOR LOSESS OF THE SINGLE PHASE COMMUTATOR MOTORS FOR POWER TOOLS

Gantcho Bojilov, Adrian Ivanov, Miho Mihov, Dimitar Penev

Abstract. In the paper the results and analysis of the investigation of the single phase series commutator motors for power tools for purpose to divide the mechanical and ventilator loses of the motor with power tool together is presented. For this purpose the method of the self stopping of the machine on no-load with mathematical work of the data is used. Is receive that the loses of the friction in the bearings and the brushes on the commutator is proportionate of the first power of the angular speed of the rotor, but the loses due of the friction the air in the rotating pieces of the machine and in the ventilator circuit is proportionate of the second power of the angular speed of the rotor.

1. Увод

Определянето и отделянето на механичните и вентилационните загуби на вградения в електроинструмента двигател е от голямо значение за правилното му проектиране и конструиране. Съществуващите методики за предварителното изчисление на загубите не разглеждат електро-инструмента като цяло, а третират двигателя изолирано сам по себе си, без да отчитат наличието на сложен редуктор с голям брой търкалящи лагери, центробежен

Годишник на ТУ-София, т. 60, кн. 2, 2010

Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 60, book 2, 2010

вентилатор с много лопатки и комплицирана вентилационна система в корпуса. Ето защо е необходимо едно по-детайлно изследване на този вид загуби на мощност в целия електроинструмент. Трябва да се уточни, че под „механични“ загуби се разбира сумата на загубите от триене в лагерите на машината и от триене на четките в колектора, а „вентилационните“ загуби са сума от загубите на триене на въздуха във въртящите се части на двигателя и загубите от производителността на вентилатора, осигуряващ преминаването на въздуха през вентилационната верига. Необходимо е да се имат пред вид и особеностите на съвременните електроинструменти, а именно че те са с електронно регулиране, с токоограничение и стабилизиране на скоростта, а някои от тях са реверсивни, двускоростни и ударни и с големи предавателни отношения поради това, че двигателите са високооборотни.

2. Описание на използвания метод

За разделянето на механичните и вентилационните загуби е приложен експериментално-аналитичен метод, състоящ се в използване на опита на самоспиране на двигателя на празен ход с последваща математическа обработка на данните. Както е известно [1,2], опитът на самоспиране на един електродвигател позволява при известни механични и вентилационни загуби да бъде определен инерционният момент на ротора или обратно, при известен инерционен момент J да бъде определена сумата от механичните и вентилационните загуби $P_{заг}$. За целта трябва да се снее зависимостта на ъгловата скорост на изхода /в случая – патронника на изпитваната машина/ във функция от времето $\omega = f(t)$ в сглобено състояние на инструмента при самоспиране на двигателя на празен ход. Тези загуби се определят от зависимостта:

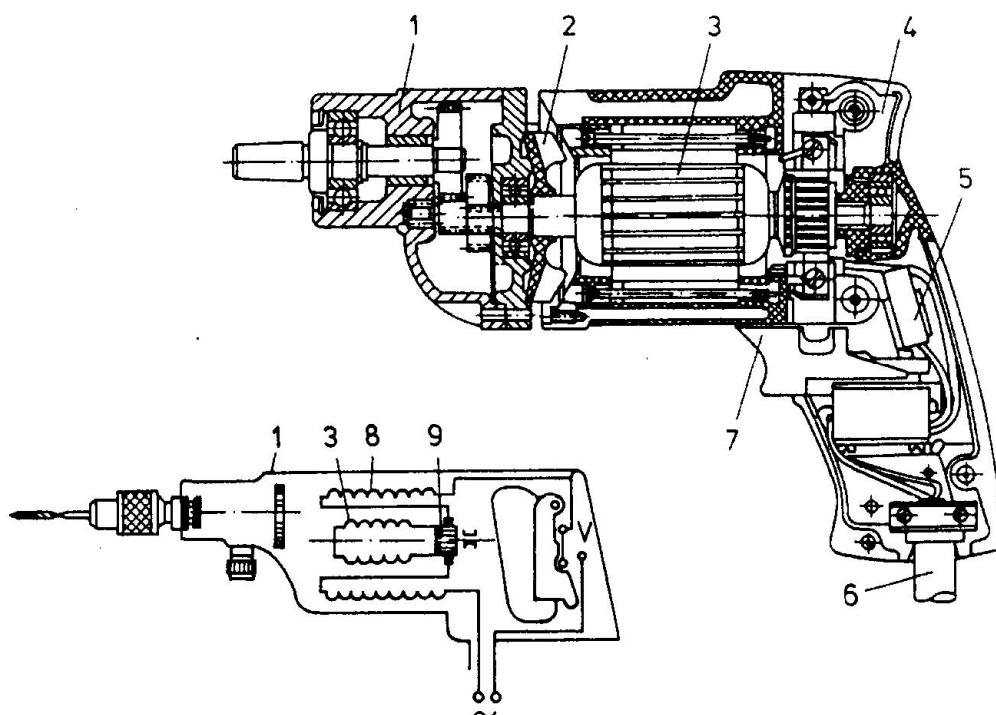
$$(1) \quad P_{заг} = -i^2 J \omega \frac{d\omega}{dt},$$

където i е преводното отношение на редуктора, J – пълният приведен инерционен момент на ротора на двигателя и всички въртящи се части, свързани с него (зъбните колела на редуктора, патронника и другите присъединени елементи). Инерционният момент може да бъде измерен опитно по някой от известните начини или да бъде изчислен аналитично по известни формули, както и с използване на някой от достъпните компютърни продукти, напр. [3,4].

3. Опитна постановка и обработка на получените резултати

Изпитани са 10 различни електроинструмента с електронно регулиране (част от тях двускоростни) с подобни конфигурации и мощности между 600 и 700 W (фиг. 1) и номинални скорости на ротора между 20000 и 25000 min⁻¹, с близки главни размери, а именно: външен диаметър на пакета на котвата $D_a =$

32 mm, дължина на пакета на котвата $L_a = 40/48$ mm, маса на котвата $G_a = 0,3/0,33$ kg, преводни отношения съответно $i = 8,62; 25,86; 10,75; 23; 26,89$ и инерционни моменти на ротора с редуктора $J = 28,55/33,46 \cdot 10^{-6}$ kg.m². Инерционните моменти са изчислени аналитично по следния начин: валът на двигателя и патронника (или присъединителната шайба) като плътни цилиндри, яремът на ротора, колектора, чинията на вентилатора и зъбните колела на редуктора като кухи цилиндри, зъбите на ротора, перките на вентилатора и активните части на котвената намотка като паралелепипеди, ансамбъла на челните съединения като две кухи полусфери. Скоростта на въртене на електроинструмента в сглобено състояние е измерена с миниатюрен тахогенератор за постоянен ток, тариран с цифров оборотомер, като изходящото напрежение се измерва с цифров запомнящ осцилоскоп с последваща математическа обработка на данните. За всяка машина бяха проведени по 4 опита – в две посоки на въртене (при реверсивните машини) при отворени и затворени входни и изходни отвори на вентилационната верига. Резултатите в графичен вид за една машина са илюстрирани на фигури 2,3,4.



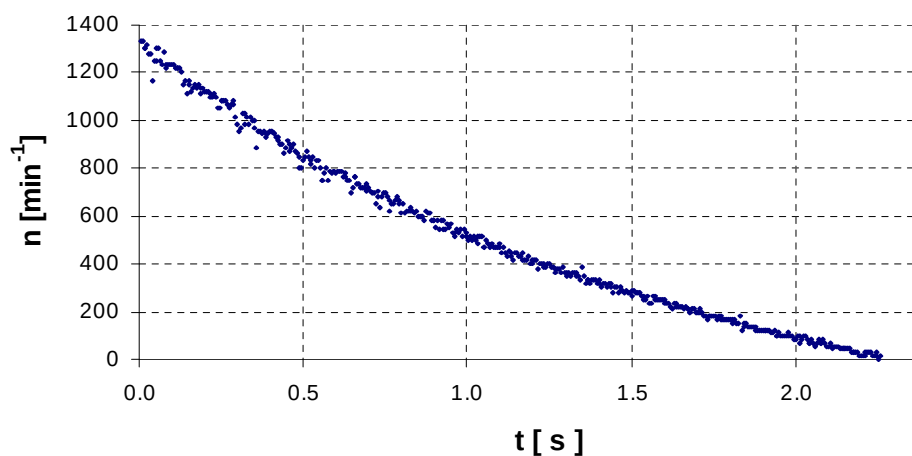
Фиг. 1

Математическата обработка на получените резултати се състои в следното:

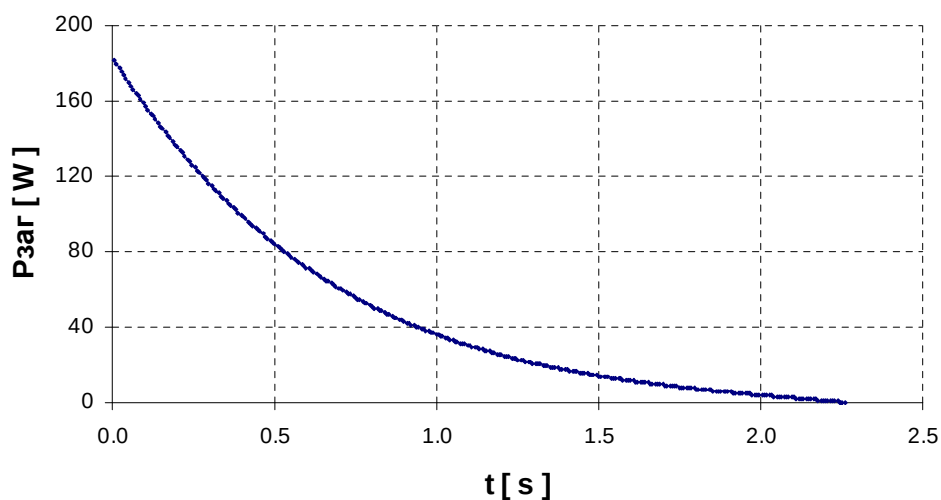
1. Кривата на ъгловата скорост във функция от времето $\omega = f(t)$, получена при самоспиране на машината (фиг. 2), се апроксимира чрез подходящ математически продукт [5,6], напр. SigmaPlot във вид на аналитична функция с полином от 3-та степен, която след това се диференцира по времето.

$$(2) \quad w = at^3 + bt^2 + ct + d$$

$$(3) \quad \frac{dw}{dt} = 3at^2 + 2bt + c.$$

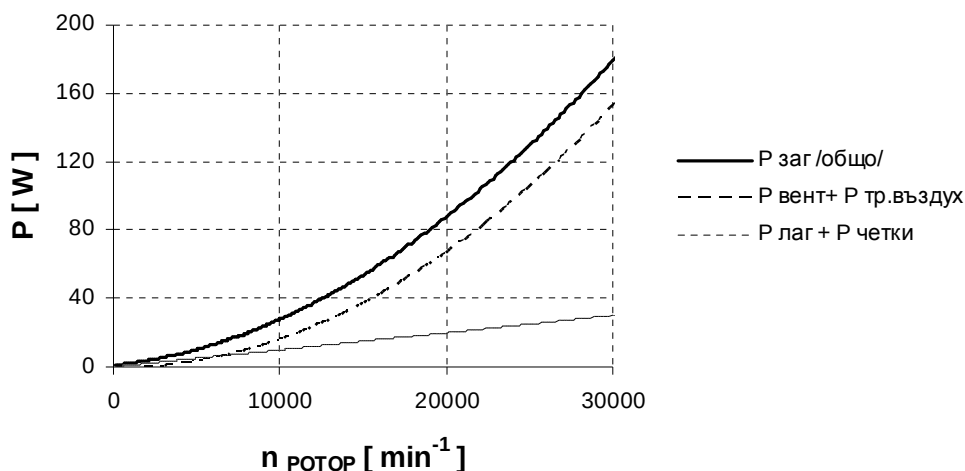


Фиг. 2



Фиг. 3

2. С получените числени стойности за скоростта и производната ѝ се определят общите механични и вентилационни загуби в процеса на самоспиране по формула (1) / фиг. 3/. След изключване на величината време в зависимостите $\omega = f(t)$ и $P_{\text{заг}} = f(t)$, се получава $P_{\text{заг}} = f(w)$, респ. $P_{\text{заг}} = f(n)$ – фиг. 4. Тези зависимости също могат да бъдат интерполирани в средата на SigmaPlot, което дава възможност за анализ относно характера на съставките на $P_{\text{заг}}$.



Фиг. 4

3. С цел да се намери най-подходящата описателна функция бяха проверени последователно полиноми от 4-та, 3-та и 2-ра степен. Резултатите за всички анализирани машини при всички опити и при всички скорости и посоки на въртене убедително показват, че свободните членове на полиномите имат незначителни стойности (по-малки от един ват) и могат да бъдат пренебрегнати. Освен това стойностите на коефициентите пред 4-тата и 3-тата степен на полиномите също имат много малки стойности, като загубите, получени аналитично и опитно, се покриват с най-голяма точност от полином от 2-ра степен.

$$(4) \quad P_{заг} = Aw^2 + Bw + C$$

4. Анализ на резултатите

Както се спомена, общите механични и вентилационни загуби $P_{заг}$ се състоят от две компоненти – загуби от триене на лагерите и четките $P_{лч}$ и загуби от триене на въздуха и за задвижване на вентилатора $P_{вв}$. Общоприето е мнението, че първите са пропорционални на първата степен на скоростта, тъй като триенето между четките и колектора е сухо триене при плъзгане, а триенето в лагерите (което е триене при търкаляне и поради смазката е полутечно или полусухо и затова загубите в тях са по-малки от тези на четките), може условно да се отнесе към него. Следователно вторият член в (4) $P_{лч} = Bw$ представлява делът на този вид загуби и на фиг. 4 се изразява с права линия, като се има пред вид и това, че свободният член в (4) е пренебрежимо малък ($C \approx 0$). В такъв случай първият член в (4) ще даде загубите от триене на въздуха и за задвижване на вентилатора $P_{вв} = Aw^2$, които на фиг. 4 се изразяват с парабола от 2-ра степен.

Последният извод е малко озадачаващ, тъй като е общоприето, че загубите на мощност, отделяни от двигателя за задвижване на охлаждащия

вентилатор, би трябвало да са пропорционални на 3-та степен от скоростта, макар че резултатите и от други изследвани електроинструменти сочат към 2-ра степен. Едно възможно обяснение на този резултат е, че основният дял от тези загуби при високоскоростните двигатели за електроинструменти не е за задвижване на вентилатора, а се дължи на триенето на въздуха в повърхностите на пакета на ротора, челните съединения на котвената намотка, колектора, перките на вентилатора, полюсите и бобините на възбудителната намотка. Последното твърдение кореспондира и с обстоятелството, че тези загуби са равни на отношението на “хидравличната” мощност на вентилатора (която е пропорционална на третата степен на скоростта) към енергийния к.п.д. на вентилатора, който не е константен, а в областта преди максимума си е приблизително пропорционален на първата степен на скоростта [7,8].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколов, Е. Изследване и изпитване на електрически машини. Техника, София, 1977.
- [2] Михов, М., Д. Сотиров. Определяне на механичните загуби на синхронна машина по метода на самоспиране. Год. на ТУ – София, т. 59, кн. 1, 2009 г.
- [3] Meeker, D. Finite Element Method Magnetics, Ver.3.3, User's Manual, 2002.
- [4] Брандиски, К., И. Ячева. CAD системи в електромагнетизма. С., Сиела, 2002.
- [5] SigmaPlot 8.02 Demo, User's Guide, SPSS, Inc. 2003.
- [6] MATLAB – High performance numeric computation and visualization software – reference guide, The Math works, 1992.
- [7] Копилов, И. и кол.. Проектиране на електрически машини, Техника, С., 1988.
- [8] Сергев, П. и кол. Проектирование электрических машин, Энергия, М., 1969.

Автори: проф. Ганчо Божилов, гл. ас. Адриан Иванов, доц. Михо Михов – кат. „Електрически машини”, инж. Димитър Пенев – ФФОЕ

Авторите изказват благодарност на проф. д.т.н. Емил Рац за помощта при осъществяване на измервателната постановка !

ОСОБЕНОСТИ ПРИ ПРИЛОЖЕНИЕТО НА МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛНИ ЕЛЕМЕНТИ НА БАЗАТА НА ПЛАНАРНИ ДИОДИ

Иван Костов, Никола Серафимов

Резюме. Изследвано е експериментално поведението на планарен магнитодиод тип КД304 В1-1 в оптични полета с различна дължина на вълната , от 350 до 650 нанометра. Показани са графични резултати при изменение на тока на фотоизлъчвателя.

SOME FEATURES IN APPLICATION OF THE MAGNETICSENSITIVE SENSORS, BASED ON THE PLANAR MAGNETO – DIODES

Ivan Kostov, Nikola Serafimov

Abstract. Behaviour of a planar magneto – diode КД304 В1- 1 under optical field influence with wavelengths 350 – 650 nm has been experimentally explored. Graphical dependencies and results under varying light – emitting source current are shown and analyzed.

1. Въведение

Съвременните технически устройства притежават немалко апаратура и обекти, работата на които е основана на взаимодействието с магнитно поле или такова поле се използва в качеството на управляваща среда. Развитието на едно сравнително ново научно-техническо направление – микромагнителектроника позволява да се разработват и произвеждат няколко милиарда годишно магниточувствителни сензори , интегрални схеми и устройства.

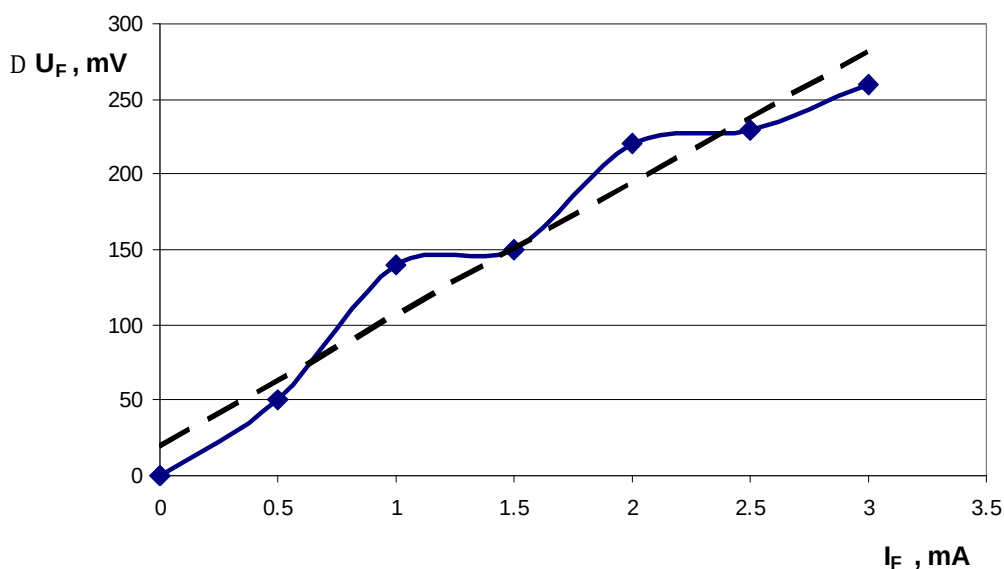
Сложните магнителектронни устройства, използвани в системите за управление на производствени процеси, автомобилна електроника, дефектоскопия, медицинска апаратура, почти винаги съдържат и елементи, реагиращи и на други физически въздействия, например фотоприемници, реагиращи на оптическо излъчване. В този случай електронната схема обработва и реализира параметрите на два чувствителни елемента. Освен това, отделни типове магниточувствителни елементи- например магнитодиди, магнитотранзистори, Хол-елементи самите са фотоприемници т.е. са чувствителни на оптични лъчения [1,2]. Спектралния диапазон на фоточувствителност на тези елементи зависи от материала и от технологията на изработване. За силициевии структури този диапазон е във видимия и близък до инфрачервения спектър (от 400 до 1100 нанометра).

Планарните магнитодиоди тип КД304А-1, КД304Б1-1, КД304В1-1, КД304Г1-1, КД304Д1-1 и КД304Ж1-1 се произвеждат по планарна технология с

йонно легиране. Магниточувствителният елемент на диода е изпълнен от високоомен силициев кристал с размери 2 x 1 x 0,4 mm. Към контактните площадки на кристала са запоени изводи от плоски проводници. Цялата конструкция е защитена с епоксиден компаунд. Магнитодиодите трябва да се ориентират така, че силовите линии на управляващото магнитно поле да са перпендикулярни на страничните повърхности на полупроводниковата структура.

2. Волтеслови характеристики

Волтамперните характеристики за силициев магнитодиод при различни индукции на магнитното поле (МП) са силно нелинейни и зависят от посоката на вектора на полето, т.е. имат полярна магниточувствителност. След експериментално снемане на волтамперните характеристики в отсъствие и при наличие на МП с $B=0,2$ Т (измерена с тесламетер) в работата графично е показана зависимостта на разликата в напреженията при промяна на тока в права посока през магнитодиода. Тази зависимост би могла да се апроксимира с права линия. Практически тази разлика ΔU_F се достига при използване на два магнитодиода последователно свързани или в мостова схема, като единият е извън МП, а вторият – в област с магнитно поле (в случая във въздушната междина на постоянен магнит).

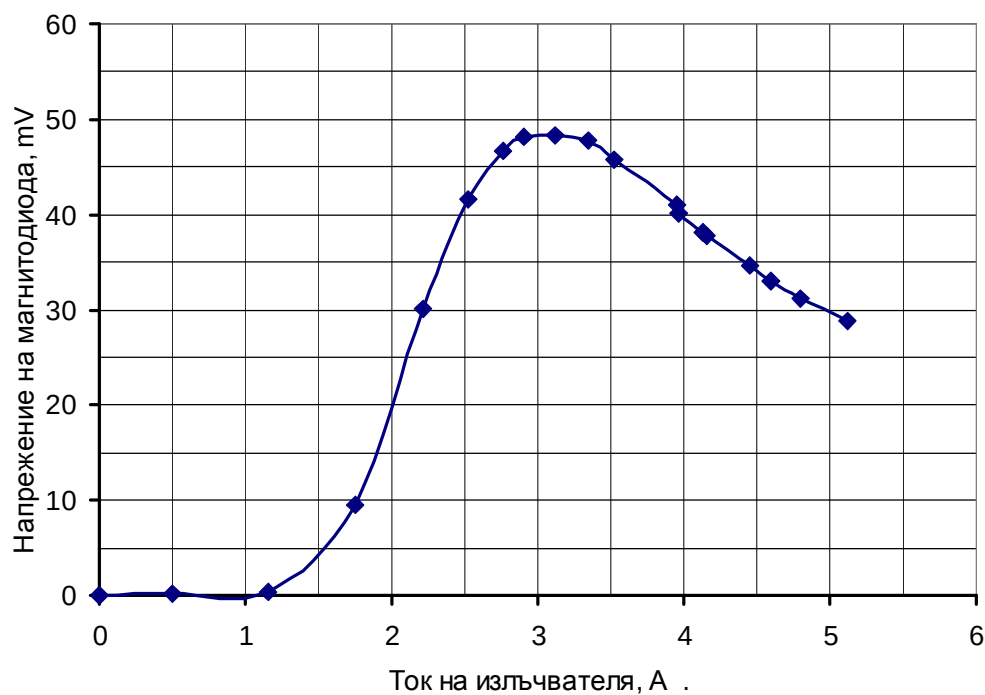


Фиг. 1. Зависимост на изменението на напрежението от тока в права посока при въздействие с магнитно поле с индукция 0,2 Т
а) експериментална б) апроксимираща – с пунктир

3. Магнитооптични характеристики

Характеристиките на магнитодиодите зависят от електрофизичните параметри на полупроводниковия материал, от който е направена базата. Тези параметри се изменят под действието на проникващи лъчения, възбуждащи и йонизиращи атомите или отместващи електроните от кристалната решетка. Може също така да възникнат ядрени реакции [2]. Тези явления оказват влияние на времето на живот и подвижността на токоносителите, изменя се тяхната равновесна концентрация.

На базата на магнитодиоди КД303А и КД304А-1 до КД304Ж-1 чрез наслявяване на полупроводниково стъкло(халкогенидно стъкло по системата $\text{Te} - \text{Se}$ на цялата повърхност) е създаден фоточувствителен магнитодиод с памет [3,4].

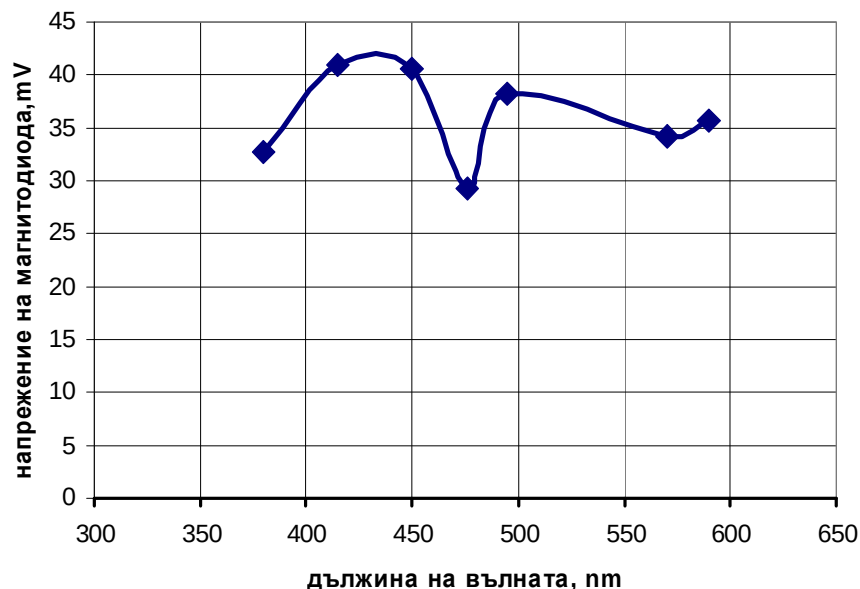


Фиг. 2. Зависимост на напрежението в права посока на магнитодиод КД304В1-1 при облъчване с халогенна лампа

4. Заключение и препоръки

Приложението на аналогова магнитооптична интегрална схема може да бъде по следната схема [5]. Включва се магниточувствителен елемент, захранван от източник на постоянен ток, инвертор и двувходов компаратор на напрежение. Схемата работи по следния начин: при въздействие с магнитно поле на изхода се получава напрежение с положителна полярност. При смяна на източника на управляващото въздействие с оптичен (например с излъчване от светодиод) на изхода на компаратора се сменя полярността на напрежението.

Експериментите показват, че магнитодиодите се характеризират с по-силно изразена чувствителност в обхвата от 415 nm до 450 nm т.е. във виолетовата и ултравиолетовата област. Най-слабо е влиянието в сивата област, при 476 nm.



Фиг. 3. Спектрална характеристика на магнитодиод КД304В1-1

Сравнението на резултатите показва още, че при слаби магнитни полета влиянието на светлинното облъчване не може да бъде пренебрегнато.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Егиазарян, Г. А. Магнитодиоди, магнитотранзистори и их применение. М.- Радио и связь, 1987. с. 34
- [2] Карапатницкий, И. А. Каракушан Е. И., Исаев Б. И. Исследование влияния нейтронного облучения на время жизни и удельное сопротивление методом ВАХ „длинных диодов// ФТП. -1979- Т.6 – с.1241.
- [3] Запоменяющий фотомангнитодиод // Электронная техника . Сер.2.-1984- № 5- с. 103-104.
- [4] Cristoloveanu, S., A. Mohaghegh, J.de Pontcharra. An integrated magnetic sensor: the silicon on sapphire Schottky magnetodiode. J. Physique Lett. 41, 1980, 235-237.
- [2] Бараночников, М. Л. Микромагнитоелектроника.Т.1.-М.: ДМК Пресс,2001.- 544с.:ил.

Автори: Иван Костов, доцент, д-р. инж., кат. „Обща Електротехника”, Никола Серафимов, гл. ас., инж., ФТК, кат. ТМКС