



ISSN 1311-0829

**ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ
УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ
Том 61, книга 2, 2011**



**PROCEEDINGS OF TECHNICAL
UNIVERSITY OF SOFIA
Volume 61, Issue 2, 2011**

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. дтн Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. дтн Елена ШОЙКОВА

членове

проф. дтн Георги ПОПОВ

проф. дтн Иван КОРОБКО

проф. дфн Иван УЗУНОВ

проф. дтн Иван ЯЧЕВ

проф. дтн Кети ПЕЕВА

проф. дтн Ганчо БОЖИЛОВ

проф. д-р Бончо БОНЕВ

проф. д-р Евелина ПЕНЧЕВА

проф. д-р Иво МАЛАКОВ

проф. д-р Младен ВЕЛЕВ

проф. д-р Огнян НАКОВ

секретар-организатор

инж. Мария ДУХЛЕВА

EDITORIAL BOARD

Editor -in -Chief

Prof. D.Sc. Emil NIKOLOV

Editor -in -Vice -Chief

Prof. D.Sc. Elena SHOYKOVA

Editors

Prof. D.Sc. Georgi POPOV

Prof. D.Sc. Ivan KOROBKO

Prof. D.Sc. Ivan UZUNOV

Prof. D.Sc. Ivan YACHEV

Prof. D.Sc. Keti PEEVA

Prof. D.Sc. Gantcho BOJILOV

Prof. Ph.D. Boncho BONEV

Prof. Ph.D. Evelina PENCHEVA

Prof. Ph.D. Ivo MALAKOV

Prof. Ph.D. Mladen VELEV

Prof. Ph.D. Ognyan NAKOV

Organizing Secretary

Eng. Maria DUHLEVA

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

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



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

ISSN 1311-0829



СЪДЪРЖАНИЕ том 61, книга 2

МАТЕМАТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНИКА, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, КОМУНИКАЦИИ

1. Иван Трендафилов, Димитринка Владева	9
<i>Полупръстени от ендоморфизми без нула на крайна верига</i>	
2. Иван Трендафилов, Димитринка Владева	19
<i>Полупръстени от ендоморфизми без нула на крайна полурешетка от специален вид</i>	
3. Мариана Дурчева	29
<i>Криптосистема с открит ключ, основана на полупръстени от ендоморфизми на крайна полурешетка от специален вид</i>	
4. Богдан Гилев	39
<i>“Запомняне” на функции с използване на минимален брой точки и на subdivision схеми</i>	
5. Ясен Тодоров, Марин Иванов, Деян Андонов, Димо Стоилов, Рад Станев	47
<i>Изследване на установените режими в разпределителна мрежа средно напрежение с присъединени вятърни генератори</i>	
6. Кирил Стойков, Стефан Стайков, Калинка Тодорова	57
<i>Електропещни трансформатори - особености, част 1</i>	
7. Кирил Стойков	67
<i>Особености при регулиране на напрежението на електропещни трансформатори с мощност по-малка от 1000 kVa</i>	
8. Петър Динев, Диляна Господинова, Ивалина Аврамова, Тодорка Владкова, Кармен Гайдау	77
<i>Изследване на ефектите на плазмено повърхностно активиране с диелектричен бариерен разряд - част 1</i>	
9. Петър Динев, Диляна Господинова, Ивалина Аврамова, Тодорка Владкова, Кармен Гайдау	85
<i>Изследване на ефектите на плазмено повърхностно активиране с диелектричен бариерен разряд - част 2</i>	
10. Петър Динев, Диляна Господинова, Райна Ценева	95
<i>Магнитно стимулиране на бариерен разряд в условията на надлъжно магнитно изолиране</i>	
11. Илиана Маринова, Анелия Терзова, Валентин Матеев	105
<i>Оптимизация на формата на магнитопровод с генетичен алгоритъм</i>	
12. Валентин Матеев, Илиана Маринова, Анелия Терзова	113
<i>Моделиране на преходен процес на електромагнитен изпълнителен механизъм</i>	
13. Райна Ценева	123
<i>Моделиране на повърхностен ефект и ефект близост</i>	
14. Владимир Лазаров, Захари Зарков, Людмил Стоянов, Димитър Спиоров	133
<i>Работа при максимална мощност на асинхронна машина с навит ротор за вятърен генератор</i>	
15. Владимир Лазаров, Захари Зарков, Людмил Стоянов, Християн Кънчев	143
<i>Експериментално изследване на суперкондензатори и определяне на параметрите им</i>	



16. Владимир Лазаров, Захари Зарков, Людмил Стоянов, Християн Кънчев	153
<i>Изследване на възможностите за компенсирание на флукуациите на мощността на ветрогенератор със суперкондензатори</i>	
17. Ганчо Божилов, Антоанета Тодорова	163
<i>Термична дълготрайност на електрическата изолация при отрицателни температури</i>	
18. Ганчо Божилов.	169
<i>Компютърни задачи в електрическите машини</i>	
19. Милко Йовчев, Димитър Попов, Петьо Гаджанов, Виктория Попова	179
<i>ТЕЦ с нулеви емисии - съвместимост на postcombution-технологиите за редуциране на въглеродните емисии от тец с директива 1996/61 на европейския съюз</i>	
20. Йордан Марков, Даниела Минковска	189
<i>Функционални изисквания при проектиране на комуникационен модул в GPS система</i>	
21. Георги Найденов	197
<i>Изследване на варианти за изграждане на виртуални частни мрежи</i>	
22. Евдокия Димитрова	207
<i>Изследване на честотното асинхронно пускане на синхронните турбогенератори</i>	
23. Евдокия Димитрова	215
<i>Оптимизация на честотното асинхронно пускане</i>	
24. Илияна Найденова	221
<i>Изследване на влиянието на различните реакционни пътища върху подробното кинетично моделиране на окислението на ацетилен</i>	



CONTENTS volume 61, Issue 2

MATHEMATICS, ELECTRICAL ENGINEERING, POWER ENGINEERING, COMMUNICATIONS

1. Ivan Trendafilov, Dimitrinka Vladeva	9
<i>Endomorphism Semirings Without Zero of a Finite Chain</i>	
2. Ivan Trendafilov, Dimitrinka Vladeva.	19
<i>Endomorphism Semirings Without Zero of a Finite Semilattice of a Special Type</i>	
3. Mariana Durcheva	29
<i>Public Key Cryptosystem Based on Endomorphism Semirings of a Finite Semilattice of a Special Type</i>	
4. Bogdan Gilev.	39
<i>“Memorizing” of Functions Using Minimum Number of Points and Subdivision Schemes</i>	
5. Iasen Todorov, Marin Ivanov, Dejan Andonov, Dimo Stoilov, Rad Stanev.	47
<i>Study of Steady State Operation Modes of a Power Distribution Network Incorporating Wind Generators</i>	
6. Kiril Stoykov, Stefan Staykov, Kalinka Todorova.	57
<i>Furnace Transformers - Characteristics, part 1</i>	
7. Kiril Stoykov	67
<i>Some Problems in Voltage Control of Furnace Transformers with Power Lower 1000 kVa</i>	
8. Peter Dineff, Dilyana Gospodinova, Ivalina Avramova, Todorka Vladkova, Carmen Gaidau	77
<i>Investigation on Dielectric Barrier Discharge Surface Activation Effects - part 1</i>	
9. Peter Dineff, Dilyana Gospodinova, Ivalina Avramova, Todorka Vladkova, Carmen Gaidau	85
<i>Investigation on Dielectric Barrier Discharge Surface Activation Effects - part 2</i>	
10. Peter Dineff, Dilyana Gospodinova, Rajna Tzeneva.	95
<i>Magnetic Stimulated Dielectric Barrier Discharge to Terms of Longitudinal Magnetic Isolation</i>	
11. Iliana Marinova, Aneliya Terzova, Valentin Mateev	105
<i>Shape Determination of Magnetic Core by Genetic Algorithm</i>	
12. Valentin Mateev, Iliana Marinova, Aneliya Terzova	113
<i>Transient Electromagnetic Modeling of Electromagnetic System</i>	
13. Raina Tzeneva	123
<i>Modeling of Skin and Proximity Effects</i>	
14. Vladimir Lazarov, Zahari Zarkov, Ludmil Stoyanov, Dimitar Sprirov.	133
<i>Maximum Power Operation of Wound Rotor Asynchronous Machine for Wind Generator</i>	
15. Vladimir Lazarov, Zahari Zarkov, Ludmil Stoyanov, Hristiyan Kanchev	143
<i>Experimental Testing of Suprecapacitors and Evaluation of their Parameters</i>	



16. Vladimir Lazarov, Zahari Zarkov, Ludmil Stoyanov, Hristiyan Kanchev	153
<i>Study on Possibilities of Compensating Wind Generator Power Fluctuations with Supercapacitors</i>	
17. Gantcho Bojilov, Antoaneta Todorova	163
<i>Thermal Durability of Electric Insulation by Negative Temperature</i>	
18. Gantcho Bojilov.	169
<i>Computer Problems in the Electrical Machines</i>	
19. Milko Iovchev, Dimitar Popov, Petyo Gadjanov, Victoria Popova.	179
<i>Zero Emission Power Plants - a Compatibility of the Postcombustion-Technologies for the Reduction of the Carbon Emissions from Thermal Power Plants with DIRECTIVE 1996/61/EC</i>	
20. Jordan Markov, Daniela Minkovska.	189
<i>Functional Requirements for Design of Communication Module in a GPS System</i>	
21. Georgi Naydenov.	197
<i>Comparative Analysis of Alternative Virtual Private Network Implementations</i>	
22. Evdokiya Dimitrova	207
<i>Investigation of Frequency Asynchronous Starting for Synchronous Turbogenerators</i>	
23. Evdokiya Dimitrova	215
<i>Optimization of Frequency Asynchronous Starting</i>	
24. Illiyana Naydenova.	221
<i>Investigation of the Influence of Different Reaction Pathways on the Detailed Kinetic Modeling of Acetylene Oxidation</i>	



Author's Index

	<i>author</i>	<i>page</i>		<i>author</i>	<i>page</i>
1	A. Terzova	105, 113	19	I. Marinova	105, 113
2	A. Todorova	163	20	I. Naydenova	221
3	B. Gilev	39	21	J. Markov	189
4	C. Gaidau	77, 85	22	K. Stoykov	57, 67
5	D. Vladeva	9, 19	23	K. Todorova	57
6	D. Andonov	47	24	L. Stoyanov	133, 143, 153
7	D. Stoilov	47	25	M. Durcheva	29
8	D. Gospodinova	77, 85, 95	26	M. Ivanov	47
9	D. Spiriov	133	27	M. Iovchev	179
10	D. Popov	179	28	P. Dineff	77, 85, 95
11	D. Minkovska	189	29	P. Gadjanov	179
12	E. Dimitrova	207, 215	30	R. Stanev	47
13	G. Bojilov	163, 169	31	R. Tzeneva	95, 123
14	G. Naydenov	197	32	S. Staykov	57
15	H. Kanchev	143, 153	33	V. Mateev	105, 113
16	I. Trendafilov	9, 19	34	V. Lazarov	133, 143, 153
17	I. Todorov	47	35	V. Popova	179
18	I. Avramova	77, 85	36	Z. Zarkov	133, 143, 153

ПОЛУПРЪСТЕНИ ОТ ЕНДОМОРФИЗМИ БЕЗ НУЛА НА КРАЙНА ВЕРИГА

Иван Трендафилов, Димитринка Владева

Резюме: Разгледани са полупръстенът от ендоморфизми без нула на крайна верига и някои негови подполупръстени. Въведени са някои специални видове ендоморфизми: след $l - r$ ендоморфизми, преди $l - r$ ендоморфизми, константни ендоморфизми и са доказани основни факти за тях. Изследвани са подполупръстени от ендоморфизми с общ неподвижен елемент.

Ключови думи: полупръстен от ендоморфизми на крайна полурешетка, полупръстен от ендоморфизми на крайна верига.

ENDOMORPHISM SEMIRINGS WITHOUT ZERO OF A FINITE CHAIN

Ivan Trendafilov, Dimitrinka Vladeva

Abstract: The endomorphism semiring without zero of a finite chain and some subsemirings of this semiring are considered. Some special types endomorphisms: after $l - r$ endomorphisms, before $l - r$ endomorphisms and constant endomorphisms are introduced and basic facts for these endomorphisms are proved. Subsemirings consisting endomorphisms with common fixed element are investigated.

Keywords: endomorphism semiring of a finite semilattice, endomorphism semiring of a finite chain.

1 Introduction

Facts concerning semilattices and specially chains can be found in [3].

An algebra $R = (R, +, \cdot)$ with two binary operations $+$ and \cdot on R , is called **semiring** if

- $(R, +)$ is a commutative semigroup,
- (R, \cdot) is semigroup,
- both distributive laws holds $x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$ and $(x + y) \cdot z = x \cdot z + y \cdot z$

for any $x, y, z \in R$.

Let $R = (R, +, \cdot)$ be a semiring.

- If a neutral element 0 of the semigroup $(R, +)$ exists and satisfies $0 \cdot x = x \cdot 0 = 0$ for all $x \in R$, then it is called **zero**.

- If a neutral element 1 of the semigroup (R, \cdot) exists, it is called **one**.

Facts concerning semirings, congruence relations in semirings and (right, left) ideals of semirings can be found in [2] and [5].

For a finite chain $\mathcal{C}_n = (\{0, 1, \dots, n-1\}, \vee)$ the endomorphisms formed a semiring with respect to the addition and multiplication defined with:

- $h = f + g$ when $h(x) = f(x) \vee g(x)$ for all $x \in \mathcal{C}_n$,
- $h = f \cdot g$ when $h(x) = f(g(x))$ for all $x \in \mathcal{C}_n$.

This semiring is called the **endomorphism semiring** and is denoted with $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}$. Note that $f(0) = 0$ for every endomorphism $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}$.

Some results for the endomorphism semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}$ and subsemirings of $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}$ can be found in the previous papers [6] and [7].

Basic combinatorial results can be found in [1].

2 The endomorphism semiring without zero of a finite chain

In Example 3.3 of [6] we consider the three element chain $\mathcal{C}_3 = (\{0, 1, 2\}, \vee)$ and its endomorphism semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_3}$. For all endomorphisms $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{C}_3}$ there is restriction $f(0) = 0$. So the endomorphism f with $f(1) = a, f(2) = b$, where $a, b \in \mathcal{C}_3$ is denoted by $\lambda ab\lambda$. In Example 3.3 of [6] we investigated the addition and multiplication tables of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_3}$.

Example 2.1 Here for the three element chain $\mathcal{C}_3 = (\{0, 1, 2\}, \vee)$ we consider the endomorphism semiring without restriction $f(0) = 0$ and denote this semiring by $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$. The elements of semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ are the following maps: $\lambda 000\lambda, \lambda 001\lambda, \lambda 002\lambda, \lambda 011\lambda, \lambda 012\lambda, \lambda 022\lambda, \lambda 111\lambda, \lambda 112\lambda, \lambda 122\lambda$ and $\lambda 222\lambda$. The addition table is:

+	$\lambda 000\lambda$	$\lambda 001\lambda$	$\lambda 002\lambda$	$\lambda 011\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 111\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 000\lambda$	$\lambda 000\lambda$	$\lambda 001\lambda$	$\lambda 002\lambda$	$\lambda 011\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 111\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 001\lambda$	$\lambda 001\lambda$	$\lambda 001\lambda$	$\lambda 002\lambda$	$\lambda 011\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 111\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 002\lambda$	$\lambda 002\lambda$	$\lambda 002\lambda$	$\lambda 002\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 011\lambda$	$\lambda 011\lambda$	$\lambda 011\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 011\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 111\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 012\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 012\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 022\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 022\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 111\lambda$	$\lambda 111\lambda$	$\lambda 111\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 111\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 111\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 112\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 112\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 122\lambda$	$\lambda 222\lambda$
$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$	$\lambda 222\lambda$

So the elements $\lambda 000\lambda$ and $\lambda 222\lambda$ are the neutral and the absorbing element of the semigroup $(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}, +)$, respectively.

The multiplication table is:

\cdot	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 012 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 001 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 002 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 011 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 012 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 012 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 022 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 111 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 112 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 122 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 222 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 222 \wr$

Note that the endomorphism $\wr 000 \wr$ is not a zero, so in the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ there is not a zero element. The endomorphism $\wr 012 \wr$ is the element one of this semiring. The semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_3}$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$.

The endomorphism $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ such that $f(0) \geq 1$ (analogously to a definition from section 4 of [6]) is called **after-0,1 endomorphism**. The subset of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ consisting of all after-1 endomorphisms is denoted by $\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})$. It follows that $\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})$ is a subsemiring without zero of the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ and $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_3} \cap \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}) = \emptyset$. Also we have that $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3} = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_3} \cup \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})$.

There is another subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ without zero. The endomorphism $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ such that $f(1) \geq 1$ is called **after-1,1 endomorphism**. The subset of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ consisting of all after-1,1 endomorphisms is denoted by $\mathcal{A}_1^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})$. It follows that $\mathcal{A}_1^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})$ is a subsemiring without zero of the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$.

Now let $\mathcal{C}_n = (\{0, 1, \dots, n-1\}, \vee)$ be a finite chain and the endomorphism semiring of this semilattice is $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$. Note that we are not assuming that $f(0) = 0$ for any $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$.

The endomorphisms admit the following description. If $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ such that $f(k) = i_k$ for any number $k \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ we denote f as an ordered n -tuple $\wr i_0, i_1, i_2, \dots, i_{n-1} \wr$ or as $\wr i_0 i_1 i_2 \dots i_{n-1} \wr$ if there is no danger of confusion.

Proposition 2.2 *For any natural n , $n \geq 2$, follows that:*

- (i) *in the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ there is not a zero element;*
- (ii) *the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$;*
- (iii) *there is a subsemiring R of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ such that $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n} \cap R = \emptyset$ and $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n} \cup R$.*

Proof. (i) Since for arbitrary $\lambda i_0 i_1 \dots i_{n-1} \lambda \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$

$$\lambda i_0 i_1 \dots i_{n-1} \lambda + \lambda 00 \dots 0 \lambda = \lambda 00 \dots 0 \lambda + \lambda i_0 i_1 \dots i_{n-1} \lambda = \lambda i_0 i_1 \dots i_{n-1} \lambda$$

follows that $\lambda 00 \dots 0 \lambda$ is the neutral element of the additive semigroup $(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}, +)$.

But $\lambda 00 \dots 0 \lambda \cdot \lambda 11 \dots 1 \lambda = \lambda 11 \dots 1 \lambda$ hence the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ has no a zero element.

(ii) Obviously the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}$ consists of the endomorphisms $\lambda 0 i_1 \dots i_{n-1} \lambda$.

(iii) The endomorphism $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ such that $f(0) \geq 1$ is called **after-0,1 endomorphism**. The subset of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ consisting of all after-0,1 endomorphisms is denoted by $\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$. For $f, g \in \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ follows

$$(f + g)(0) = f(0) \vee g(0) \geq 1 \vee 1 = 1, f(g(0)) \geq f(1) \geq f(0) \geq 1$$

so $\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$. The endomorphism $\lambda 11 \dots 1 \lambda$ is the neutral element of the additive semigroup of this semiring. But $\lambda 11 \dots 1 \lambda \cdot \lambda 22 \dots 2 \lambda = \lambda 22 \dots 2 \lambda$, thus the semiring $\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ has no a zero element. Using that $\lambda 0 i_1 \dots i_{n-1} \lambda \notin \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ it is easy to see that $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n} \cap \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) = \emptyset$. Obviously $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n} \cup \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$.

Proposition 2.3 *The order of the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ is $|\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}| = \binom{2n-1}{n}$. The order of the semiring $\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is $|\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})| = \binom{2n-2}{n}$.*

Proof. The number of all endomorphisms $\lambda i_0, i_1, \dots, i_{n-1} \lambda \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ is equal to the number of ordered n -tuples $(i_0, i_1, \dots, i_{n-1})$, where $0 \leq i_s \leq i_{s+1} \leq n-1$, $s = 0, \dots, n-2$. But this number is equal to the number of ordered $n+1$ -tuples with repetition $(i_{-1}, i_0, i_1, \dots, i_{n-1})$, where $i_{-1} = 0$. Analogously to the proof of Proposition 3.7 of [6] its number is $\binom{2n-1}{n}$.

From Proposition 3.7 of [6] and from the proof of the part (iii) of Proposition 2.2 follows that

$$|\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})| = |\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}| - |\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}| = \binom{2n-1}{n} - \binom{2n-2}{n-1} = \binom{2n-2}{n}.$$

It is easy to see that the number $\binom{2n-2}{n}$ is equal to $\binom{2n-2}{n-1} - C_n$ where C_n is the n -th Catalan number.

By a similar way of a definition from section 4 of [6] the endomorphism $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ is called **after- l, r endomorphism** if $f(l) \geq r$ for $l, r \in \mathcal{C}_n$, $l \leq r$. The sub-

set consisting of all after- l, r endomorphisms is denoted by $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$. Clearly $\mathcal{A}_0^{(0)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) = \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ and $\mathcal{A}_0^{(n-1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is the one element set $\{\wr n-1, n-1, \dots, n-1 \wr\}$.

Proposition 2.4 For any natural $n, n \geq 2$, and $l, r \in \mathcal{C}_n, l \leq r$ follows that:

- (i) the set $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ without zero;
- (ii) the semiring $\mathcal{A}_l^{(s)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ for any $r \leq s \leq n-1$;
- (iii) the semiring $\mathcal{A}_m^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ for any $0 \leq m \leq l$.

Proof. (i) Let $f, g \in \mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$. Then

$$(f + g)(l) = f(l) \vee g(l) \geq r \vee r = r \text{ and } g(f(l)) \geq g(r) \geq g(l) \geq r$$

so $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$. The least element of $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is the endomorphism $\wr \underbrace{0, \dots, 0}_{l-1}, r, \dots, r \wr$. But $\wr \underbrace{0, \dots, 0}_{l-1}, r, \dots, r \wr \cdot \wr r, \dots, r \wr = \wr r, \dots, r \wr$, so in

the semiring $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ there is no zero.

(ii) Since $f(l) \geq s \geq r$ then $\mathcal{A}_l^{(s)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) \subseteq \mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$, so the semiring $\mathcal{A}_l^{(s)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ for any s , where $r \leq s \leq n-1$.

(iii) Since $m \leq l$ then $f(l) \geq f(m) \geq r$ and $\mathcal{A}_m^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) \subseteq \mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$, so the semiring $\mathcal{A}_m^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ for any m , where $0 \leq m \leq l$.

The endomorphism $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ is called **before- l, r endomorphism** if $f(l) \leq r$ for $l, r \in \mathcal{C}_n, l \geq r$. The subset consisting of all before- l, r endomorphisms is denoted by $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$. Clearly $\mathcal{B}_0^{(0)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}$, $\mathcal{B}_{n-1}^{(n-1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) = \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ and $\mathcal{B}_{n-1}^0(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is the one element set $\{\wr 0, 0, \dots, 0 \wr\}$.

Proposition 2.5 For any natural $n, n \geq 2$, and $l, r \in \mathcal{C}_n, l \geq r$ follows that:

(i) the set $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ without zero with exception of all cases when $r = 0$;

(ii) the semiring $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\mathcal{B}_l^{(s)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ for $r \leq s \leq n-1$;

(iii) the semiring $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\mathcal{B}_m^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ for $0 \leq m \leq l$.

Proof. (i) Let $f, g \in \mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$. Then

$$(f + g)(l) = f(l) \vee g(l) \leq r \vee r = r \text{ and } g(f(l)) \leq g(r) \leq g(l) \leq r$$

so $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$. Let $l \geq 1$. The least element of $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$

is the endomorphism $\wr 0, \dots, 0 \wr$. But $\wr 1, \dots, 1 \wr \in \mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ and $\wr 0, \dots, 0 \wr \cdot \wr 1, \dots, 1 \wr = \wr 1, \dots, 1 \wr$, so in the semiring $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ there is no zero.

(ii) Since $f(l) \leq r \leq s$ then $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) \subseteq \mathcal{B}_l^{(s)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$, so the semiring $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\mathcal{B}_l^{(s)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ for any s , where $r \leq s \leq n - 1$.

(iii) Since $m \leq l$ then $f(m) \leq f(l) \leq r$ and $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) \subseteq \mathcal{B}_m^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$, so the semiring $\mathcal{B}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\mathcal{B}_m^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ for any m , where $0 \leq m \leq l$.

Let for arbitrary subsemiring R of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ define

$$\mathcal{A}_l^{(r)}(R) = \mathcal{A}_l^{(r)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) \cap R \text{ and } \mathcal{B}_k^{(s)}(R) = \mathcal{B}_k^{(s)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) \cap R,$$

where $k, l, r, s \in \mathcal{C}_n$, $l \leq r$ and $k \geq s$. When these sets are nonempty they are semirings. Thus we construct new examples of subsemirings of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$.

Example 2.6 In example 2.1 we consider the the semiring $\mathcal{A}_1^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})$. Elements of this semiring are the endomorphisms $\wr 011 \wr, \wr 012 \wr, \wr 022 \wr, \wr 111 \wr, \wr 112 \wr, \wr 122 \wr$ and $\wr 222 \wr$. The elements of the semiring $\mathcal{B}_2^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})$ are the endomorphisms $\wr 000 \wr, \wr 001 \wr, \wr 011 \wr$ and $\wr 111 \wr$. Now we construct the semiring

$$\mathcal{A}_1^{(1)}(\mathcal{B}_2^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})) = \mathcal{B}_2^{(1)}(\mathcal{A}_1^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3})) = \mathcal{A}_1^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}) \cap \mathcal{B}_2^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}).$$

The elements of this subsemiring are the endomorphisms $\wr 011 \wr$ and $\wr 111 \wr$.

Let us consider the semiring $\mathcal{B}_4^{(2)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_4})$. The elements of this semiring are the following endomorphisms: $\wr 000 \wr, \wr 001 \wr, \wr 002 \wr, \wr 011 \wr, \wr 012 \wr, \wr 022 \wr, \wr 111 \wr, \wr 112 \wr, \wr 122 \wr$ and $\wr 222 \wr$. They are the same maps like in $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_3}$ – see example 2.1. The addition tables of these two semirings coincides. But the semirings are not isomorphic because in the semiring $\mathcal{B}_4^{(2)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_4})$ there is a following multiplication table:

\cdot	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 012 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$
$\wr 001 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$
$\wr 002 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 002 \wr$
$\wr 011 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 022 \wr$
$\wr 012 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 012 \wr$	$\wr 022 \wr$
$\wr 022 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 022 \wr$
$\wr 111 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 112 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 001 \wr$	$\wr 002 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 122 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 011 \wr$	$\wr 022 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 112 \wr$	$\wr 122 \wr$	$\wr 222 \wr$
$\wr 222 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 000 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 111 \wr$	$\wr 222 \wr$	$\wr 222 \wr$

Here we observe that there is zero in this semiring, the nilpotent elements are the endomorphisms $\wr 000\wr$, $\wr 001\wr$, $\wr 002\wr$, $\wr 011\wr$ and $\wr 012\wr$, i.e. the elements of \mathcal{N}_4 and the left annihilator of the semiring is $\mathfrak{A}_l \left(\mathcal{B}_4^{(2)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_4}) \right) = \{\wr 000\wr, \wr 001\wr, \wr 002\wr\}$.

Note that each of the subsemirings $\mathcal{A}_0^{(1)} \left(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} \right)$ and $\mathcal{A}_1^{(1)} \left(\mathcal{B}_4^{(2)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_4}) \right)$ consists of the following endomorphisms: $\wr 111\wr$, $\wr 112\wr$, $\wr 122\wr$ and $\wr 222\wr$, but these two semirings are non isomorphic.

Note also that all elements of the semiring $\mathcal{B}_4^{(2)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_4})$ are indeed 4-tuples with first element zero.

3 Structure of some subsemirings of the endomorphism semiring

Following [4] the endomorphism $f_k \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ is called a *constant endomorphism* if $f_k(i) = k$ for every $i \in \{0, 1, \dots, n-1\}$, where $k \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ is a fixed number, i.e. the constant endomorphisms are $f_k = \wr k k \dots k \wr$. Let $\mathcal{CO} \left(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} \right)$ be the subset of all constant endomorphisms.

Proposition 3.1 *The set $\mathcal{CO} \left(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} \right)$ is an ideal of the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$.*

Proof. Easy follows from calculations

$$\wr k k \dots k \wr \cdot \wr i_0 i_1 \dots i_{n-1} \wr = \wr i_k i_k \dots i_k \wr \text{ and}$$

$$\wr i_0 i_1 \dots i_{n-1} \wr \cdot \wr k k \dots k \wr = \wr k k \dots k \wr,$$

where $\wr i_0 i_1 \dots i_{n-1} \wr$ is an arbitrary element of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$.

Immediately follows

Corollary 3.2 *The semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ is not ideal-simple.*

For any $k \in \mathcal{C}_n$ let

$$\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} = \{f | f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}, f(k) = k\}$$

When $k = 0$ the set $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(0)}$ coincides with the known semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}$ from [6].

The following result is straightforward:

Proposition 3.3 *For any $k \in \mathcal{C}_n$ the set $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$ is a subsemiring of the endomorphism semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$.*

For any $k \in \mathcal{C}_n$ the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$ has an element one: $\wr 0, 1, \dots, k, \dots, n-1 \wr$.

For any $k \in \mathcal{C}_n$, $k > 0$ in the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$ there is no zero because the least element $\wr \underbrace{0, \dots, 0}_{k-1}, k, \dots, k \wr$ is not a multiplicatively absorbing element for instance

$$\wr 0, \dots, 0, k, \dots, k \wr \cdot \wr k, \dots, k \wr = \wr k, \dots, k \wr \cdot \wr 0, \dots, 0, k, \dots, k \wr = \wr k, \dots, k \wr.$$

Proposition 3.4 For any $k \in \mathcal{C}_n$ the order of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$ is $|\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}| = \binom{2k}{k} \binom{2n-2k-2}{n-k-1}$.

Proof. Let us consider the arbitrary endomorphism $f = \lambda i_0, \dots, i_{k-1}, k, i_{k+1}, \dots, i_{n-1} \lambda$ of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$ and let (i_0, i_1, \dots, i_k) , where $i_k = k$ is the ordered $k+1$ -tuple corresponding to the first part of f . Instead of the any $k+1$ -tuple (i_0, \dots, i_k) we consider the corresponding $k+1$ -tuple $(k-i_k, \dots, k-i_0) = (0, \dots, k-i_0)$. These $k+1$ -tuples satisfy the conditions of Proposition 3.7 of [6], so their number is $\binom{2k}{k}$.

Let us consider the last part $(k, i_{k+1}, \dots, i_{n-1})$ of the endomorphism f . For such $n-k$ -tuple we compare the $n-k$ -tuple $(0, i_{k+1}-k, \dots, i_{n-1}-k)$. The number of the last $n-k$ -tuples from Proposition 3.7 of [6] is $\binom{2n-2k-2}{n-k-1}$. So the number of all endomorphisms f such that $f(k) = k$ is $\binom{2k}{k} \binom{2n-2k-2}{n-k-1}$.

Remark 3.5 For $k = 0$ from Proposition 3.4 follows that $|\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(0)}| = \binom{2n-2}{n-1}$ which is the result of Proposition 3.7 of [6]. For $k = n-1$ we have the same number $|\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(n-1)}| = \binom{2n-2}{n-1}$.

Proposition 3.6 For any $k \in \mathcal{C}_n$ follows that:

- $\mathcal{CO}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) \cap \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} = \{\lambda k k \dots k \lambda\}$.
- The endomorphism $\lambda k k \dots k \lambda$ is a multiplicative absorbing element of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$.

Proof. a. For $m \neq k$ the endomorphism $\lambda m m \dots m \lambda$ doesn't belong to $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$.

b. The reasonings are similar to that of the proof of Proposition 3.1.

Proposition 3.7 a. For $k = 0$ and $k = n-1$ there is a subsemiring R of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ such that $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} \cap R = \emptyset$ and $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} \cup R$.

b. For $k = \{1, 2, \dots, n-1\}$ a subsemiring R of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$ such that $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} \cap R = \emptyset$ and $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} \cup R$ doesn't exist.

Proof. a. For $k = 0$ in the proof of part (iii) of Proposition 2.2 we show that $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(0)} \cap \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) = \emptyset$ and $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(0)} \cup \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$. From Proposition 2.4 (i) follows that $\mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$.

For $k = n-1$ set of the endomorphisms f such that $f(n-1) \neq n-1$ is just the semiring $\mathcal{B}_{n-1}^{(n-2)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$ – Proposition 2.5 (i). So, $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(n-1)} \cap \mathcal{B}_{n-1}^{(n-2)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) = \emptyset$ and $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(n-1)} \cup \mathcal{B}_{n-1}^{(n-2)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n})$.

b. Let $A = \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n} \setminus \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$, where $k \in \mathcal{C}_n$, $k \neq 0$ and $k \neq n - 1$. Then follows that $\wr 0, 0, \dots, 0 \wr \in A$ and $\wr k, n - 1, \dots, n - 1 \wr \in A$. But

$$\wr 0, 0, \dots, 0 \wr \cdot \wr k, n - 1, \dots, n - 1 \wr = \wr k, k, \dots, k \wr \notin A,$$

that is A is not a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}$.

Let $k \in \mathcal{C}_n$ and $k > 0$. Endomorphism $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$ such that $f(0) = 0$ is called *initial endomorphism*, (see [6] for similar definition). The subset of $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$ consisting of all initial endomorphisms is denoted by $I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)})$. Obviously, if f is an initial endomorphism, then $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(0)}$, which implies that $I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}) = \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(0)} \cap \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$. So, follows

Proposition 3.8 For any $k \in \mathcal{C}_n$ and $k > 0$ the set $I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)})$ is a subsemiring of $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$.

Let $k \in \mathcal{C}_n$, $k > 0$, and let us denote $\mathcal{A}_0^{(1)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}) = \mathcal{A}_0^{(1)}(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{C}_n}) \cap \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$. Using the equalities $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} = I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}) \cup \mathcal{A}_0^{(1)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)})$ and $I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}) \cap \mathcal{A}_0^{(1)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}) = \emptyset$ immediately follows

Proposition 3.9 For any $k \in \mathcal{C}_n$, $k > 0$, there is a subsemiring R of $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}$ such that $I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}) \cap R = \emptyset$ and $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} = I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)}) \cup R$.

Proposition 3.10 Let $k, s \in \mathcal{C}_n$ and $k < s$. The order of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} \cap \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(s)}$ is

$$\left| \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} \cap \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(s)} \right| = \binom{2k}{k} \binom{2s - 2k - 1}{s - k} \binom{2n - 2s - 2}{n - s - 1}.$$

Proof. Let us consider the endomorphisms $f = \wr i_0, \dots, i_{n-1} \wr$ such that $i_k = k$ and $i_s = s$, where $k < s$. In Proposition 3.4 we prove that the number of the $k + 1$ -tuples (i_0, \dots, i_k) corresponding to the first part of f is $\binom{2k}{k}$ and the number of the $n - s$ -tuples (i_s, \dots, i_{n-1}) corresponding to the last part of f is $\binom{2n - 2s - 2}{n - s - 1}$. To the middle part of the endomorphisms f we compare the $s - k - 1$ -tuples $(i_{k+1}, \dots, i_{s-1})$. Analogously of the proof of Lemma 3.6 of [6] to these $s - k - 1$ positions can be distributed from 0 to $s - k$ units and this is possible in $\binom{2s - 2k - 1}{s - k}$ ways. (In Lemma 3.6 of [6] we replace n with $s - k$ and k with $s - k - 1$.) Hence the number of all endomorphisms of $\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)} \cap \mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(s)}$ is equal to $\binom{2k}{k} \binom{2s - 2k - 1}{s - k} \binom{2n - 2s - 2}{n - s - 1}$.

For $k = 0$ and $s = 1$ from the last proposition we find the formula of Proposition 4.8 of [6].

Corollary 3.11 Let $k \in \mathcal{C}_n$ and $k > 0$. The order of the semiring $I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)})$ is $|I(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)})| = \frac{1}{2} \binom{2k}{k} \binom{2n-2k-2}{n-k-1}$. The order of the semiring $\mathcal{A}_0^{(1)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)})$ is $|\mathcal{A}_0^{(1)}(\mathcal{E}_{\mathcal{C}_n}^{(k)})| = \frac{1}{2} \binom{2k}{k} \binom{2n-2k-2}{n-k-1}$.

Proof. Follows from the last proposition for $k = 0$ and $s = k$.

4 Conclusion

In the paper we consider the endomorphism semiring without zero of a finite chain. We investigate subsemirings of this semiring and some relations between these semirings.

References

- [1] Camina A., Lewis B. (2011), *An introduction to enumeration*, Springer, 2011.
- [2] Golan J. (1999), *Semirings and Their Applications*, Kluwer, Dordrecht, 1999.
- [3] Grätzer G. (2011), *Lattice Theory: Foundation*, Birkhäuser Springer Basel AG, 2011.
- [4] Ježek J., Kepka T., Maròti M. (2009), *The endomorphism semiring of a semilattice*, Semigroup Forum, 78 (2009), 21 – 26.
- [5] Monico C. (2004), *On finite congruence-simple semirings*, J. Algebra 271 (2004) 846 – 854.
- [6] Trendafilov I., Vladeva D. (2011), *The endomorphism semiring of a finite chain*, Proc. Techn. Univ.-Sofia, 61 (2011).
- [7] Trendafilov I., Vladeva D. (2011), *Subsemirings of the endomorphism semiring of a finite chain*, Proc. Techn. Univ.-Sofia, 61 (2011).

Authors: Ivan Trendafilov, assoc. prof., Department "Algebra and geometry", FAMI, TU–Sofia, *e-mail:* ivan_d_trendafilov@abv.bg

Dimitrinka Vladeva, assoc. prof., Department "Mathematics and physics", LTU, Sofia, *e-mail:* d_vladeva@abv.bg

ПОЛУПРЪСТЕНИ ОТ ЕНДОМОРФИЗМИ БЕЗ НУЛА НА КРАЙНА ПОЛУРЕШЕТКА ОТ СПЕЦИАЛЕН ВИД

Иван Трендафилов, Димитринка Владева

Резюме: Изследваме полупръстена от ендоморфизми без нула на крайна полурешетка с един най-голям елемент, в която всички други елементи са ненаредени. Разгледани са някои свойства на полупръстена от неконстантните ендоморфизми и на идеалите на този полупръстен. Също изследваме комутативен подполупръстен на полупръстена от ендоморфизмите и някои идеали на този полупръстен.

Ключови думи: полупръстен от ендоморфизми на крайна полурешетка, комутативни полупръстени, идемпотентни ендоморфизми.

ENDOMORPHISM SEMIRINGS WITHOUT ZERO OF A FINITE SEMILATTICE OF A SPECIAL TYPE

Ivan Trendafilov, Dimitrinka Vladeva

Abstract: We study the endomorphism semiring without zero of a finite semilattice with one highest element, where all other elements are unordered. Some properties of the subsemiring of nonconstant endomorphisms and of ideals of this semiring are considered. We also study commutative subsemiring of the endomorphism semiring and some ideals of these semiring.

Keywords: endomorphism semiring of a finite semilattice, commutative semirings, idempotent endomorphisms.

1 Introduction and preliminaries

Let \mathcal{M} be a *semilattice* (join-semilattice) i.e. an algebra with binary operation \vee such that

- $a \vee (b \vee c) = (a \vee b) \vee c$ for any $a, b, c \in \mathcal{M}$;
- $a \vee b = b \vee a$ for any $a, b \in \mathcal{M}$;
- $a \vee a = a$ for any $a \in \mathcal{M}$.

Another term used for arbitrary semilattice is a *commutative idempotent semigroup* – see [11]. For any $a, b \in \mathcal{M}$ we denote $a \leq b \iff a \vee b = b$. In this notations, if there is a neutral element in the semilattice \mathcal{M} , it is the least element.

Facts concerning semilattices can be found in [4].

An algebra $R = (R, +, \cdot)$ with two binary operations $+$ and \cdot on R , is called **semiring** if

- $(R, +)$ is a commutative semigroup,
- (R, \cdot) is semigroup,
- both distributive laws hold $x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$ and $(x + y) \cdot z = x \cdot z + y \cdot z$

for any $x, y, z \in R$.

Facts concerning semirings can be found in [3] and [7].

Let $R = (R, +, \cdot)$ be a semiring.

- If a neutral element 0 of the semigroup $(R, +)$ exists and satisfies $0 \cdot x = x \cdot 0 = 0$ for all $x \in R$, then it is called **zero**.

- If a neutral element 1 of the semigroup (R, \cdot) exists, it is called **one**.

For a semilattice \mathcal{M} the set $\mathcal{E}_{\mathcal{M}}$ of the endomorphisms of \mathcal{M} is a semiring with respect to the addition and multiplication defined with:

- $h = f + g$ when $h(x) = f(x) \vee g(x)$ for all $x \in \mathcal{M}$,
- $h = f \cdot g$ when $h(x) = f(g(x))$ for all $x \in \mathcal{M}$.

This semiring is called the **endomorphism semiring** of \mathcal{M} .

An element a of a semiring R is called **additively (multiplicatively) idempotent** if $a + a = a$ ($a \cdot a = a$). A semiring R is called **additively idempotent** if each of its elements is additively idempotent.

An element a of a semiring R is called **additively (multiplicatively) absorbing element** if and only if $a + x = a$ ($a \cdot x = x \cdot a = a$) for any $x \in R$. The zero of R is the unique multiplicative absorbing element; of course it does not need to exist. Following [7] an element of a semiring R is called an **infinity** if it is both additively and multiplicatively absorbing. Such element we denote by ∞ .

An element x of semiring R is called **multiplicatively subidempotent** if and only if $x^2 + x = x$, and a semiring R is **multiplicatively subidempotent semiring** if and only if its elements are multiplicatively subidempotent. Additively idempotent and multiplicatively subidempotent semirings are called **Viterbi semirings** and they play important roles in modal logic, see [1].

2 The endomorphism semiring without zero of a finite semilattice of a special type

In [10] we obtain some results for the endomorphism semiring without zero of a finite chain. The another elementary case is related to the endomorphism semiring of a join-semilattice with one highest element, where all other elements are unordered, i.e. they are formed an antichain. So the considered semilattice of a special type is a semilattice with down-set which is a maximum sized antichain, see [4].

Let \mathcal{A}_n is a semilattice with unique highest element m which diagram is in

Figure 1. Now we have $a_i \vee a_i = a_i$, $a_i \vee a_j = m$, where $i \neq j$, $a_i \vee m = m$ and $m \vee m = m$ for every $i, j = 1, \dots, n - 1$. Let the endomorphism semiring of this lattice is $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$. Here we use the notations like those from [9] and [10], so, every $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ we denote by n -tuple $\langle b_1 b_2 \dots b_n \rangle$. The semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ is an additively idempotent semiring with element one $\langle a_1 \dots a_{n-1} m \rangle$ and (additively) absorbing element $\langle \underbrace{m m \dots m}_n \rangle$.

The following definition from [5] is important for considered semiring. The maps f_k defined by $f_k(x) = k$ for all $x \in \mathcal{M}$, where \mathcal{M} is arbitrary semilattice and $k \in \mathcal{M}$, are called **constant endomorphisms**. So the constant endomorphisms of the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ can be represented as $\langle a_i a_i \dots a_i \rangle$, where $i = 1, \dots, n - 1$ and $\langle m m \dots m \rangle$.

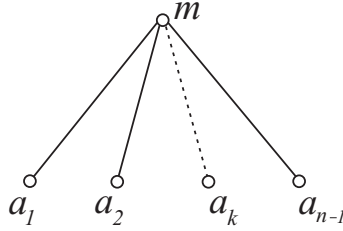


Figure 1.

Proposition 2.1 Let $f \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$.

- The map f is isotone;
- If f is not a constant endomorphism then m is a fixed element of the endomorphism f , i.e. $f(m) = m$.
- If f is not a constant endomorphism then it is an injective map over the set $\{a_i | i = 1, \dots, n - 1\}$.

Proof. a. See p.30 in [3].

b. If suppose $f(m) = a_i$, then $a_i = f(m) = f(a_j \vee m) = f(a_j) \vee a_i \neq a_i$, because f is not constant, a contradiction.

c. If suppose $f(a_i) = f(a_j) = a_k$, where $i \neq j$, then $m = f(m) = f(a_i \vee a_j) = f(a_i) \vee f(a_j) = a_k$, a contradiction.

Proposition 2.2 The set of all constant endomorphisms of the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ is an ideal of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$.

Proof. Let $f_a = \langle a \dots a \rangle$ and $f_b = \langle b \dots b \rangle$ for arbitrary elements $a, b \in \mathcal{A}_n$. It is easy to see that $f_a + f_b = f_{a \vee b}$. For constant endomorphism $f_a = \langle a \dots a \rangle$ and arbitrary endomorphism $f = \langle b_1 \dots b_n \rangle \in \widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ it follows that $f_a \cdot f = f_{b_k}$, where $f(a) = b_k$, and $f \cdot f_a = f_a$.

Example 2.3 Let $\mathcal{A}_3 = (\{a, b, m\}, \vee)$ be a join-semilattice with three elements

described by the following join-table:

\vee	a	b	m
a	a	m	m
b	m	b	m
m	m	m	m

and $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_3}$ is its endomorphism

semiring. From Proposition 2.1 the elements of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_3}$ are: $\lambda a a a \lambda$, $\lambda b b b \lambda$, the identity $\lambda a b m \lambda$, $\lambda b a m \lambda$, $\lambda a m m \lambda$, $\lambda b m m \lambda$, $\lambda m a m \lambda$, $\lambda m b m \lambda$ and the absorbing element $\lambda m m m \lambda$.

We have the following addition table:

$+$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda a b m \lambda$	$\lambda b a m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda a a a \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda b b b \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda a b m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda a b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda b a m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda b a m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda a m m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$

So in the semigroup $(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_3}, +)$ there is no neutral element and the endomorphism $\lambda m m m \lambda$ is the absorbing element. The multiplication table is:

\cdot	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda a b m \lambda$	$\lambda b a m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda a a a \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda b b b \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda a b m \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda a b m \lambda$	$\lambda b a m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda b a m \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda b a m \lambda$	$\lambda a b m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda a m m \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda b m m \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda a m m \lambda$	$\lambda b m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda m a m \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda m b m \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m a m \lambda$	$\lambda m b m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$
$\lambda m m m \lambda$	$\lambda a a a \lambda$	$\lambda b b b \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$	$\lambda m m m \lambda$

The noncommutative semigroup $(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_3}, \cdot)$ has a neutral element $\lambda a b m \lambda$. Note that the subset $(\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_3}, \cdot) \setminus \{\lambda a a a \lambda, \lambda b b b \lambda\}$ is a noncommutative semigroup with absorbing element $\lambda m m m \lambda$.

In the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_3}$ the element $\lambda a b m \lambda$ is identity and $\lambda m m m \lambda$ is an additively absorbing element. The set $\{\lambda a a a \lambda, \lambda b b b \lambda, \lambda m m m \lambda\}$ is an ideal of semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_3}$.

Since in the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ there are elements which are roots of the additively absorbing element $\lambda m m \dots m \lambda$, namely

$$\lambda m a_1 m \dots m \lambda^2 = \lambda m m \dots m \lambda$$

it follows that $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ is not a Viterbi semiring.

Let $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ be the subset of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ consisting of all nonconstant endomorphisms and the additively absorbing element $\wr m m \dots m \wr$.

Proposition 2.4 *The set $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ is a subsemiring of $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ with element $\infty = \wr m m \dots m \wr$.*

Proof. Follows immediately from Proposition 2.1 - b and from equalities $f \cdot \infty = \infty \cdot f = \infty$ for arbitrary $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$.

Proposition 2.5 *The order of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ is $|\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}| = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k}^2 k!$.*

Proof. Let $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$. Suppose that k elements a_{i_s} , where $s = 1, \dots, k$, of the set $\{a_1, \dots, a_{n-1}\}$ has images $f(a_{i_s})$ different from m . We may choose them by $\binom{n-1}{k}$ ways. We put them on k places by $\binom{n-1}{k} k!$ ways. So the number of

endomorphisms with just k values different from m is equal to $\binom{n-1}{k}^2 k!$. Finally

the number of all endomorphisms of $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ is $|\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}| = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k}^2 k!$.

Immediately follows

Corollary 2.6 *The order of the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ is $|\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}| = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k}^2 k! + n - 1$.*

Consider for any $i, j = 1, \dots, n-1$ the endomorphisms $f_{ij} \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ defined by

$$f_{ij}(a_k) = \begin{cases} a_j, & \text{if } i = k \\ m, & \text{if } i \neq k \end{cases}.$$

These maps are called **almost absorbing endomorphisms** and the subset of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ consisting of all almost absorbing endomorphisms and the absorbing element $\infty = \wr m, \dots, m \wr$ is denoted by $\mathcal{AA}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

Proposition 2.7 *The set $\mathcal{AA}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ is an ideal of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$.*

Proof. Let $f_{ij}, f_{kj}, f_{il} \in \mathcal{AA}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ where $k \neq i$ and $l \neq j$. It is easy to see that

$$f_{ij} + f_{ij} = f_{ij}, \quad f_{ij} + f_{kj} = \infty, \quad f_{ij} + f_{il} = \infty, \quad f_{ij} + \infty = \infty.$$

For arbitrary $f = \wr a_{k_1}, \dots, a_{k_{n-1}}, m \wr \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$, where some of elements a_{k_i} may be equal to m , follows

$$(f_{ij} \cdot f)(a_i) = f(f_{ij}(a_i)) = f(a_j) = a_{k_j}, \quad \text{and}$$

$$(f_{ij} \cdot f)(a_k) = f(f_{ij}(a_k)) = f(m) = m, \quad \text{where } k \neq i.$$

So, either $f_{ij} \cdot f = f_{ik_j}$, when $a_{k_j} \neq m$, or $f_{ij} \cdot f = \infty$, when $a_{k_j} = m$.

Finally we observe

$$(f \cdot f_{ij})(a_i) = f_{ij}(f(a_i)) = f_{ij}(a_{k_i}) = \begin{cases} a_j, & \text{if } i = k_i \\ m, & \text{if } i \neq k_i \end{cases} \quad \text{and}$$

$$(f \cdot f_{ij})(a_l) = f_{ij}(f(a_l)) = f_{ij}(a_{k_l}) = \begin{cases} a_j, & \text{if } i = k_l \\ m, & \text{if } i \neq k_l \end{cases}, \quad \text{where } l \neq i.$$

Since f is injection from Proposition 2.1 - c. follows that no more than one of the images $f(a_i)$, $i = 1, \dots, n-1$, is equal to a_i . Hence, if one of the numbers k_i is equal to i then $f \cdot f_{ij} = f_{ij}$, or otherwise, $f \cdot f_{ij} = \infty$.

Using that every endomorphism $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ is an injection of the set $\{a_1, \dots, a_{n-1}\}$ it follows that endomorphisms of the type $\langle a_{k_1}, a_{k_2}, \dots, a_{k_{n-1}}, m \rangle$ where $k_s \in \{1, \dots, n-1\}$ for all $s = 1, \dots, n-1$ are permutations of the set of elements of \mathcal{A}_n with fixed point m . The set of these permutations is a subgroup of semigroup $(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}, \cdot)$ isomorphic to the symmetric group of order $n-1$. We denote this group by $\mathcal{P}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

Let $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ and $f \notin \mathcal{P}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$. Thus there are elements $a_i \in \mathcal{A}_n$ such that $f(a_i) = a_{k_i} = m$. The set of the considered endomorphisms is denoted by $\mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

It is clear that for $f, g \in \mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ follows $f + g \in \mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ and $f \cdot g \in \mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

Let $f \in \mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ where $f(a_i) = m$ and $\varphi \in \mathcal{P}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$. Then there is $j = 1, \dots, m$ such that $\varphi(a_j) = a_i$. It follows

$$(\varphi \cdot f)(a_j) = f(\varphi(a_j)) = f(a_i) = m \quad \text{and}$$

$$(f \cdot \varphi)(a_i) = \varphi(f(a_i)) = \varphi(m) = m.$$

So, $\varphi \cdot f, f \cdot \varphi \in \mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

Hence $\mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ is an ideal of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$.

Let I be an ideal of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ and $I \supset \mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$. Then there is $\varphi \in \mathcal{P}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ such that $\varphi \in I$. But φ is a permutation, then there is a natural number k such that $\varphi^k = i$, where i is the identity. Hence $I = \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$. Thus we prove

Proposition 2.8 *The set $\mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ is a maximal ideal of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$.*

From the last proposition and Proposition 2.5 follows

Corollary 2.9 $|\mathcal{MAX}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})| = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n-1}{k}^2 k! - (n-1)!$

3 Commutative subsemirings of the endomorphism semiring

Commutative semirings are studied in [2] and [6] but in these papers there is not information for commutative endomorphism semirings.

Theorem 3.1 *The center of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ has the only two elements – the identity and the element ∞ .*

Proof. Let $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ and $f \cdot g = g \cdot f$ for every $g \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$.

Suppose that for some $i = 1, \dots, n-1$ follows $f(a_i) = a_j$, where $j \neq i$, and $f(a_j) \neq a_i$. Let us choose $g \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ such that changes the elements a_i and a_j , i.e. $g(a_i) = a_j$ and $g(a_j) = a_i$. Then

$$(f \cdot g)(a_i) = g(f(a_i)) = g(a_j) = a_i \text{ and}$$

$$(g \cdot f)(a_i) = f(g(a_i)) = f(a_j) \neq a_i.$$

So, $f \cdot g \neq g \cdot f$.

Suppose that for some $i, j \in \{1, \dots, n-1\}$ follows that f changes the elements a_i and a_j , i.e. $f(a_i) = a_j$ and $f(a_j) = a_i$. Let us choose $g \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ such that $g(a_i) = a_j$ and $g(a_j) = a_k \neq a_i$. Then

$$(f \cdot g)(a_i) = g(f(a_i)) = g(a_j) = a_k \text{ and}$$

$$(g \cdot f)(a_i) = f(g(a_i)) = f(a_j) = a_i \neq a_k.$$

So, $f \cdot g \neq g \cdot f$.

Suppose that for some $i = 1, \dots, n-1$ it follows $f(a_i) = m$. Additionally suppose that there is $j = 1, \dots, n-1$ such that $f(a_j) = a_j$. Let us choose $g \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ and $g(a_i) = a_j$. Then

$$(f \cdot g)(a_i) = g(f(a_i)) = g(m) = m \text{ and}$$

$$(g \cdot f)(a_i) = f(g(a_i)) = f(a_j) = a_j.$$

Again $f \cdot g \neq g \cdot f$.

Hence there are two possibilities: the first one is when $f(a_i) = a_i$ for every $i = 1, \dots, n-1$, then from $f(m) = m$ follows that $f = i$ is identity and the second when $f(a_i) = m$ for some i , then $f(a_i) = m$ for every $i = 1, \dots, n-1$ that is f is the element ∞ of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$.

Corollary 3.2 *In the center of the semiring $\widehat{\mathcal{E}}_{\mathcal{A}_n}$ there is only one element – the identity.*

Proof. For arbitrary $a_i, a_j \in \mathcal{A}_n$ follows

$$\lambda a_i a_i \dots a_i \lambda \cdot \lambda a_j a_j \dots a_j \lambda = \lambda a_j a_j \dots a_j \lambda,$$

$$\lambda a_j a_j \dots a_j \lambda \cdot \lambda a_i a_i \dots a_i \lambda = \lambda a_i a_i \dots a_i \lambda,$$

$$\lambda a_i a_i \dots a_i \lambda \cdot \lambda m m \dots m \lambda = \lambda m m \dots m \lambda,$$

$$\lambda m m \dots m \lambda \cdot \lambda a_j a_j \dots a_j \lambda = \lambda a_j a_j \dots a_j \lambda.$$

Let us consider the endomorphisms $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ such that for any $i = 1, \dots, n - 1$ either $f(a_i) = a_i$, or $f(a_i) = m$. Then follows that either $f^2(a_i) = f(a_i) = a_i$, or $f^2(a_i) = f(m) = m$, i.e. $f^2 = f$.

Conversely, let $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ be an idempotent endomorphism. If suppose that $f(a_i) = a_j$, then $f^2(a_i) = f(a_j)$. But $f^2 = f$, hence $f^2(a_i) = f(a_i)$. Thus we have $f(a_j) = f^2(a_i) = f(a_i) = a_j$. Since f is an injection in the set $\{a_1, \dots, a_{n-1}\}$ it means that $a_j = a_i$ or $a_j = m$.

So, the set of endomorphisms f such that for any $i = 1, \dots, n - 1$ either $f(a_i) = a_i$, or $f(a_i) = m$ is the set of all idempotent endomorphisms in the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$. We denote this set by $\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

For every element a of a finite (multiplicative) semigroup there is a positive integer $n = n(a)$ such that a^n is multiplicatively idempotent, see [8]. So, the following is true

Proposition 3.3 *For every $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ there exists the natural number n such that for any $i = 1, \dots, n - 1$ either $f^n(a_i) = a_i$, or $f^n(a_i) = m$.*

Theorem 3.4 *For every $n \geq 2$ the set $\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ is a commutative subsemiring of the semiring $\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$. The order of this semiring is $|\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})| = 2^{n-1}$.*

Proof. Let $f, g \in \mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$. Let for some $i = 1, \dots, n - 1$ follows $f(a_i) = a_i$ and $g(a_i) = a_i$. Then $(f + g)(a_i) = f(a_i) \vee g(a_i) = a_i \vee a_i = a_i$.

Let for some $i = 1, \dots, n - 1$ we have $f(a_i) = a_i$ but $g(a_i) = m$. Then

$$(f + g)(a_i) = f(a_i) \vee g(a_i) = a_i \vee m = m.$$

The last case is when $f(a_i) = m$ and $g(a_i) = m$ for some $i = 1, \dots, n - 1$. Now

$$(f + g)(a_i) = f(a_i) \vee g(a_i) = m \vee m = m.$$

Hence $f + g \in \mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$. If $f(a_i) = g(a_i) = a_i$ for some $i = 1, \dots, n - 1$ then

$$(f \cdot g)(a_i) = g(f(a_i)) = g(a_i) = a_i.$$

If $f(a_i) = a_i$ and $g(a_i) = m$ for some $i = 1, \dots, n - 1$ it follows that

$$(f \cdot g)(a_i) = g(f(a_i)) = g(a_i) = m.$$

When $f(a_i) = m$ and $g(a_i) = m$ for some $i = 1, \dots, n - 1$ it follows that

$$(f \cdot g)(a_i) = g(f(a_i)) = g(m) = m.$$

Hence $f \cdot g = f + g = g + f = g \cdot f \in \mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

Arbitrary endomorphism $f \in \mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}$ is ordered $n -$ tuple $\lambda a_{k_1}, \dots, a_{k_{n-1}}, m \lambda$. The element m is an image of all a_i , $i = 1, \dots, n - 1$, by one way and so we construct the endomorphism $\infty = \lambda m, \dots, m \lambda$. The element m is an image of k elements

$(k = 1, \dots, n)$ from the all a_i by $\binom{n-1}{k-1}$ ways. So the number of all possibilities is

$$\sum_{k=1}^n \binom{n-1}{k-1} = \binom{n-1}{0} + \binom{n-1}{1} + \dots + \binom{n-1}{n-1} = 2^{n-1}$$

and this completes the proof.

From the proof of the last theorem immediately follows

Corollary 3.5 *In the semiring $\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ the addition and the multiplication tables coincides and the identity i is both an additively neutral and a multiplicatively neutral element.*

Using that all elements of $\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ are both additively and multiplicatively idempotent follows

Corollary 3.6 *The semiring $\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ is a Viterbi semiring.*

Let us consider for any $i = 1, \dots, n-1$ the endomorphisms $f_i \in \mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ defined by

$$f_i(a_k) = \begin{cases} a_i, & \text{if } i = k \\ m, & \text{if } i \neq k \end{cases}.$$

But these maps are almost absorbing endomorphisms. They are idempotents and $f_i \cdot f_j = f_j \cdot f_i = \infty$. The set of these endomorphisms is denoted by $\mathcal{AA}(\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}))$. Immediately from Proposition 2.5 follows

Corollary 3.7 *For every $n \geq 2$ the set $\mathcal{AA}(\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}))$ is an ideal of the semiring $\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.*

Let the endomorphism $f \in \mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ has no more than k fixed elements from the set $\{a_1, \dots, a_{n-1}\}$, where $k < n-1$, and transforms all other elements in m . We denote the subset of $\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ of these endomorphisms by $\mathcal{ID}_k(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$. So, $\mathcal{ID}_1(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}) = \mathcal{AA}(\mathcal{NI}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}))$.

Let $f, g \in \mathcal{ID}_k(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$, the fixed points of f are a_{i_1}, \dots, a_{i_s} , where $s \leq k$, and the fixed points of g are a_{j_1}, \dots, a_{j_r} , where $r \leq k$. If

$$\{a_{k_1}, \dots, a_{k_m}\} = \{a_{i_1}, \dots, a_{i_s}\} \cap \{a_{j_1}, \dots, a_{j_r}\}$$

then the fixed points of $f + g = f \cdot g$ are a_{k_1}, \dots, a_{k_m} and $m \leq k$. So, $f + g = f \cdot g \in \mathcal{ID}_k(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

Let $\varphi \in \mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$. Then the fixed elements of the endomorphism $f + \varphi = f \cdot \varphi = \varphi \cdot f$ are part of the fixed elements a_{i_1}, \dots, a_{i_s} of the endomorphism f . So $f \cdot \varphi = \varphi \cdot f \in \mathcal{ID}_k(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$.

Let us denote $\mathcal{ID}_0 = \{\infty\}$, $\mathcal{ID}_1 = \mathcal{ID}_1(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$, \dots , $\mathcal{ID}_{n-2} = \mathcal{ID}_{n-2}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$, $\mathcal{ID}_{n-1} = \mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$. Thus we prove

Proposition 3.8 For any $n \geq 2$ in the semiring of idempotent elements $\mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n})$ there is a chain of ideals $\mathcal{ID}_0 \subset \mathcal{ID}_1 \subset \dots \subset \mathcal{ID}_{n-2} \subset \mathcal{ID}_{n-1}$.

Note that $\mathcal{ID}_{n-2} = \mathcal{ID}(\mathcal{E}_{\mathcal{A}_n}) \setminus \{i\}$ is a maximal ideal of this semiring.

4 Conclusion

In the present paper the endomorphism semiring of a finite semilattice of a special type is investigated. The main results are Theorem 3.1 which gives the structure of the center of the semiring of nonconstant endomorphisms and Theorem 3.4 where we prove that idempotent elements formed a commutative subsemiring of the endomorphism semiring.

References

- [1] Anderson A., Belnap N. (1975), *Entailment, the Logic of Relevance and Necessity*, vol. I, Princeton Univ. Press, Princeton, 1975.
- [2] El Bashir R., Hurt J., Jančařík A., Kepka T. (2001), *Simple commutative semirings*, J. Algebra 236 (2001), 277 – 306.
- [3] Golan J. (1999), *Semirings and Their Applications*, Kluwer, Dordrecht, 1999.
- [4] Gratzer G. (2011), *Lattice Theory: Foundation*, Birkhäuser Springer Basel AG, 2011.
- [5] Ježek J., Kepka T., Maròti M. (2009), *The endomorphism semiring of a semilattice*, Semigroup Forum, 78 (2009), 21 – 26.
- [6] Kala V., Kepka T. (2008), *A note on finitely generated ideal-simple commutative semirings*, Comment.Math.Univ.Carolin., 49, 1 (2008), 1 – 9.
- [7] Monico C. (2004), *On finite congruence-simple semirings*, J. Algebra 271 (2004) 846 – 854.
- [8] Moore E. H. (1902), *A definition of abstract groups*, Trans. Amer. Math. Soc, 3 (1902), 485 – 492.
- [9] Trendafilov I., Vladeva D. (2011), *The endomorphism semiring of a finite chain*, Proc. Techn. Univ.-Sofia, 61 (2011).
- [10] Trendafilov I., Vladeva D. (2011), *Endomorphism semirings without zero of a finite chain*, Proc. Techn. Univ.-Sofia, 61 (2011).
- [11] Zumbrägel J. (2008), *Classification of finite congruence-simple semirings with zero*, J. Algebra Appl. 7 (2008) 363 – 377.

Authors: Ivan Trendafilov, assoc. prof., Department "Algebra and geometry", FAMI, TU-Sofia, *e-mail:* ivan_d_trendafilov@abv.bg

Dimitrinka Vladeva, assoc. prof., Department "Mathematics and physics", LTU, Sofia, *e-mail:* d_vladeva@abv.bg

Постъпила на 05.12.2011

Рецензент доц. д-р Георги Бижев

КРИПТОСИСТЕМА С ОТКРИТ КЛЮЧ, ОСНОВАНА НА ПОЛУПРЪСТЕНИ ОТ ЕНДОМОРФИЗМИ НА КРАЙНА ПОЛУРЕШЕТКА ОТ СПЕЦИАЛЕН ВИД

Мариана Дурчева

Резюме: В тази статия показваме как полупръстените от ендоморфизми на крайна полурешетка могат да бъдат използвани като платформа на криптосистема, основана на действия на полугрупа. Показана е и конкретна полугрупова операция, построена с помощта на полупръстените от ендоморфизми.

Ключови думи: криптосистема с открит ключ, протокол на Diffie-Hellman, действие на полугрупа, полупръстен от ендоморфизмите на крайна полурешетка.

PUBLIC KEY CRYPTOSYSTEM BASED ON ENDOMORPHISM SEMIRINGS OF A FINITE SEMILATTICE OF A SPECIAL TYPE

Mariana Durcheva

Abstract: In this paper we illustrate how endomorphism semirings of a finite semilattice can be used as a platform of a cryptosystem, based on semigroup actions. A concrete practical semigroup action built from endomorphism semirings is presented.

Keywords: public key cryptosystem, Diffie-Hellman protocol, semigroup actions, endomorphism semiring of a finite semilattice.

1. INTRODUCTION

Cryptographic protocols are small programs designed to ensure secure communications via a public channel. The Discrete Logarithm Problem (DLP) is on the base of many cryptographic protocols.

Let G be a cyclic group and g a generator of G . Given an element h of G the *Discrete Logarithm Problem* is the problem of finding an integer t such that $g^t = h$ (see [10]).

Cryptographic protocols based on DLP are Diffie-Hellman key exchange [3], El-Gamal cryptosystem [4], Digital Signature Algorithm (DSA), El-Gamal Digital Signature scheme [4].

Diffie-Hellman Key Exchange Protocol [3] based on exponentiation in cyclic group allows two users Alice and Bob who wish to communicate over insecure (public) channel to create a common key. In it a cyclic group G and a generator g of G where both g and its order d are chosen and made public.

Alice chooses an integer a (between 2 and $d - 1$) and transmits g^a to Bob. Bob chooses an integer b (between 2 and $d - 1$) and transmits g^b to Alice. Then Alice computes $k_a = (g^b)^a$, while Bob computes $k_b = (g^a)^b$. The shared common key is thus $k = k_a = k_b \in G$.

The *Diffie-Hellman Problem (DHP)* is the problem of computing the value g^{ab} knowing $g \in G$ and having observed both g^a and g^b .

Clearly, if DLP is easy then so is DHP and thus the Diffie-Hellman key exchange protocol. So, as a minimum requirement, we are interested in finding difficult instances of DLP. A lot of efforts were undertaken to find groups where the DLP will be difficult to compute.

In the literature many groups have been proposed for computing the discrete logarithms. In practice have been implemented the multiplicative group $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ of integers modulo n , the multiplicative group F^* of nonzero elements inside a finite field F and subgroups of these groups (see [8]), the group of points on an elliptic curve or Jacobians of hyperelliptic curves (see [5]). Ko et al. proposed protocol analogue to the Diffie-Hellman key exchange using non abelian group (see [7]). We suggest [2] as a guide to cryptography based on group theory.

In recent time the discrete logarithm problem over a group is seen as a special instance of an action by a semigroup (see [1], [9], [11]).

In this paper we show how endomorphism semirings can be used to build interesting abelian semigroup actions. A concrete practical semigroup action built from endomorphism semirings of a finite semilattice of a special type is presented.

2. PRELIMINARIES

2.1 Basic definitions

Let G be an abelian semigroup (a set with an associative and commutative multiplication " \cdot ") i.e. a monoid and S be a finite set. A *left action* of G on S is a map $\varphi : G \times S \longrightarrow S$, satisfying $\varphi(g \cdot h, s) = \varphi(g, \varphi(h, s))$. We will denote $\varphi(g, s)$ by gs . *Right actions* are similarly defined.

2.2 Extended Diffie-Hellman Key Exchange Protocol in (G, S, φ) :

1. Alice and Bob publicly agree on some element $s \in S$.

2. Alice chooses $a \in G$ and transmits as to Bob.
3. Bob chooses $b \in G$ and transmits bs to Alice.
4. Alice computes $k_a = a(bs)$ while Bob computes $k_b = b(as)$.

The shared common key is thus $k = k_a = a(bs) = (a \cdot b)s = (b \cdot a)s = b(as) = k_b$. It is obvious that one can build a cryptosystem based on semigroup action if it is a hard problem.

2.3 Semigroup Action Problem (SAP)

Given a semigroup G acting on a finite set S and elements $x \in S$ and $y \in Gx$, find $g \in G$ such that $y = gx$.

The Diffie-Hellman key exchange is a special case of the Extended Diffie-Hellman key exchange when (G, \cdot) be a semigroup of integers (Z, \cdot) , S be a cyclic group $H = \langle s \rangle$ where the discrete logarithm is believed to be difficult. The action is $\varphi : Z \times H \rightarrow H$, where $\varphi(n, s) = s^n$.

The identity $s^{ab} = (s^a)^b$ says that φ is a commutative G -action.

The security of Protocol 2.2 is equivalent to solve SAP.

In 2010 was constructed new public key cryptosystem (see [12]) which is developed in [13]:

2.4 Extended Diffie-Hellman Key Exchange Protocol in (G, S, φ, ψ)

Let G be a monoid, S be a finite set and A and B be submonoids of G . Let $\varphi : A \times S \rightarrow S$ be an action of A on S and $\psi : B \times S \rightarrow S$ be an action of B on S and

$$\varphi(a, \psi(b, s)) = \psi(b, \varphi(a, s))$$

for any elements $a \in A, b \in B$ and $s \in S$.

1. Alice and Bob publicly agree on some element $s \in S$.
2. Alice chooses submonoid A of G and an element $a \in A$. Then she transmits as to Bob (her private key is (A, a) and her public key is as).
3. Bob chooses submonoid B of G and an element $b \in B$. Then he transmits bs to Alice (his private key is (B, b) and his public key is bs).
4. Alice computes $k_A = \varphi(a, \psi(b, s))$ while Bob computes $k_b = \psi(b, \varphi(a, s))$.

The shared common key is thus

$$k = k_A = \varphi(a, \psi(b, s)) = \psi(b, \varphi(a, s)) = k_b.$$

When $A = B = G$ and $\varphi = \psi$ we reach the Protocol 2.2.

The given key exchange protocol is related to the following hard problem:

2.5 Bi-Semigroup Action Problem (BSAP)

Given a monoid G and an element $s \in S$, find submonoids A and B of G acting on a finite set S by maps φ and ψ , respectively, and $b \in A$ and $y \in B$ such that $\varphi(x, s) = \psi(y, s)$.

The security of Protocol 2.4 is equivalent to solve *BSAP*.

2.6 Attacks

The Brute force attack on the SAP

If an attacker Eve intercepts as and bs through a public channel, she may want to compute gs for all possible $g \in G$ until she finds some e with $es = as$. She is then able to break the system. To avoid this attack, Bob and Alice must choose G and S sufficiently large and select a proper element s . If $G_{Eve} = \{e \in G \mid es = as\}$ then the different parameters G, S, s must be chosen such that the size of G_{Eve} is small with respect to the size of G .

Using the submonoids A and B of the monoid G in *BSAP* makes Eve's mission much more difficult, so we think that the Brute force attack could not break our cryptosystem.

The square root attack

In [9] it is shown that the square root attack on the *SAP* exists for some special cases.

Case 1. An element $g \in G$ is known for which $g^k = y$ for some $k \geq 1$. Then one can determine the period and the preperiod of g by $O(\sqrt{|G|})$ operations (using a method similar to Pollard's rho method). Finally, applying the baby-step, giant-step method to find k needs another $O(\sqrt{|G|})$ operations. This applies immediately to the case when G is a cyclic group.

Case 2. Let G be a group, but not cyclic. One may always find inverses with $O(\sqrt{|G|})$ group operations, it suffices to solve $g_1x = g_2y$ from which one obtains $(g_2^{-1}g_1)x = y$. A randomized baby-step – giant-step method is possible and it needs $O(\sqrt{|G|})$ operations.

In contrast to the DLP, problem actions of a semigroup G on a set S can result in a G -orbit Gs , $s \in S$, consisted of many ultimately periodic orbits $\{g^k s \mid k \in \mathbb{N}, g \in G\}$.

For semigroup actions where square root attack exists and no other attack is known it's generally accepted that an orbit size having 160 bits is sufficient for practical security.

For cases where no square root attack is known orbit cases of 80 bits could be sufficient for practical security.

3. A TWO SIDED ABELIAN ACTION BASED ON SIMPLE SEMIRINGS

3.1 A particular bi-semigroup action [13]

We describe a particular bi-semigroup action where we do not know how to solve the *BSAP* once the parameters have been chosen large enough.

Let R be a finite simple semiring not embeddable into a field and C is the center of R i.e. the subset of elements that commute with any other elements. For arbitrary matrix K of order n and polynomial $\eta(x) = a_mx^m + \dots + a_1x + a_0$ we define $\eta(K) = a_mK^m + \dots + a_1K + a_0E_n$, where E_n is the identity matrix of order n . Let $C[K] = \{\eta(K) | \eta(x) \in C[x]\}$. If n is an arbitrary positive integer, for $K \in Mat_n(R)$ we denote by $C[K]$ the abelian subsemiring of polynomials in K with coefficients in C . Let $M, N \in Mat_n(R)$ and consider the following action:

$$C[M] \times C[N] \times Mat_n(R) \longrightarrow Mat_n(R),$$

$$\text{where } (p(M), q(N), X) \longrightarrow p(M)Xq(N).$$

3.2 Extended Diffie-Hellman protocol with two sided matrix semiring acting

1. Alice and Bob publicly agree on some finite simple semiring R , not embeddable into a field with nonempty center C . They choose a positive integer n and four arbitrary subsemirings $A_1, A_2, B_1, B_2 \in Mat_n(R)$. They also choose matrices $X \in Mat_n(R), M_1 \in A_1, M_2 \in A_2, N_1 \in B_1, N_2 \in B_2$ such that $M_1N_1 = N_1M_1$ and $M_2N_2 = N_2M_2$.

2. Alice chooses matrices $p_a(M_1) \in C[M_1], q_a(M_2) \in C[M_2]$ and computes matrix $A = p_a(M_1)Xq_a(M_2)$. She sends A to Bob.

3. Bob chooses matrices $p_b(N_1) \in C[N_1], q_b(N_2) \in C[N_2]$ and computes matrix $B = p_b(N_1)Xq_b(N_2)$. He sends B to Alice.

4. Alice computes $k_a = p_a(M_1)Bq_a(M_2)$, while Bob computes $k_b = p_b(N_1)Aq_b(N_2)$.

5. The shared common key is thus

$$\begin{aligned} k &= k_a = p_a(M_1)Bq_a(M_2) = p_a(M_1)p_b(N_1)Xq_b(N_2)q_a(M_2) = \\ &= p_b(N_1)p_a(M_1)Xq_a(M_2)q_b(N_2) = p_b(N_1)Aq_b(N_2) = k_b. \end{aligned}$$

The corresponding *BSAP* that should be hard is:

Given five matrices $M_1, M_2, N_1, N_2, X \in Mat_n(R)$ with $M_1N_1 = N_1M_1$ and $M_2N_2 = N_2M_2$ and arbitrary matrix $Y \in C[M_1]C[N_1]XC[N_2]C[M_2]$, find matrices $P_1 \in C[M_1], P_2 \in C[M_2], Q_1 \in C[N_1], Q_2 \in C[N_2]$, such that $Y = P_1Q_1XQ_2P_2$.

It is sufficient for attacker to solve this *bi-semiring action problem* for breaking the cryptosystem.

4. LARGE ENDOMORPHISM SEMIRINGS

A novel approach to build families of semigroup action is to start with a lattice $L = (L, \vee, \wedge)$ of moderate size. From that can be constructed a huge simple semiring as the endomorphism semiring of the monoid (L, \vee) . We develop this idea using a join-semilattice to build an endomorphism semirings and its subsemirings consisted of all idempotent endomorphisms.

Definition 4.1 A (join)-semilattice L is an algebra with one binary operation \vee satisfying the identities $x \vee (y \vee z) = (x \vee y) \vee z$, $x \vee y = y \vee x$ and $x \vee x = x$ for $x, y, z \in L$.

Thus, for elements x, y of a semilattice L , $x \leq y$ means that $x \vee y = y$. In this notation a neutral element is the least element.

Definition 4.2 The endomorphism semiring of a semilattice L is the set E of endomorphisms of a semilattice $E(L)$ with respect to the addition and multiplication defined as follows: $f + g = h$ where $h(x) = f(x) \vee g(x)$ for all $x \in L$; $f \cdot g = h$ where $h(x) = g(f(x))$ for all $x \in L$.

Example 4.3 Consider a join-semilattice $L = (\{a_1, a_2, a_3, a_4, m\}, \vee)$ given by

\vee	a_1	a_2	a_3	a_4	m	and its endomorphism semiring $\widehat{E}(L)$.
a_1	a_1	m	m	m	m	
a_2	m	a_2	m	m	m	
a_3	m	m	a_3	m	m	
a_4	m	m	m	a_4	m	
m	m	m	m	m	m	

Let $E(L)$ be the subset of $\widehat{E}(L)$ consisted of all nonconstant endomorphisms and the additively absorbing element $\infty = (mmmmm)$. Then by Proposition 2.4 of [14] the set $E(L)$ is a subsemiring of $\widehat{E}(L)$ with an element $\infty = (mmmmm)$.

Definition 4.4 For any $i, j = 1, \dots, 4$ the endomorphisms $f_{ij} \in E(L)$ defined by

$$f_{ij}(a_k) = \begin{cases} a_j & \text{if } i = k \\ m & \text{if } i \neq k \end{cases}$$

are called *almost absorbing endomorphisms*.

The set consisted of all almost absorbing endomorphisms of $E(L)$ and the absorbing element $\infty = (mmmmm)$ is an ideal of the semiring $E(L)$ (see [14]).

Theorem 4.5 [14]. In the center of the semiring $E(L)$ there is only two elements: the identity i and the absorbing element ∞ . In the center of the semiring $\widehat{E}(L)$ there is only one element - the identity i .

Let's consider the endomorphisms $\varphi \in E(L)$ such that for any $i = 1, \dots, 4$ either $\varphi(a_i) = a_i$ or $\varphi(a_i) = m$. This is the set of all idempotent endomorphisms in the semiring $E(L)$. We will denote it by $ID(E(L))$. From Theorem 3.4 of [14] follows that this set is a commutative subsemiring of the semiring $E(L)$ and its order is $2^4 = 16$.

We will denote the elements of the semiring $ID(E(L))$ as follows :

$$\begin{aligned}
 i &= (a_1 a_2 a_3 a_4 m), \quad \varphi_1 = (a_1 m m m m), \quad \varphi_2 = (m a_2 m m m), \\
 \varphi_3 &= (m m a_3 m m), \quad \varphi_4 = (m m m a_4 m), \\
 \varphi_{12} &= (a_1 a_2 m m m), \quad \varphi_{13} = (a_1 m a_3 m m), \quad \varphi_{14} = (a_1 m m a_4 m), \\
 \varphi_{23} &= (m a_2 a_3 m m), \quad \varphi_{24} = (m a_2 m a_4 m), \quad \varphi_{34} = (m m a_3 a_4 m), \\
 \varphi_{123} &= (a_1 a_2 a_3 m m), \quad \varphi_{124} = (a_1 a_2 m a_4 m), \\
 \varphi_{134} &= (a_1 m a_3 a_4 m), \quad \varphi_{234} = (m a_2 a_3 a_4 m), \\
 \infty &= (m m m m m).
 \end{aligned}$$

The addition and multiplication tables of the semiring $ID(E(L))$ coincide and the identity i is both an additively neutral and multiplicatively neutral element. So, we observe the following table

+/\cdot	i	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_{12}	φ_{13}	φ_{14}	φ_{23}	φ_{24}	φ_{34}	φ_{123}	φ_{124}	φ_{134}	φ_{234}	∞
i	i	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_{12}	φ_{13}	φ_{14}	φ_{23}	φ_{24}	φ_{34}	φ_{123}	φ_{124}	φ_{134}	φ_{234}	∞
φ_1	φ_1	φ_1	∞	∞	∞	φ_1	φ_1	φ_1	∞	∞	∞	φ_1	φ_1	φ_1	∞	∞
φ_2	φ_2	∞	φ_2	∞	∞	φ_2	∞	∞	φ_2	φ_2	∞	φ_2	φ_2	∞	φ_2	∞
φ_3	φ_3	∞	∞	φ_3	∞	∞	φ_3	∞	φ_3	∞	φ_3	φ_3	∞	φ_3	φ_3	∞
φ_4	φ_4	∞	∞	∞	φ_4	∞	∞	φ_4	∞	φ_4	φ_4	∞	φ_4	φ_4	φ_4	∞
φ_{12}	φ_{12}	φ_1	φ_2	∞	∞	φ_{12}	φ_1	φ_1	φ_2	φ_2	∞	φ_{12}	φ_{12}	φ_1	φ_2	∞
φ_{13}	φ_{13}	φ_1	∞	φ_3	∞	φ_1	φ_{13}	φ_1	φ_3	∞	φ_3	φ_{13}	φ_1	φ_{13}	φ_3	∞
φ_{14}	φ_{14}	φ_1	∞	∞	φ_4	φ_1	φ_1	φ_{14}	∞	φ_4	φ_4	φ_1	φ_{14}	φ_{14}	φ_4	∞
φ_{23}	φ_{23}	∞	φ_2	φ_3	∞	φ_2	φ_3	∞	φ_{23}	φ_2	φ_3	φ_{23}	φ_2	φ_3	φ_{23}	∞
φ_{24}	φ_{24}	∞	φ_2	∞	φ_4	φ_2	∞	φ_4	φ_2	φ_{24}	φ_4	φ_2	φ_{24}	φ_4	φ_{24}	∞
φ_{34}	φ_{34}	∞	∞	φ_3	φ_4	∞	φ_3	φ_4	φ_3	φ_4	φ_{34}	φ_3	φ_4	φ_{34}	φ_{34}	∞
φ_{123}	φ_{123}	φ_1	φ_2	φ_3	∞	φ_{12}	φ_{13}	φ_1	φ_{23}	φ_2	φ_3	φ_{123}	φ_{12}	φ_{13}	φ_{23}	∞
φ_{124}	φ_{124}	φ_1	φ_2	∞	φ_4	φ_{12}	φ_1	φ_{14}	φ_2	φ_{24}	φ_4	φ_{12}	φ_{124}	φ_{14}	φ_{24}	∞
φ_{134}	φ_{134}	φ_1	∞	φ_3	φ_4	φ_1	φ_{13}	φ_{14}	φ_3	φ_4	φ_{34}	φ_{13}	φ_{14}	φ_{134}	φ_{34}	∞
φ_{234}	φ_{234}	∞	φ_2	φ_3	φ_4	φ_2	φ_3	φ_4	φ_{23}	φ_{24}	φ_{34}	φ_{23}	φ_{24}	φ_{34}	φ_{234}	∞
∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

All the elements of the semiring $ID(E(L))$ are both additively neutral and multiplicatively neutral. It follows that it is the *Viterbi semiring* (see [6] for more details about the Viterbi semirings).

5. TOWARDS A CONCRETE CRYPTOSYSTEM

The following lemma is a straightforward

Lemma 5.1 *Let M and N be $n \times n$ symmetric matrices with entries in the semiring R . If R is a commutative semiring, then $MN = NM$.*

If R be a commutative semiring and $SMat_n R$ be the semiring of symmetric matrices with entries in R . Then from Lemma 5.1 immediately follows

Proposition 5.2 *$SMat_n R$ is a commutative semiring.*

Extended Diffie-Hellman protocol is the following procedure:

1. Alice and Bob agree on a finite commutative semiring R . They choose a positive integer n and a matrix $X \in Mat_n(R)$.
2. Alice chooses matrices $A_1, A_2 \in SMat_n R$ and computes a matrix $A = A_1 X A_2$. She sends A to Bob.
3. Bob chooses matrices $B_1, B_2 \in SMat_n R$ and computes a matrix $B = B_1 X B_2$. He sends B to Alice.
4. Their common secret key is then

$$k = k_a = A_1 B A_2 = A_1 B_1 X B_2 A_2 = B_1 A_1 X A_2 B_2 = B_1 A B_2 = k_b.$$

The corresponding *BSAP* that should be hard is : given matrix X of a commutative semiring $SMat_n R$ and matrix $Y = A_1 B_1 X B_2 A_2$, find four matrices A'_1, B'_1, A'_2, B'_2 such that $Y = A'_1 B'_1 X B'_2 A'_2$. We do not know if it is necessary for an attacker to solve this problem, but it is sufficient.

Consider the semiring $R = ID(E(L))$ as defined above. Let $SMat_n R$ be the commutative semiring of symmetric matrices with entries in R . Alice chooses matrices $A_1, A_2 \in R$ and computes $A = A_1 X A_2$. Matrices A_1, A_2 are chosen as private keys by Alice in Extended Diffie-Hellman protocol 5.3.

If we consider matrix semiring $SMat_n R$ with $n = 2$ then Alice has 16^3 choices to choose a matrix A_1 and the same choices for matrix A_2 .

Assume Alice has chosen the matrices A_1 and A_2 in the following particular way

$$A_1 = \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} d & e \\ e & f \end{pmatrix}, \quad \text{where } a, b, c, d, e, f \in R.$$

The only way we know for an attacker to break this system would be to find matrices A'_1 and A'_2 such that $A'_1 X A'_2 = A$ (or, to solve similar problem in terms of the matrix B Bob computes).

A brute force search will depend on the size of the set $M = \{A_1 X A_2\}$. If the size of the matrices A_1, A_2 is $n = 2$, an immediate upper bound for the size of this set is $16^3 \cdot 16^3 = 2^{18}$. It will require further research to estimate better the size of M and to understand how the sizes grow as we increase both the matrices involved and the commutative semirings.

In order to describe the efficiency of the system we have to say that if Alice and Bob agree on a matrices of size n and a commutative semiring R with cardinality $|R| = \theta$, then the public key and the data to be transmitted has $O(n^2 \lg \theta)$ bits .

6. CONCLUSION

In this paper we study how the generalization of the discrete logarithm problem results in the semigroup action problem. When the semigroup is abelian, arises a natural Diffie-Hellman key exchange and a sufficient condition to break the key exchange system is to solve semigroup (bi-semigroup) action problem. In section 4 we consider a special semilattice L and its endomorphism semiring $E(L)$. The addition and multiplication tables of the subsemiring $ID(E(L))$ coincide. In the last part of the paper we concentrate on a particular bi-semiring action. Using a commutative subsemiring of endomorphism semiring of a finite semilattice of a special type we propose a concrete cryptosystem. It will require further research to assess the security of such cryptosystem.

References

- [1] I. Anshel, M. Anshel and D. Goldfeld (1999), An algebraic method for public-key cryptography, *Math. Res. Lett.*, 6 (1999), 287 - 291.
- [2] S.Blackburn, C. Cid, C. Mullan (2010), Group theory in cryptography, arXiv: 0906.5545v2 [math] (25 Jan 2010).
- [3] W. Diffie, M. E. Hellman (1976), New directions in cryptography. *IEEE Trans. Information Theory*, IT-22(6) (1976) , 644 - 654.
- [4] T. ElGamal (1985), A public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms, *IEEE Trans. Inform. Theory* 31 (1985) , 469 - 472.
- [5] S.Galbraith, A.Menezes (2005), Algebraic curves and cryptography, *Finite fields and applications*, 11 (2005), 544 - 577.
- [6] J.S.Golan (1999), *Semirings and their application*, Kluwer Acad.Publ., Dodrecht (1999).

- [7] K.H.Ko, S.J.Lee, J.H.Cheon, J.H.Han, J.S.Kang and C.Park (2000), New public key cryptosystem using braid group, Advances in cryptology – CRYPTO 2000, Lecture Note in computer Science 1880 , Springer, Berlin (2000), 166 - 183.
- [8] A.K.Lenstra and E.R.Verheul (2000), The XTR public key cryptosystem, Advances in cryptology - CRYPTO 2000, Lecture Note in computer Science 1880 , Springer, Berlin (2000), 1 - 19 .
- [9] G. Maze, C. Monico, and J. Rosenthal (2007), A public key cryptosystem based on actions by semigroups. Advances in Mathematics of Communications, Vol. 1, No. 4 (2007), 489 - 507.
- [10] A.J.Menezes, P.S.Van Oorschot and S.A.Vanstone (1997), "Handbook of Applied Cryptography Series on Discrete Mathematics and its Applications, CRC Press, Boca Raton ,FL (1997).
- [11] C. Monico (2004), On finite congruence-simple semirings, J. Algebra, 271 (2004), 846 - 854.
- [12] I. Trendafilov, M. Durcheva (2010), Discrete logarithms in finite fields – some algorithms for computing. New public key cryptosystem, Appl. Math. in Eng. and Econ. – 36th Int. Conf. AIP Conf. Proc., Vol. 1293 (2010), 295-302.
- [13] I. Trendafilov, M. Durcheva (2011), New public key cryptosystem based on semirings and semimodules, Appl. Math. in Eng. and Econ. – 37th Int. Conf. AIP Conf. Proc., Vol. 1410 (2011) , 331-338.
- [14] I. Trendafilov, D.Vladeva (2011), Endomorphism semirings without zero of a finite semilattice of a special type Proc. Techn. Univ.-Sofia, 61 (2011).

Author: Mariana Durcheva, assist. prof., Department "Algebra and geometry", FAMI, TU–Sofia, *e-mail*: mdurcheva66@gmail.com

“ЗАПОМНЯНЕ” НА ФУНКЦИИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА МИНИМАЛЕН БРОЙ ТОЧКИ И НА SUBDIVISION СХЕМИ

Богдан Гилев

Резюме: *Subdivision схемите са бързи и прости алгоритми използващи само операциите събиране и умножение. Основното приложение на тези схеми е за чертане на криви и повърхнини в компютърната графика.*

Обикновено "запомнянето" на елементарни функции в компютъра се реализира чрез въвеждане на големи таблици от данни(точки). В тази работа се предлага нов подход за "запомняне" на функции. Въвеждат се само няколко точки (точките от нулево ниво), а останалите точки (точките от по-високи нива) се генерират от работата на subdivision схема. Така една елементарна функция се "запомня" чрез точките от нулево ниво, които са малко на брой.

В тази работа се предлага една нова комбинация на прилагане на схема на Чайкин и на модифициран алгоритъм на Ремез с помощта на която се решава предложената задача за “запомняне” на функции.

Предложени са и числени примери.

Ключови думи: *апроксимация с равномерна норма, алгоритъм на Ремез, subdivision схеми*

“MEMORIZING” OF FUNCTIONS USING MINIMUM NUMBER OF POINTS AND SUBDIVISION SCHEMES

Bogdan Gilev

Abstract: *Subdivision schemes are fast and simple algorithms using only operations addition and multiplication. The main application of these schemes is drawing curves and surfaces in computer graphics.*

Usually the "memorizing" of the elementary functions in computer is realized through the introduction of large tables of data (points). In this paper new approach to "memorizing" functions is proposed. Only few points are introduced (zero level points) and other points (points from higher levels) are generated by work of the subdivision scheme. Thus, an elementary function is "memorized" by finding the points of zero level, which are less in number.

In this paper is proposed new combination of Chaikin scheme and modified Remez algorithm to solve problem of function “memorizing”.

Numerical example is also presented.

Keywords: *uniform approximations, Remez algorithm, subdivision schemes*

1. Introduction

The function produced from the work of subdivision schemes is a limit function formed by the work of some iterative algorithm [1]. Roughly this algorithm can be described as averaging the data, i.e. values from any level-(k+1) are represented by linear combination of values from level-k. More over values of level-k+1 are twice more and are associated with twice denser grid than that of level-k. Points of level-k are connected with piece-wise line and a curve from level-k is obtained. If k tends to infinity, the curves of level-k tend to some limit curve, it is the curve obtained from the work of subdivision schemes. To start this process zero level points must be known. The process of averaging starts from these points. In this paper the main task is finding these points of zero level and memorizing them. These points from zero level are sought so that after applying the scheme, the resulting limit curve to be the best uniform approximation of pre-selected elementary function. In the paper we work with the well known Chaikin subdivision scheme. This scheme produces limit functions, which can be represented as a linear combination of the B-splines [2]. The fact that basic functions are splines allows: first, to argue that there is an element of best uniform approximation, second, to determine whether it is unique [3,4], third, to claim that it can be obtained by help of a modified Single-point Remez algorithm [5] and fourth, directly using already known results to estimate the error of best uniform approximation of smooth functions with splines [6].

2. Subdivision schemes. Scheme of Chaikin

This paper uses the symbolism introduced in [1]. Only one-dimensional case is considered, i.e. "memorizing" function of one variable. In this case subdivision schemes can be described roughly in this way. By Binary Subdivision Scheme, abbreviated BSS or just SS, we recursively define a new series of points $f^k = \{f_i^k \mid i \in \mathbb{Z}, k \in \mathbb{Z}\}$, from level $k > 0$. Formally this relation is denoted by the equality $f^k = S^k f^0$. The exact relation between points of two neighboring levels is given by

$$f_i^{k+1} = \sum_{\alpha \in \mathbb{Z}} a_{i-2\alpha} f_\alpha^k \quad (1)$$

Obviously a SS is completely set by the vector $\bar{a} = (a_m, \dots, a_n)$, where a_m, \dots, a_n are different from zero numbers a_j in (1). This is called a vector mask from SS, and the scheme itself is denoted by $S_{\bar{a}}$. For convenience it is assumed that $h = 1$. The points $\left(\frac{i h}{2^k}, f_i^k\right)$ match the values f_i^k . The points of the k-th level are connected by piece-wise line, which is denoted by $f^k(x)$. When k tends to infinity, it is possible that curves $f^k(x)$ converge uniformly to a curve $f(x)$, which we will call a limit curve. A scheme that produces a limit curve is called convergent. It is recorded

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f^k = \lim_{k \rightarrow \infty} S_{\bar{a}}^k f^0 = S_{\bar{a}}^\infty f^0 = f$$

The exact definitions of points and uniform convergence of the SS and how to study the limit curves for the class of smoothness are given in [1]. If for random data from zero level $\{f_i^0 \mid i \in Z\}$, the limit curve $f^k(x)$ generated by the scheme has a class of smoothness $C^n[a,b]$ we call that the scheme is of this class. Depending on whether the subscript i in (1) is even or odd Chaikin scheme is disintegrated in two relations

$$\begin{aligned} f_{2i}^{k+1} &= \frac{3}{4} f_i^k + \frac{1}{4} f_{i+1}^k \\ f_{2i+1}^{k+1} &= \frac{1}{4} f_i^k + \frac{3}{4} f_{i+1}^k \end{aligned} \quad (2)$$

If the vector \bar{a} is a constant then the scheme is called stationary. The basic function $\varphi_0(x)$ of a stationary scheme is obtained if the scheme started by points of zero-level

$$\{f_0^i = \delta_0^i \mid i \in Z\},$$

where $\delta_0^i = \begin{cases} 0 & \text{for } i \neq 0 \\ 1 & \text{for } i = 0 \end{cases}$ is the symbol of Kroniker. For these initial data basis function of Chaikin algorithm is a B-spline with support $[-2,1]$ [2], i.e.

$$\varphi_0(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x \leq -2 \\ (x+2)^2 / 2 & \text{for } -2 \leq x \leq -1 \\ (3 - (2x+1)^2) / 4 & \text{for } -1 \leq x \leq 0 \\ (x-2)^2 / 2 & \text{for } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{for } x \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

Other basic functions are

$$\varphi_i(x) = \varphi_0(x-i) \quad \text{for } i \in Z. \quad (4)$$

3. Examples of "memorizing" of some elementary functions using the scheme of Chaikin

"Memorizing" of a function is finding an element of best uniform approximation of a function $f(x)$, by applying modified algorithm of Remez. For this purpose it must be shown that an element of best uniform approximation exists. It should also be shown that the algorithm of Remez is converging to an element of best uniform approximation. From the theorem 1.3 [5] follows that in considered by this item examples the element of best uniform approximations exists and it is unique. Moreover if modified Remez algorithm proposed by Nurnberg in [5] is used this element of the best uniform approximation can be found.

The proposed by Nurnberg modified single-point algorithm of Remez solves two main problems arising from the application of this algorithm for splines. First, the algorithm avoids the cases in which at some step the main determinant of system (6) is equal to zero. Second, the modified algorithm provides convergence of the sequence of elements $p_k(x)$ to the element of best uniform approximation $p^*(x)$.

Roughly this modification consists of the fact that one of the values of the points x_i which runs k -th iteration is replaced with a value of x in which the error $\eta_{k-1}(x)$ has local minimum, but only if this value is not "very close" to some node of the splines.

In the examples from this section it is used multi-point Remez algorithm, i.e. on each step not just one all values x_i are changed. This approach is preferred because multi-point Remez algorithm is faster convergent a the single-point algorithm. In the example system (6) has always nonzero main determinant and the condition for output from the algorithm is always satisfied. The latter delivers convergence of the algorithm to an element of best uniform approximation. If for other similar examples some of the above conditions is not fulfilled then the modified Remez algorithm proposed by Nurnberg in [5] has to be used.

As a result of applying the algorithm of Remez the coefficients of generalized polynomial of best uniform approximation are found

$$p^*(x) = \sum_{i \in Z} a_i \varphi_i(x), \quad (5)$$

where for the basis function $\varphi_i(x)$ (3) and (4) are fulfilled. Because of linearity of the scheme of Chaikin the data from zero-level f_i^0 from which Chaikin algorithm must be started to obtain the element of best uniform approximation are the coefficients a_i of (5), i.e. $\{f_i^0 = a_i \mid i \in Z\}$. These coefficients must be found and memorized and the function $f(x)$ is "memorized".

Example 1. To "memorize" function $f(x) = \sin(x)$ in the interval $[0, \frac{\pi}{2}]$. Basic functions have a limited support therefore the functions involved in approximation of $f(x)$ in $[0, \frac{\pi}{2}]$ are only 4. So approximation polynomial corresponding to (5), in this case looks like

$$p(x) = a_0 \varphi_0(x) + a_1 \varphi_0(x-1) + a_2 \varphi_0(x-2) + a_3 \varphi_0(x-3)$$

The algorithm of Remez is applied. In short it is the following. Starting points $\{x_i \mid i = 0,1,2,3,4\}$ are chosen and the system is solved

$$p(x_i) + (-1)^i h = f(x_i) \quad (6)$$

The values of the coefficients $\{a_i \mid i = 0,1,2,3,4\}$ and the value of h are obtained. These coefficients are substituted in $p(x)$ and the points x_i where the error

$$\eta(x) = f(x) - p(x)$$

has minimum are found. These are the starting points x_i from which starts second iteration of the algorithm. Iterations stop when difference

$$\left| h - \max_{x \in [0, \pi/2]} |\eta| \right|$$

becomes sufficiently small. Numerical experiments

First Iteration	$x_0 = 0$	$x_1 = 0.4$	$x_2 = 0.8$	$x_3 = 1.2$	$x_4 = \pi / 2$
	$a_0 = -0.5547$	$a_1 = 0.5449$	$a_2 = 1.1373$	$a_3 = 0.5993$	$h = 0.0049$
	$\max_{x \in [0, \pi / 2]} \eta = 0.0067$				
Second Iteration	$x_0 = 0$	$x_1 = 0.2653$	$x_2 = 0.8123$	$x_3 = 1.2205$	$x_4 = \pi / 2$
	$a_0 = -0.5538$	$a_1 = 0.5427$	$a_2 = 1.1397$	$a_3 = 0.5858$	$h = 0.0056$
	$\max_{x \in [0, \pi / 2]} \eta = 0.0056$				

Two iteration proved sufficient, because for accuracy to the fourth decimal place we have $h - \max_{x \in [0, \pi / 2]} |\eta|$. Similarly, if you start Chaikin scheme for initial data obtained from last (second) iteration (i.e. $\{f_i^0 = a_i \mid i = 0, 1, 2, 3\}$) and all other $\{f_i^0\}$ are zeros, the "memorized" function is obtained. Numerical experiments show that in the range $[0, \pi / 2]$ error in "memorizing" of $\sin(x)$ with polynomials of third degree (i.e. polynomial with four coefficients) is 0.0013. The error of "memorizing" of $\sin(x)$ with Chaikin subdivision scheme and four starting points is 0.0056. Obviously it is better, but the advantage of the proposed method is in its extreme simplicity. It uses only two mathematical operations addition and multiplication, moreover-multiplications are only by $1/4$ and $3/4$.

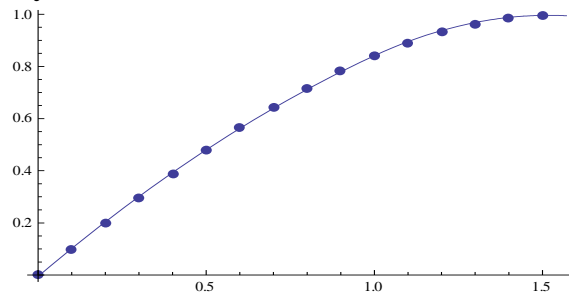


Fig.1

Example 2. "Memorizing" function $f(x) = e^x$ in the interval $[-1, 1]$.

The generalized polynomial used to approximate $f(x)$ in this case is

$$p(x) = a_0 \varphi_0(x) + a_1 \varphi_0(x-1) + a_2 \varphi_0(x-2) + a_3 \varphi_0(x-3)$$

The remaining procedure is the same as in Example 1. The numerical results are

First Iteration	$x_0 = -1$	$x_1 = -0.5$	$x_2 = 0$	$x_3 = 0.5$	$x_4 = 1$
	$a_0 = 0.1863$	$a_1 = 0.5413$	$a_2 = 1.4505$	$a_3 = 3.9779$	$h = 0.00407$
	$\max_{x \in [-1, 1]} \eta = 0.016$				
Second Iteration	$x_0 = -1$	$x_1 = -0.2889$	$x_2 = 0.1724$	$x_3 = 0.7614$	$x_4 = 1$
	$a_0 = 0.1649$	$a_1 = 0.5489$	$a_2 = 1.4475$	$a_3 = 3.9672$	$h = 0.011$
	$\max_{x \in [-1, 1]} \eta = 0.011$				

If we start Chaikin scheme for initial data obtained from last (second) iteration (i.e. $\{f_i^0 = a_i \mid i = 0, 1, 2, 3\}$) and all other f_i^0 are zeros, the "memorized" function is ob-

tained. Numerical experiments show that in the range $[-1,1]$ error "memorizing" of e^x with polynomials of third degree (i.e. polynomial with four coefficients) is 0.0055. The error of "memorizing" of e^x with Chaikin subdivision scheme and four starting points is 0.011. Again the approximation is worse, and again the advantage is connected with simplicity of the proposed method in this work..

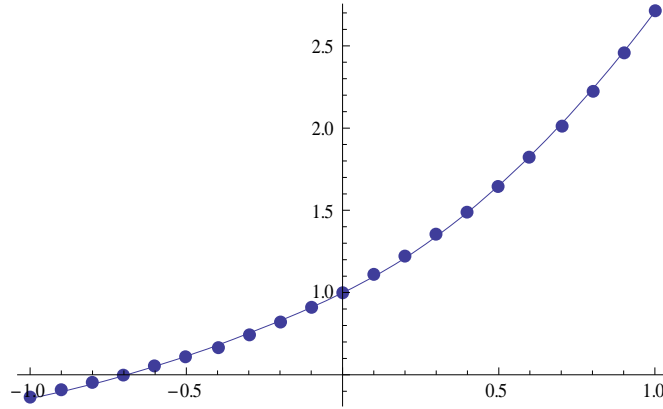


Fig.2

Built-in computer functions are $\sin(x)$, e^x , etc. In contrast to these functions, the function $|x|$ is not a standard built in, but it is difficult to polynomial approximation.

Example 3. "Memorizing" of function $f(x) = |x|$ in the interval $[-1,1]$.

The generalized approximation polynomial $p(x)$ is the same as in Example 2, thus the remaining procedure is the same. The numerical results are

First	$x_0 = -1$	$x_1 = -0.5$	$x_2 = 0$	$x_3 = 0.5$	$x_4 = 1$
Iteration	$a_0 = 2.125$	$a_1 = 0.125$	$a_2 = 0.125$	$a_3 = 2.125$	$h = 0.125$
$\max_{x \in [-1,1]} \eta = 0.125$					

Similarly, if we start Chaikin's scheme for initial data obtained from last (first) iteration (i.e. $\{f_i^0 = a_i \mid i = 0,1,2,3\}$ and all other f_i^0 are zeros, the "memorized" function is obtained. Numerical experiments show that in the range $[-1,1]$ the "memorizing" error of $|x|$ with polynomials of third degree (i.e. polynomial with four coefficients) is 0.125. The error of "memorizing" of $|x|$ with Chaikin subdivision scheme and four starting points is 0.125. In this case, the both approximations are exactly the same.

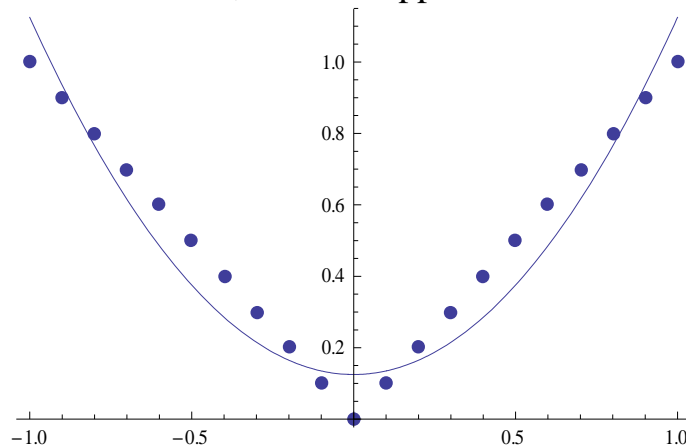


Fig.3

4. Order of approximation

Because the basis functions of the Chaikin scheme are splines, we directly use given in [6] estimation for the best uniform approximation of smooth functions with splines. This assessment states that the difference between $f(x)$ and its best uniform approximation $p^*(x)$ with splines is

$$|f - p^*| \leq \frac{(k+1)!}{(k+1-j)!} \left(\frac{h}{2}\right)^j \|f^{(j)}\|_\infty, \quad (7)$$

where h is the maximum distance between nodes, and j is random integer in the range $1 \leq j \leq \min\{k+1, l\}$. In the last inequality k is the degree of splines, and l is the largest number for which $f^{(l)}$ is continuous. Because the Chaikin scheme has $k=2$ the functions $f(x) \in C^3$ get maximum value for $j=3$. In this case, the nodes are equidistant and at the beginning are $h=1$ selected. This makes no problems when somebody wants to improve accuracy. If the received accuracy is not enough, it initially makes a shrinkage in abscissa axis, for example by division of the 2^m . The best uniform approximation of f is found, then the original scale of this axis is recovered by multiplying it by 2^m . Obviously in this upscaling the uniform distance between f and its approximation is not increased. Estimation (7) is rough [6], because it is derived using the following procedure. A uniform approximation of $f(x)$ by splines of degree k is obtained and for this approximation is derived an inequality. This inequality is summarized by induction and inequality (7) is obtained. Consequently, inequality (7) is effective also for the best uniform approximation of f with spline of degree k . This does not exclude the possibility that the best uniform approximation of f is better than that obtained in (7).

5. Conclusion

The proposed method of "memorizing" of elementary functions uses only a few points (from zero level) and the remaining points (from a higher level) are generated by the Chaikin scheme. This scheme uses only operations addition and multiplication by $1/4$ and $3/4$. Therefore, this scheme is very simple for computer implementation. However, the method gives satisfactory accuracy.

REFERENCES

- [1] N.Dyn, *Subdivision schemes in computer aided geometric design*, in Advances in Numerical Analysis II, Wavelets, Subdivision Algorithms and Radial Functions, W.A.Light, ed., Oxford University Press, 1991,36-104
- [2] N.Dyn, J.A.Gregory and D.Levin, *Analysis of Uniform Binary Subdivision Schemes for Curve Design*, Constr.Approx.(1991)7:127-147
- [3] G.Nurnberger: *A local version of Haar's theorem in approximations theory*, Numer. Funct. Anal. Optimiz. ,21-46(1982)

- [4] G.Nurnberger: *Strong uniqueness of best approximations and weak Chebyshev system*, Quantitative Approximation, Bonn,1979. R.De Vore, K. Scherer (eds,) New York: Academic Press, pp.255-266(1980)
- [5] G.Nurnberger, M.Sommer: *A Remez type algorithm for spline functions*, Numer.Math. 41, 117-146(1983)
- [6] M.J.D.Powell: *Approximation Theory and Methods*, Cambridge University Press, 1981
- [7] Peter Binev, Wolfgang Dahmen, Ronald DeVore, Nira Dyn, *Adaptive Approximation of Curves*, <http://www.math.sc.edu>, July 15, 2004

Автор: Богдан Гилев, гл.ас. д-р, катедра „Стохастика и оптимизиране”, Факултет по приложна математика и информатика, Технически Университет - София, E-mail address: b_gilev@tu-sofia.bg

Постъпила на 02.12.2011

Рецензент доц. д-р Иван Трендафилов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА УСТАНОВЕНИТЕ РЕЖИМИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНА МРЕЖА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ С ПРИСЪЕДИНЕНИ ВЯТЪРНИ ГЕНЕРАТОРИ

Ясен Тодоров, Марин Иванов, Деян Андонов, Димо Стоилов, Рад Станев

Резюме: Статията представя резултати от изследване на характерни гранични установени режими в разпределителната мрежа средно напрежение - електропровод „Шипково” и присъединените към него два вятърни генератора. Целта е да се направи анализ за препоръчване на мерки за намаляване на евентуални негативни последствия за потребителите от работата на вятърните електрогенератори и да се прецени необходимостта от инсталиране на компенсирани устройства. Чрез оценените загуби на активна мощност и при евентуална оценка на продължителността на работа в различните режими може да се прецени икономическата целесъобразност на различна степен на компенсация на потребяваната от генераторите реактивна мощност. Предлаганият подход за анализ е универсално приложим за този тип мрежи.

Ключови думи: разпределителна мрежа с присъединени вятърни генератори, установени режими, компенсация на реактивните мощности

STUDY OF STEADY STATE OPERATION MODES OF A POWER DISTRIBUTION NETWORK INCORPORATING WIND GENERATORS

Iasen Todorov, Marin Ivanov, Dejan Andonov, Dimo Stoilov, Rad Stanev

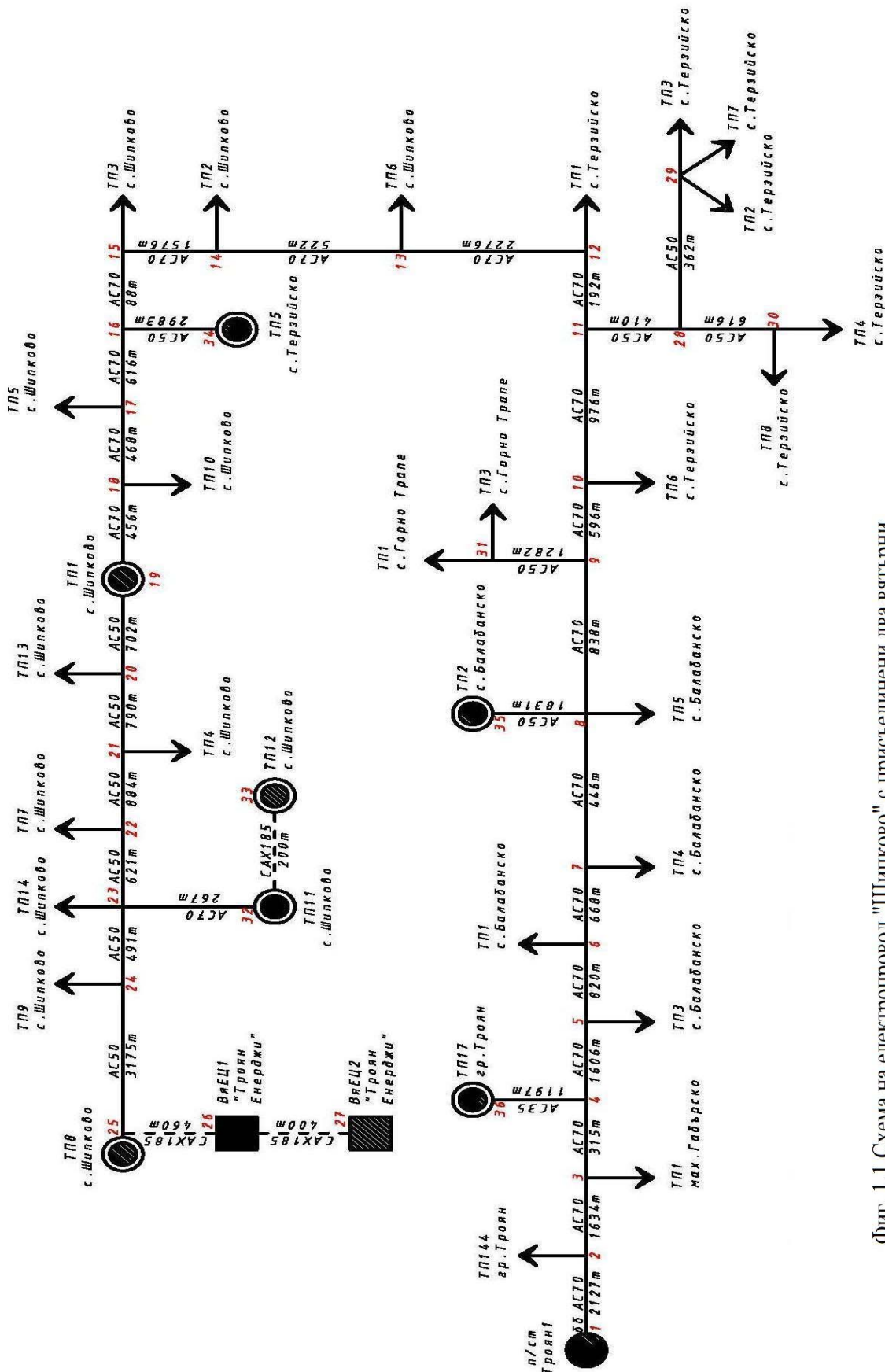
Abstract: The article presents results of a study on the characteristic steady state modes of a power distribution network, incorporating the 20 kV line “Shipkovo” with two wind generators, supplying residential consumers. An analysis is performed with the aim of giving recommendations for avoiding the eventual negative consequences of the wind generators’ operation, and estimation of the necessity for compensation sources installation. The determined active power losses could serve in an assessment of the economic expedience of different indexes of the reactive power compensation at the terminals of the wind generators. The proposed analysis approach is universally applicable for this type of networks.

Keywords: distribution network with connected wind generators, steady state modes, reactive power compensation

1. Увод

Като електропроизводствена технология вятърните генератори претърпяха изключително развитие за последните двадесет години. Те навлизат все по-широко в електроенергийните системи (ЕЕС) навсякъде по света [1]. Правителствената

подкрепя относно възобновяемите енергийни източници в редица държави стимулира този процес. Целенасочената политика за изграждане на национална схема от механизми за подпомагане на развитието на ВЕИ у нас доведе до рязкото увеличаване на проектите за вятърни енергийни паркове и отделни



Фиг. 1.1 Схема на електропровод "Шипково" с присъединени два вятърни генератора в края му

генератори, присъединявани към разпределителните мрежи средно и ниско напрежение. Този факт налага да бъдат изследвани въздействията, които те оказват върху ЕЕС.

Целта на настоящата статия е да се предложи подход за анализ на установените режими в разпределителни мрежи с присъединени вятърни генератори, като той се илюстрира чрез конкретна разпределителна мрежа. Анализът цели да се препоръчат мерки за намаляване на евентуални негативни последствия за потребителите от работата на вятърните електрогенератори, както и да се прецени необходимостта (впоследствие и икономическата целесъобразност) от инсталиране на компенсиращи устройства.

2. Описание на разпределителната мрежа

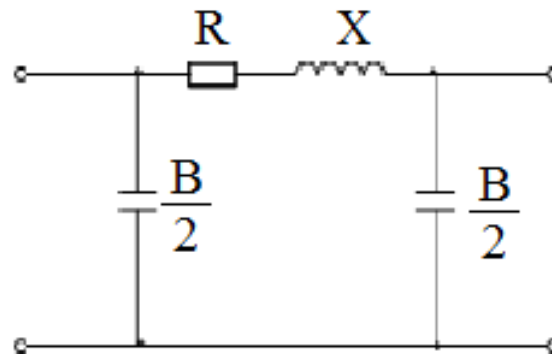
Електропровод „Шипково” е присъединен към подстанция „Троян 1” 110/20kV и е изграден като магистрална отворена мрежа без резервиране с обща дължина 37,880 км (фиг. 1). Снабдява с електрическа енергия част от град Троян, махала Гъбарско и селата Балабанско, Горно Трапе, Терзийско и Шипково. От него са запазени 33 трансформаторни поста с общо 6769 kVA инсталирана трансформаторна мощност и 2489 потребители на електрическа енергия. През месец септември 2008 година в края на електропровода са присъединени два вятърни генератора с постоянна скорост на въртене, използващи асинхронен генератор с кафезен ротор, с номинална мощност на всеки един 1,3 MW. В мястото на присъединяване е построена нова трансформаторна станция, която повишава напрежението на електроенергията от 690V (номиналното генераторно) на 20kV, за изнасяне към електроразпределителната мрежа.

Данните за дължините на участъците на електропровода, използваните стълбове, вида и сеченията на използваните проводници, товарите и генерациите от вятърната електроцентра (ВяЕЦ) за различните характерни режими са предоставени от ЧЕЗ Електроразпределение Столично.

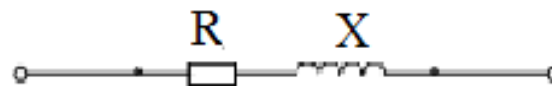
3. Описание на проведеното изследване

За целите на проведеното изследване е използван програмен продукт за изчисление на установени режими в ЕЕС. При моделирането на разглежданата мрежа отделните участъци на електропровод „Шипково са представени с опростени П-образни заместващи схема със съсредоточени параметри [2, 3], съответно за кабелни електропроводни линии без активна проводимост (фиг.3.1) и за въздушни електропроводни линии – без активна и капацитивна проводимост (фиг.3.2). При различните режими на натоварване са променени генерациите от ВяЕЦ и товарите във възлите на електрическата мрежа. Изчислени са и са въведени параметрите на отделните участъци от електропровода, както и товарите във възлите. Извършените изчисления относно потокоразпределението [2] са направени за следните характерни гранични режими [1]: **пет режима на максимален товар** - съответно при изключена от мрежата ВяЕЦ, при работеща на празен ход ВяЕЦ, при максимално производство на ВяЕЦ, при максимално производство на ВяЕЦ и инсталирани компенсиращи устройства (изцяло компенсиращи пот-

реблението на реактивна мощност от ВяЕЦ, т.е. без консумация на реактивна мощност от вятърните генератори), при ВяЕЦ работеща на празен ход и инсталирани компенсиращи устройства, както и при **същия брой режими на минимален товар** съответно за аналогични условия по отношение работата на ВяЕЦ. Напрежението на шини 20 kV на захранващата подстанция при режимите с минимален товар е прието да бъде поддържано равно на номиналното напрежение, а за режимите с максимален товар - равно на 1,05 по отношение на номиналното.



Фиг.3.1 Опростена П-образна заместваща схема със съсредоточен параметри, използвана при кабелните електропроводни линии

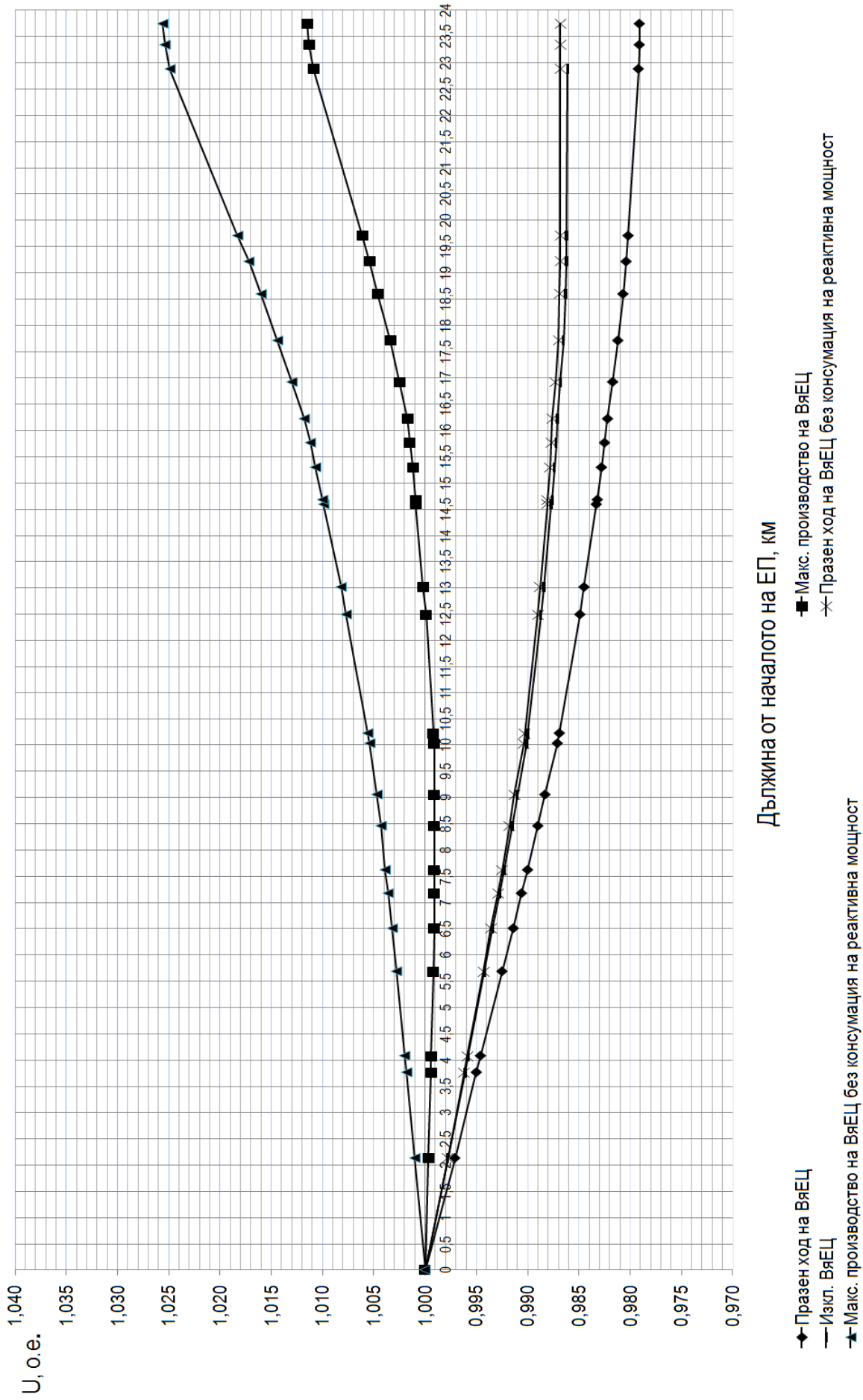


Фиг.3.2 Опростена П-образна заместваща схема със съсредоточени параметри, използвана при въздушни електропроводни линии

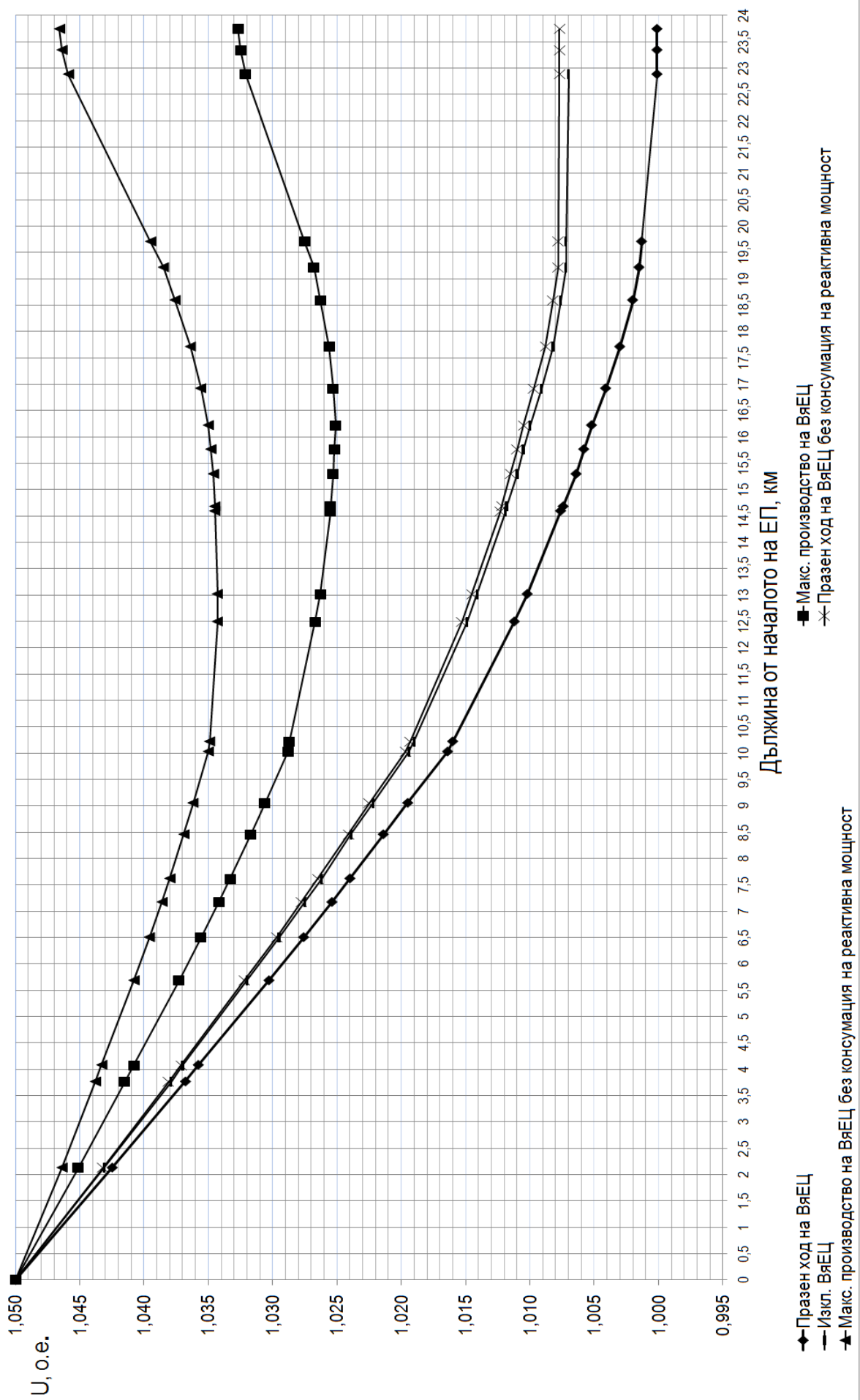
4. Резултати от изследванията

На следващите четири фигури в графичен вид са показани изменението на модула на напрежението U по дължината на магистралата на електропровода от подстанцията до последния вятърен генератор (фиг.4.1 и фиг.4.2) и изменението на фазата на напрежението θ (фиг.4.3 и фиг.4.4) за изследваните характерни режими, съответно при минимален и максимален товар.

В табл.4.1 е показан балансът на активните мощности за всеки един режим. Представените тук резултати са използвани като основа за изследванията дадени в [4].

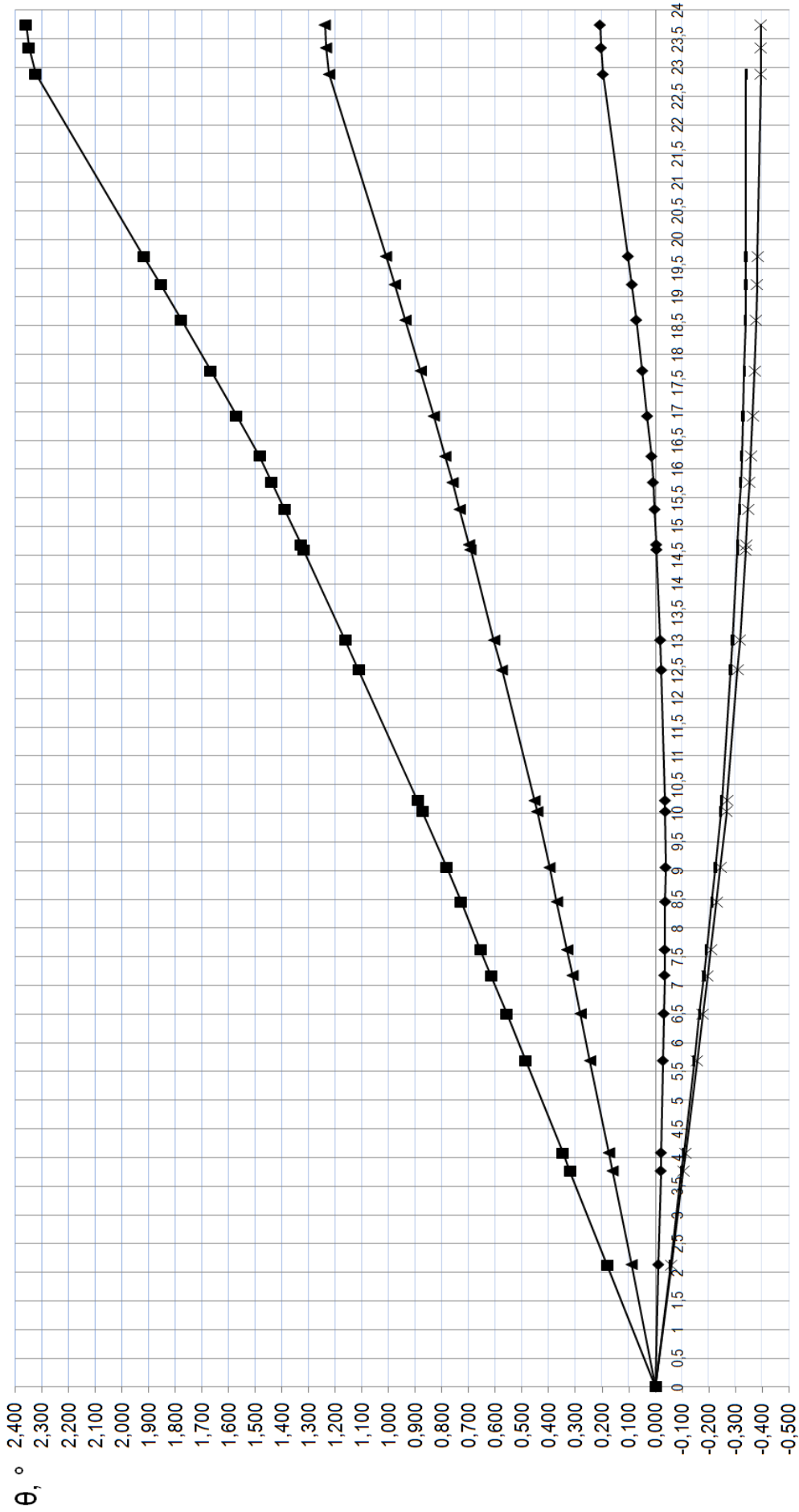


Фиг. 4.1 Изменение на напрежението по дължината на магистралата на електропровода при МИНИМАЛЕН ТОВАР



Дължина от началото на ЕП, км

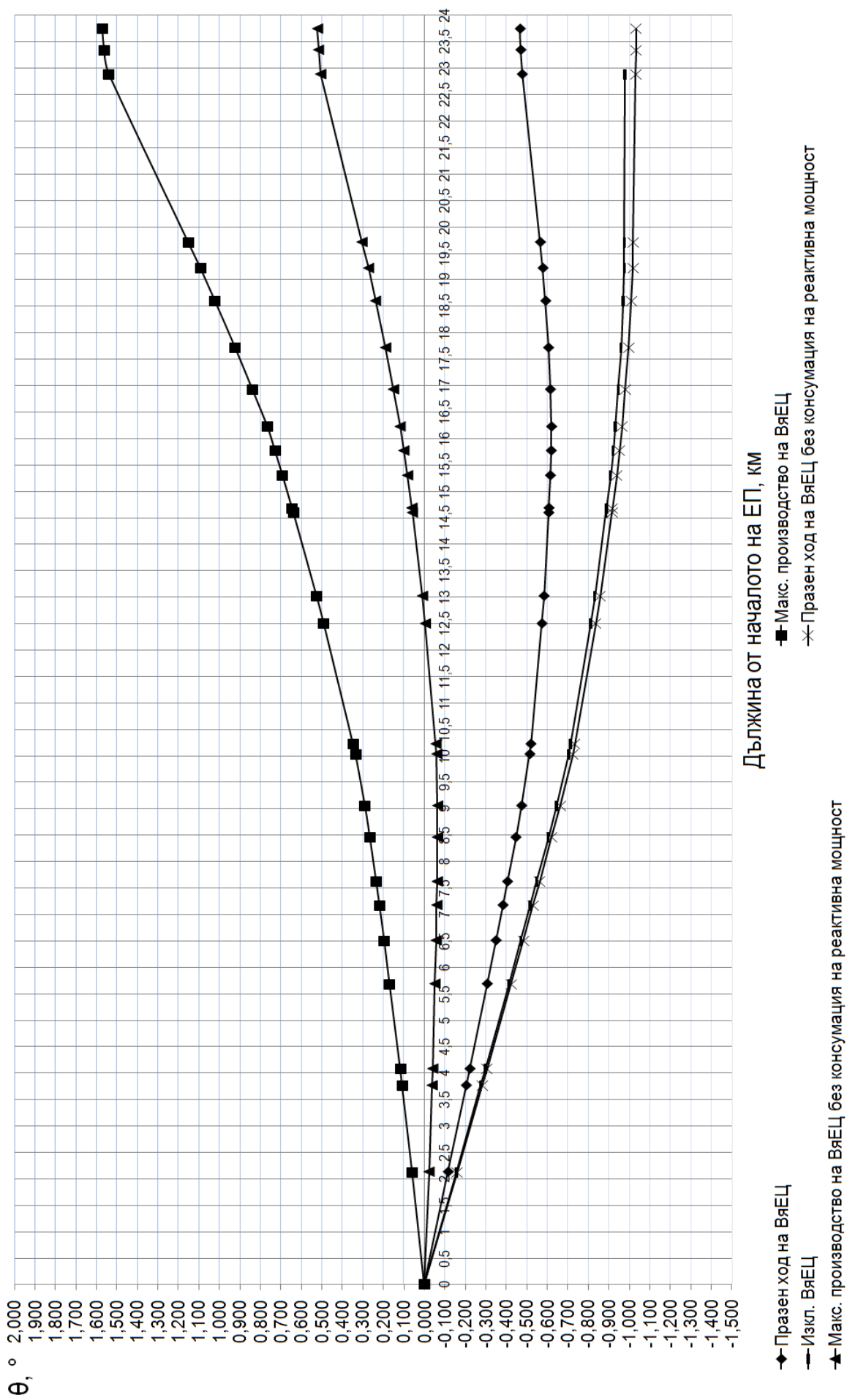
Фиг. 4.2 Изменение на напрежението по дължината на магистралата на електропровода при максимален товар



Дължина от началото на ЕП, км

◆- Макс. производство на ВЯЕЦ
 — Изкл. ВЯЕЦ
 ▲- Макс. потребление на ВЯЕЦ без консумация на реактивна мощност
 ◆- Макс. производство на ВЯЕЦ
 — Празен ход на ВЯЕЦ без консумация на реактивна мощност
 ✕- Празен ход на ВЯЕЦ без консумация на реактивна мощност

Фиг. 4.3 Изменение на фазата на напрежението по дължината на магистралата на електропровода при минимален товар



Дължина от началото на ЕП, км

Фиг. 4.4 Изменение на фазата на напрежението по дължината на магистралата на електропровода при максимален товар

Табл.4.1 Баланс на активните мощности за изследваните режими

№	Режим	Товар, kW	Производство от ВяЕГ, kW	Захранване ПС, kW	Загуби, kW
1	Максимален товар, изключени ВяЕГ	2300	-	2368,37	68,37
2	Максимален товар, пр.ход на ВяЕГ	2300	0	2378,03	78,03
3	Максимален товар, максимално производство от ВяЕГ	2300	1320	1030,58	50,58
4	Максимален товар, пр. ход на ВяЕГ без консумация на реактивна мощност	2300	0	2367,71	67,71
5	Максимален товар, максимално производство от ВяЕГ без консумация на реактивна мощност	2300	1320	1006,72	26,72
6	Минимален товар, изключен ВяЕГ	730	-	737,58	7,58
7	Минимален товар, пр.ход на ВяЕГ	730	0	742,67	12,67
8	Минимален товар, максимално производство от ВяЕГ	730	1320	-545,75	44,25
9	Минимален товар, пр.ход на ВяЕГ без консумация на реактивна мощност	730	0	737,40	7,40
10	Минимален товар, максимално производство от ВяЕГ без консумация на реактивна мощност	730	1320	-561,65	28,35

5. Анализ и изводи

Проведеното изследване показва, че характерните гранични режими на работа на генераторите от ВяЕЦ са допустими, т.е. не се получават недопустими отклонения на напрежението във възлите на разглежданата мрежа и претоварвания на отделните участъци на електропровода. Най-голямо изменение на напрежение по дължината на електропровода се получава при максимален товар и режим на празен ход на ВяЕЦ, а най-малко – при минимален товар и изключена ВяЕЦ. Най-голямо изменение на фазата на напрежението по дължината на електропровода се получава при минимален товар и максимално производство от ВяЕЦ, а най-малко – при минимален товар и режим на празен ход на ВяЕЦ. Най-високи загуби на активна мощност се получават при максимален товар на електропровода и режим на празен ход на ВяЕЦ. При така изследваните гранични режими, а следователно и при междинни нормални установени режими, не съществува нужда от използване на допълнителни компенсиращи устройства. Разглеждането на режими с компенсация на потребяваната от ВяЕЦ реактивна мощност цели единствено определяне на намалението на загубите на активна мощност. Чрез определеното намаление на загубите и при евентуална

оценка на продължителността на работа в различните режими може да се прецени икономическата целесъобразност на различна степен на компенсация на потребяваната от генераторите реактивна мощност.

Тъй като резултатите показват, че загубата на мощност и напрежение при изключена ВЯЕЦ са по-малки в сравнение с тези при ВЯЕЦ работеща на празен ход, в зависимост от изпълнението и на други експлоатационни условия може да се препоръча при скорост на вятъра по-малка от минималната скорост на включване на вятърните генератори ВЯЕЦ да се изключва от мрежата.

Илюстрираният върху конкретната мрежа подход е универсално приложим при изследвания на установени режими на разпределителни мрежи с присъединени вятърни генератори.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fox B., Flynn D., Bryans L., Wind Power Integration – Connection and system operational aspects, The institute of Engineering and Technology (IET), 2007.
- [2] Gross Ch. A., POWER SYSTEM ANALYSIS, John Wiley & Sons, NY 1986.
- [3] Николов Д., Електрически мрежи и системи, Техника, София, 1994.
- [4] Иванов М., Станев Р., Тодоров Я., Стоилов Д., Караиванов Д., Статична устойчивост на електропровод средно напрежение с присъединени вятърни генератори, Годишник на ТУ-София, т. 60, кн 1., 2010, с. 48-53, ISSN 1311-0829.

Авторите: инж. Ясен Димитров Тодоров - СЕЗ Електроразпределение Столично, Марин Красимиров Иванов - студент в Електротехнически факултет на ТУ-София, Деян Михайлов Андонов - докторант, доц. д-р Димо Георгиев Стоилов, ас. инж. Рад Христов Станев - катедра Електроенергетика, Технически Университет - София: E-mail address: dstoilov@tu-sofia.bg

Постъпила на 12.10.2010

Рецензент проф. дтн Е. Николов

ЕЛЕКТРОПЕЩНИ ТРАНСФОРМАТОРИ - ОСОБЕНОСТИ

Част 1

Кирил Стойков, Стефан Стайков, Калинка Тодорова

Резюме: В първата част от работата се обсъждат някои особености на трансформаторите и трансформаторните агрегати за електрически пещи. Формулирани са основните изисквания към електропещни трансформатори и трансформаторни агрегати. Посочени са основните различия на този тип трансформатори и агрегати от нормалните силови трансформатори.

Ключови думи: трансформатори за електрически пещи; типова мощност; дълбочина на регулиране на напрежението.

FURNACE TRANSFORMERS - CHARACTERISTICS

Part 1

Kiril Stoykov, Stefan Staykov, Kalinka Todorova

Abstract: In the part 1 in this paper, some features of the transformers and transformer aggregations for electrical furnaces, are discussed. The main requirements concerning to the furnace transformers and transformer aggregations, are defined. The basic differences between this transformers and ordinary power transformers are considered.

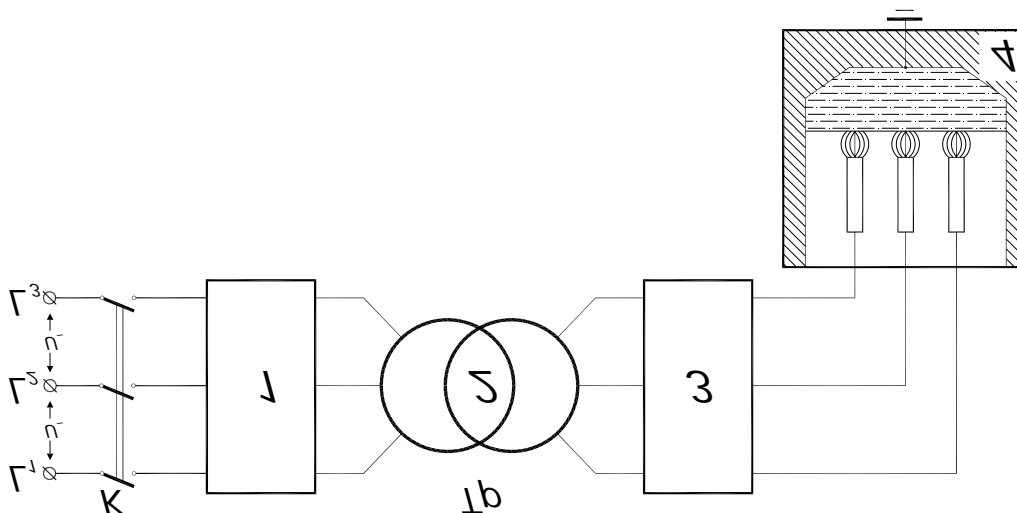
Keywords: furnace transformers; typical power, deepness of voltage control.

1. Въведение

Независимо от икономическия спад, производството на стомана в електродъгови пещи в света непрекъснато расте. Нарастването на електропроизводството на стомана се дължи на значителните количества отпадъчно желязо от металургичните заводи, старо желязо и отпадъци от бита и различни отрасли на промишлеността.

Предимствата на това производство са свързани с: ефективната работа на електродъговите стоманодобивни пещи; малката заемана площ от целия агрегат; възможността за автоматизиране на производството; чистотата на работните места; възможността за бързо регулиране на енергията, необходима за даден цикъл.

На фиг.1 е показана принципна схема на трифазна електропещна уредба за производство на стомана.



Фиг.1. Принцилна електрическа схема на електропещна уредба

Тя се състои от: 1 - захранваща, комутационна и измервателна апаратура; 2 - електропещен трансформатор или електропещен трансформаторен агрегат; 3 - къса мрежа, съединяваща трансформатора с електродите на пещта; 4 - електрическа пещ, вана и електроди.

Електропещният трансформатор е най-отговорното съоръжение при една електрическа пещ. Той се отличава от обикновените (нормалните) силови трансформатори.

Задачата на електропещния трансформатор (ЕПТ), респективно електропещния трансформаторен агрегат (ЕПТА), се състои в преобразуването на трифазна система напрежение на електрическата мрежа в подходяща захранваща трифазна система на съответна електрическа пещ.

В работата се разглеждат въпроси, свързани само с електропещните трансформатори и електропещните трансформаторни агрегати (в по нататъшните разглеждания ще се използва само термина електропещни трансформатори, но ще се подразбират и електропещни трансформаторни агрегати). Като правило те са трифазни. Разбира се, при мощни и свръхмощни електродъгови стоманодобивни пещи се използва група от три еднофазни трансформатори, които позволяват получаване на по-голям коефициент на мощността за сметка на по-рационална конструкция на късата верига. Освен това, такава група дава възможност при необходимост да се регулира напрежението за всяка фаза поотделно.

Нашата страна има сравнително голям опит в производството на електропещни трансформатори. В края на миналия век беше усвоено производството на мощни електропещни трансформаторни агрегати.

В табл.1 са дадени някои електропещни трансформатори, произведени в България след 1970г.

Табл.1

1	2	3	4	5	6	7
№	Мощност [MVA]	Загуби на к.с. [KVA]	Загуби на пр.х. [KVA]	U_{BH} [кV]	U_{HH} [V]	Напряжение на к.с.[%]
1	1,6 с реактор	27162	6690	6,3	63 ÷ 113	24,42
2	2,0 с реактор	1ст. 21076 9ст. 17844 15ст.27496 19ст.23192	3600 5607	20	100 ÷ 225	15,98 9,83 31,98 29,75
3	2,0 с реактор	1ст.20435 9ст.22087 19ст.26054	5400	10	100 ÷ 225	13,08 9,08 30,35
4	2,0 с реактор	1ст.16409 9ст.18703 11ст.18428 15ст.20453 19ст.23334	4122	20	85 ÷ 220	16,62 9,42 25,65 26,59 29,40
5	4,8 с реактор	1ст.87313 11ст.64332 23ст.61504	7425	20	114 ÷ 257	25,71 36,04 28,65
6	5,0 с реактор	1ст.46503 9ст.51816 11ст.52024 19ст.64995	7891	20	85 ÷ 220	15,96 9,01 25,16 29,03
7	7,0	3ст.108900	12480	63	121 ÷ 260	1ст. 33,77 3ст. 26,15
8	8,0	1ст.57665 15ст.61316 19ст.44787	17135	20	84 ÷ 260	19,5 8,76 7,48
9	12,0	1ст.83107 9ст.77240 11ст.82412 18ст.87598 19ст.83109	13342	35	121 ÷ 260	14,49 10,93 8,34 6,53 6,07
10	12,5	1ст.81181 18ст.87540 19ст.83104	13594	35	121 ÷ 260	14,72 6,62 6,17
11	50,0	1ст.277301 27ст.265140	52280	35	188 ÷ 590	24,72 5,48

2. Особенности на електропещните трансформатори

ЕПТ в сравнение със силовите трансформатори с общо предназначение имат редица особености. Преди всичко те са свързани с параметрите и режимите на работа на електрическата пещ (ЕП). Тези особености обхващат почти всички елементи на ЕПТ - магнитна система, намотки, изводи, превключващи устройства и др. Освен това, ЕПТ трябва да удовлетворяват изискванията на технологичния процес и да имат висока надежност, тъй като всяка повреда на трансформатора води до спирането на работа на ЕП, т.е. до неоправдани разходи. Непрекъснатото развитие и усъвършенстване на електротермията води до развитието и на направление електротехнологии, в частност електропещостроене. Именно, това налага проектиране и производство на различни не само по числени стойности ЕПТ, но и по конструктивни изпълнения.

2.1. Номинална мощност. Това понятие не може да се приложи към ЕПТ, т.к. те нямат основно регулационно отклонение. Ето защо на всяко регулационно отклонение съответства номинална мощност.

Номиналната мощност на ЕПТ се определя от характеристиките на захранваната от него електрическа пещ. Трансформаторите трябва да издържат претоварване от 20% в продължение на 1,5 - 2 часа. Като се отчете стойността на качествения фактор ($\cos\varphi$) на електропещната уредба може да се получи активната мощност на трансформатора в kW, числено равна на номиналната мощност на трансформатора в kVA.

Мощността на ЕПТ зависи от капацитета на електрическата пещ. Практиката показва, че за 1t от капацитета на пещта обикновено е необходима трансформаторна мощност от 400 - 500 kVA..

2.2. Типова мощност. Понятието типова мощност (P_m) се използва при специални силови трансформатори, към които спадат и електропещните трансформатори[1]. Това е така наречената изчислителна мощност на трансформатора, чрез която се оценява разходът на активни материали.

Прието е, като типова мощност на специален силов трансформатор да се приема мощността на подобен силов трансформатор, в който е вложено същото количество активни материали при еднакви електромагнитни натоварвания (токова плътност, магнитна индукция и др.). Това означава, че нормалният силов трансформатор служи като критерий за икономичност на специалния силов трансформатор.

Аналогично се дефинира и понятието типова мощност на дадена намотка - $P_{mн}$. Не е трудно да се види, че типовата мощност на една намотка може да се оцени чрез произведението от общия брой навивки на намотката и сечението на проводника на намотката.

Типовата мощност е полезна при проектирането на електропещни трансформатори и агрегати, т.к. дава възможност на изчислителя да се ориентира при избора на размерите на магнитопровода. Освен това, може предварително да се

оцени разхода на активни материали, което е много важно при офертната дейност.

На практика това става с помощта на така наречения коефициент на типова мощност, който представлява отношение на типова мощност към номиналната мощност на трансформатора

$$K_m = \frac{P_m}{P_n} \quad (1)$$

респективно за произволна намотка

$$K_{mn} = \frac{P_{mn}}{P_n}. \quad (2)$$

За един ЕПТ, коефициентът на типова мощност е

$$K_m = \frac{K_{mn1} + K_{mn2} + \dots + K_{mnx}}{2} \quad (3)$$

2.3. Първично напрежение. Напрежението зависи от мощността на трансформатора. Колкото мощността на трансформатора е по-голяма, толкова първичното напрежение е по-високо. Това е свързано с факта, че трябва да се ограничават колебанията на напрежението в електрическата мрежа при к.с. в електрическата пещ. Изследванията показват, че за постигане на голям ефект, мощността на захранващата мрежа трябва да е десетки и стотици пъти по-голяма от мощността на ЕП при к.с. При ниски мощности захранващото напрежение е до 35kV. При големи мощности, захранването е от електрически мрежи за напрежения 110kV - 220kV. Предимството е очевидно - премахва се междинната трансформация на напрежението. Разбира се, повишаването на първичното напрежение на ЕПТ е свързано и с редица проблеми при оразмеряването му. Появяват се пренапрежения при прекъсване на дъгата на пещта, което налага да се увеличи електрическата якост на изолацията на трансформатора.

2.4. Вторичен ток. По този параметър трансформаторите за електрически пещи се различават от нормалните силови трансформатори. Вторичните токове достигат десетки и стотици kA, в зависимост от типа на ЕП.

2.5. Вторично напрежение. За осигуряване на нормално горене на дъгата на електрическата пещ е необходимо на вторичната страна да се осигури ниско напрежение. Обикновено тези напрежения са с малки стойности (80 - 500 V). Дори и при големи мощности не превишават 900-1000 V [2].

Относително ниските вторични напрежения и големите стойности на вторичните токове оказват голямо и решаващо влияние върху конструкцията на ЕПТ.

На всяко регулировъчно стъпало ЕПТ има своя номинална стойност на вторичното напрежение, което е различно от стойността на вторичното напрежение при товар за същото стъпало.

Максималната стойност на вторичното напрежение на трансформатора се определя от напрежението на дъгата и спада на напрежението в електрическата уредба. Напрежението на дъгата се определя от мощността на пещта и от максималния ток, който може да премине през електродите. Очевидно е, че с нарастване на мощността, нараства и максималното вторично напрежение.

Минималната стойност на вторичното напрежение се определя по-трудно. Зависи от стойността на минималната мощност, необходима в процеса на рафиниране на разтопения материал, а последната се колебае силно в зависимост от провеждането на технологичния процес и качеството на стоманата, което трябва да се получи. Проучванията показват, че минималната стойност на вторичното напрежение е в границите от 2 до 3,5 пъти по-ниско от максималното вторично напрежение.

2.6. Дълбочина на регулиране на вторичното напрежение. Съгласно [4], [5], диапазонът на регулиране при нормалните силови трансформатори е от порядъка $\pm 16\%$ от напрежението на основното отклонение. При този тип трансформатори това е достатъчно за да се поддържа необходимото ниво на напрежението при промяна на товара.

При ЕПТ, регулирането на напрежението има друга функция, която е свързана с технологичния процес на ЕП. Задачата на регулирането е да се поддържа постоянен вторичен ток или пък изменение на вторичния ток по определен закон предварително зададен от потребителя. Като се вземе предвид и това, че при ЕПТ няма основно регулировъчно отклонение, то приетите съгласно стандарта диапазони на регулиране за нормалните силови трансформатори, не са достатъчни за специалните трансформатори. Ето защо при ЕПТ се използва понятието дълбочина на регулиране на напрежението. Тя се дефинира с изрза

$$K_u = \frac{U_{2\max}}{U_{2\min}} \quad (4)$$

където $U_{2\max}$ и $U_{2\min}$ са максималното и минималното вторични напрежения. Обикновено K_u е в границите от 2,2 до 3,5. В някои отделни случаи достига стойности по-големи от 3,5.

На практика въпросът с регулирането се решава като намотка високо напрежение се изпълнява с определен брой отклонения, които се превключват с помощта на стъпални регулатори, монтирани в казана на електропещния трансформатор.

2.7. Напрежение на късо съединение – една от най-важните характеристики на ЕПТ. Със стойността на това напрежение са свързани съответно кратността на тока на к.с. на трансформатора, респективно неговата електродинамична якост и загубите на трансформатора при товар. Изследванията показват, че за всеки ЕПТ напрежението на к.с. е приблизително равно на реактивната съставка на неговото съпротивление.

В случаите когато съпротивлението на трансформатора е малко, се налага изкуствено увеличение на напрежението на к.с. (при трансформатори с мощност по-малка от 800 kVA). Въпросът се решава чрез включване на токоограничаващи реактори последователно с намотка високо напрежение. При по-големи мощности расте относителното съпротивление на късата мрежа и на самия ЕПТ, съответно последният може да се изпълни с нормална стойност на напрежението на к.с., като отпада необходимостта от токоограничаващ реактор.

При избора на подходяща стойност на напрежението на к.с. трябва да се има предвид и това, че при големи стойности на реактивното съпротивление на тран-

сформатора се налага включване на кондензаторни установки за напречна и надлъжна компенсация на горното. Това показва, че изборът на напрежението на к.с. при ЕПТ е доста сложен въпрос.

2.8. Конструктивни особености - поради по-големия диапазон на регулиране на напрежението и по-големи стойности на вторичните токове (десетки и стотици kA), регулационната намотка при ЕПТ е отделно от намотка високо напрежение и е с геометрични размери както останалите намотки.

Тъй като отношението на максималното вторично напрежение към съответното минимално (т.е. дълбочината на регулиране) достига 3,5 и повече, то често се стига до конструкции при които регулационната намотка е с радиални размери от порядъка на намотка високо напрежение. В практиката се срещат и конструкции при които регулационната намотка е с радиален размер по-голям от намотка високо напрежение. Освен това, разположението на намотка ниско напрежение при ЕПТ се различава от това при силовите трансформатори.

Много често по разположение тя е най-външна в конструкцията. Обикновено намотка високо напрежение е средна по разположение, а регулационната намотка е най-вътрешна. В случаите когато напрежението на к.с. на трансформатора се изменя слабо, намотка високо напрежение е най-вътрешна , а регулационната намотка е средна по разположение, т.е. тя се намира в главния канал на разсейване.

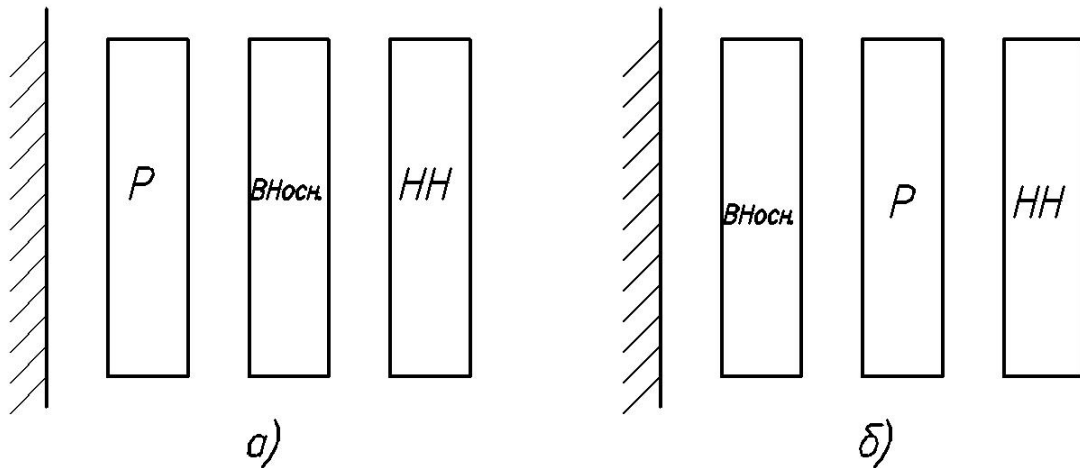
На фиг.2.а,б и фиг.3.а,б са показани няколко варианта на разположение на намотките на ЕПТ спрямо ядрото му.

Изпълненията по фиг.2 се характеризират с разполагане на намотка ниско напрежение отвън и се прилагат при трансформатори с големи мощности, респективно големи вторични токове.

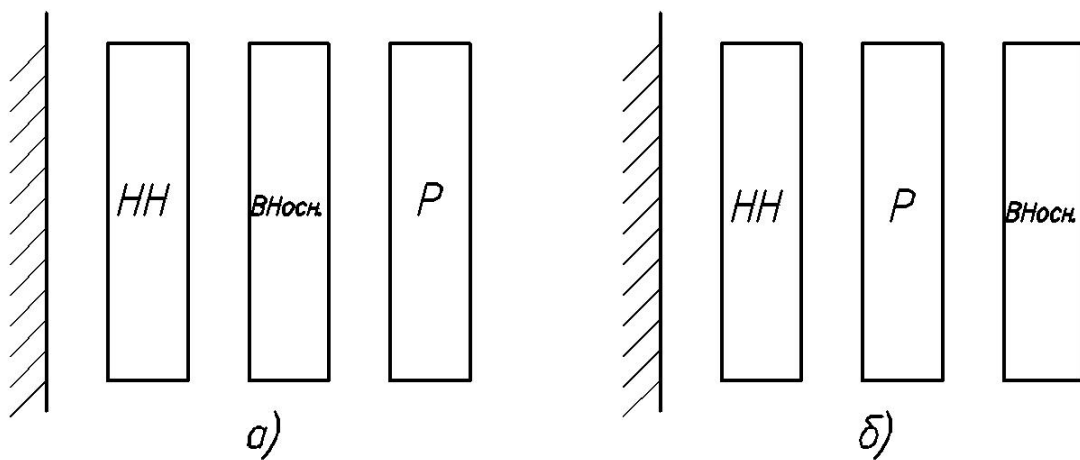
От гледна точка на електродинамичната якост, схемата от фиг.2.а е по-благоприятна, защото регулационната намотка е извън главния канал на разсейване.

По отношение на изменението на напрежението на к.с. за стъпалата с по-ниско вторично напрежение, схемата от фиг.2.б е по-благоприятна от схемата на фиг.2.а. Това обаче не винаги е от значение при трансформатори с включен токоограничаващ реактор, защото при схемата от фиг.2.б намотка високо напрежение е подложена на големи електродинамични сили, което е от решаващо значение за стабилността на трансформатора.

Схемите от фиг.3.а,б намират приложение при ЕПТ с по-малка мощност, респ. малки вторични токове.



фиг. 2



фиг. 3

3. Изисквания към ЕПТ

Електропещните трансформатори трябва да удовлетворяват изискванията на технологичния процес и да имат висока надеждност, т. к. всяка повреда на трансформатора води до спиране на работа на ЕП. Ето защо към ЕПТ се предявяват следните изисквания:

-да допуска регулиране на вторичното напрежение в широки граници – от $U_{2\max}$ до $U_{2\min}$, т.е. да допуска дълбочина на регулиране на напрежението по-голяма от 3;

-да допуска претоварване по ток до 20% [5] в продължение на 1,5 – 2 часа (докато продължава разтопяването на материала);

-да притежава достатъчна топлинна устойчивост с оглед повишената температура в работните килии;

-да има достатъчна електрическа якост на намотките и на превключващото устройство с оглед възникването на комутационни пренапрежения при честите превключвания, както и при прекъсванията на дъгата в ЕПТ;

-да притежава надеждно превключвателно устройство под товар, с достатъчна електрическа и механична износоустойчивост, предвид на значително по-честите превключвания, отколкото при нормалните силови трансформатори;

-да издържа без повреда къси съединения на вторичната страна, предизвикани от попадане на метална маса върху електродите в процеса на разтопяване;

-да осигурява ограничаване на тока на к.с. до 3-4 пъти от номиналния ток [2];

-конструкцията да бъде изпълнена с повишена механична якост по отношение на укрепването на намотките и отводите.

Едно от основните и важни изисквания към ЕПТ е да могат да регулират вторичното напрежение U_2 в широки граници. Практиката показва, че от начина на регулиране на напрежението, т.е. от избора на схемата за регулиране до голяма степен зависи конструкцията на ЕПТ, респективно неговите технико-икономически показатели. Разбира се за избора на една или друга схема на регулиране на напрежението влияят много фактори. Към тях спадат:

-транспортни ограничения (шосейни и влакови);

-използване на превключващи устройства (превключване без товар или под напрежение);

-обезпечаване на необходима електродинамична устойчивост на ЕПТ;

-осигуряване на съответна импулсна якост.

4. Заключение

От направените проучвания става ясно, че в Република България на този етап няма стандарт за ЕПТ. В работата са отразени някои особености по които този тип трансформатори се различават от нормалните силови трансформатори. Формулирани са основните изисквания предявявани към електропещните трансформатори и електропещните трансформаторни агрегати. Дадена е обосновка за избора на една или друга конструктивна схема на ЕПТ.

От анализа следва, че въпросите с избора на подходяща схема на регулиране на напрежението на вторичната страна и напрежение на к.с. при електропещните трансформатори са доста сложни и изискват подробно проучване, подходящ анализ и практически опит.

5. Литература

- [1] Дачев А. *Специални силови трансформатори*. Техника.София.1967.
- [2] Аншин В.Ш., А.Г.Крайз, В.Г.Мейксон. *Трансформаторы для промышленных электропечей*. Москва. Энергоиздат. 1982.
- [3] Аншин В.Ш., В.Г. Мейксон, А.Е. Рыбаков. *Мощные трансформаторы для промышленных электропечей*. Электротехническая промышленность. Серия Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1972, вып. (19), 10.
- [4] БДС.5456-80. *Трансформатори. Терминология*. С., 1981.
- [5] БДС.5060-84. *Трансформатори силови еднофазни и трифазни, двунамотъчни и тринмотъчни с номинални мощности от 2000 до 63000 kVA и номинални напрежения до 220 kV с медни и алуминиеви намотки. Електрически параметри*. С., 1985.
- [6] БДС.10521-85. *Трансформатори и автотрансформатори еднофазни и трифазни, двунамотъчни и тринмотъчни с номинална мощност до 100 MVA с общо предназначение. Допустими натоварвания*. С., 1986.

Автори: Кирил Стойков, гл.ас. - катедра “Обща електротехника”, E-mail address: k_stoykov@tu-sofia.bg; Стефан Стайков, доц. д-р - катедра “Обща електротехника”, E-mail address: staykov@tu-sofia.bg; Калинка Годорова, гл.ас. - катедра “Обща електротехника”, E-mail address: ktodorova@tu-sofia.bg;

Постъпила на 07.07.2011

Рецензент Доц. д-р Живко А. Даскалов

ОСОБЕНОСТИ ПРИ РЕГУЛИРАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЕТО НА ЕЛЕКТРОПЕЩНИ ТРАНСФОРМАТОРИ С МОЩНОСТ ПО-МАЛКА ОТ 1000 kVA

Кирил Стойков

Резюме: В работата са изведени някои общи зависимости и е извършен анализ на някои схеми за директно регулиране на напрежението при електропещни трансформатори с мощност по-малка от 1000 kVA. Разгледани са схеми с токоограничаващи реактори.

Ключови думи: електропещен трансформатор, регулиране на напрежението, токоограничаващ реактор.

SOME PROBLEMS IN VOLTAGE CONTROL OF FURNACE TRANSFORMERS WITH POWER LOWER 1000kVA

Kiril Stoykov

Abstract: In the paper are generated some main relations for direct control of the voltage in furnace transformers with power lower of 1000kVA. The analysis of some basic schemes and schemes including current-limiting reactors are also discussed.

Keywords: furnace transformer, direct voltage regulation, current-limiting reactor.

1. Въведение

Електропещните трансформатори работят в режим на експлоатационни къси съединения, които достигат до 300 - 400 броя за час [1] [2] [3]. Ето защо те трябва да удовлетворяват изискванията на технологичния процес и да имат висока надежност. Всяко изключване (повреда) на електропещния трансформатор води до спиране на електрическата пещ, респек. до загуби (технически и икономически). Това налага ограничаване на тока на к.с. до 3 – 4 пъти от I_n . За тази цел, при трансформатори с мощност по-малка от 1000 kVA се налага изкуствено завишаване на напрежението на к.с. или на допълнително включване последователно на трансформатора токоограничаващ реактор.

При трансформатори с големи мощности расте относителното съпротивление на късата мрежа, което позволява трансформаторът да се изпълни с нормална стойност на напрежението на к.с., т.е. да отпадне необходимостта от токоограничаващ реактор.

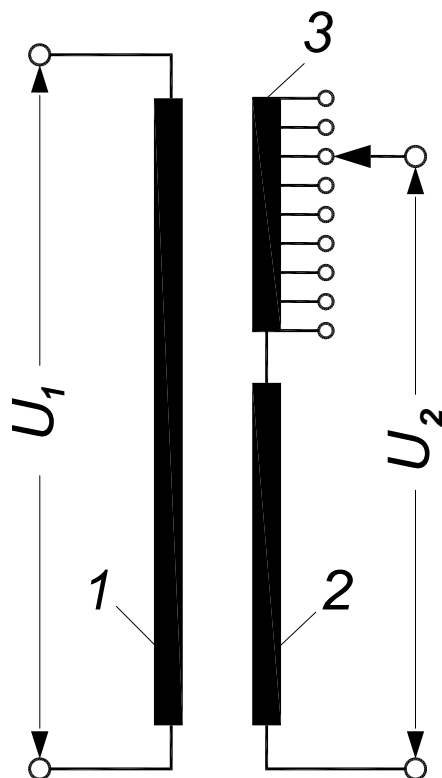
2. Изложение

Едно от основните изисквания на електропещния трансформатор е да може да регулира напрежението на вторичната страна в широки граници - от U_{\max} до U_{\min} . Възможностите за регулиране на напрежението се виждат от израза:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}, \quad (1)$$

където U_1 и U_2 са ефективните стойности на напреженията на първичната и вторична страни; w_1 и w_2 - съответно броя на навивките на първичната и вторична намотки (w_1 съдържа навивките на намотка високо напрежение и на намотка регулационна).

Най-простият начин за регулиране на напрежението на вторичната страна е чрез изменение на броя на навивките w_2 (фиг.1).



фиг.1. Схема за регулиране на напрежението чрез изменение на броя на навивките на вторичната страна - w_2

Това е директна еднократна трансформация на напрежението.

Магнитният поток в магнитопровода е константен, а вторичното напрежение се изменя от 0 до максималната си стойност.

Този начин на регулиране на напрежението не може да се прилага при трансформатори с големи мощности, т.е. с големи стойности на вторичния ток, което е свързано с:

- малък брой навивки на вторичната страна, т.е. малък брой стъпала;

-големи трудности при извеждане на отклоненията от вторичните навивки (много големи токове);

-големи електродинамични сили, които се овладяват доста трудно;

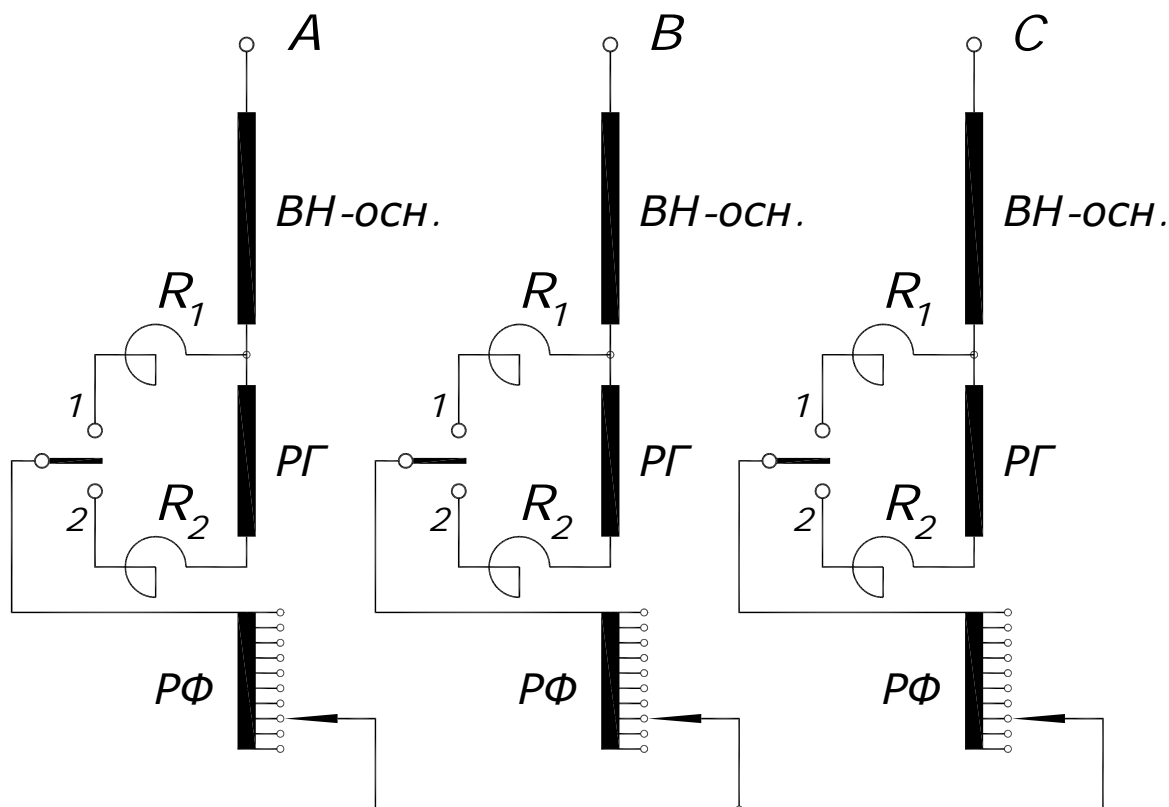
-увеличени загуби от полето на разсейване поради електромагнитната асиметрия;

-практически е невъзможно да се осъществи превключващо устройство (стъпален регулатор) под товар поради големите стойности на вторичния ток.

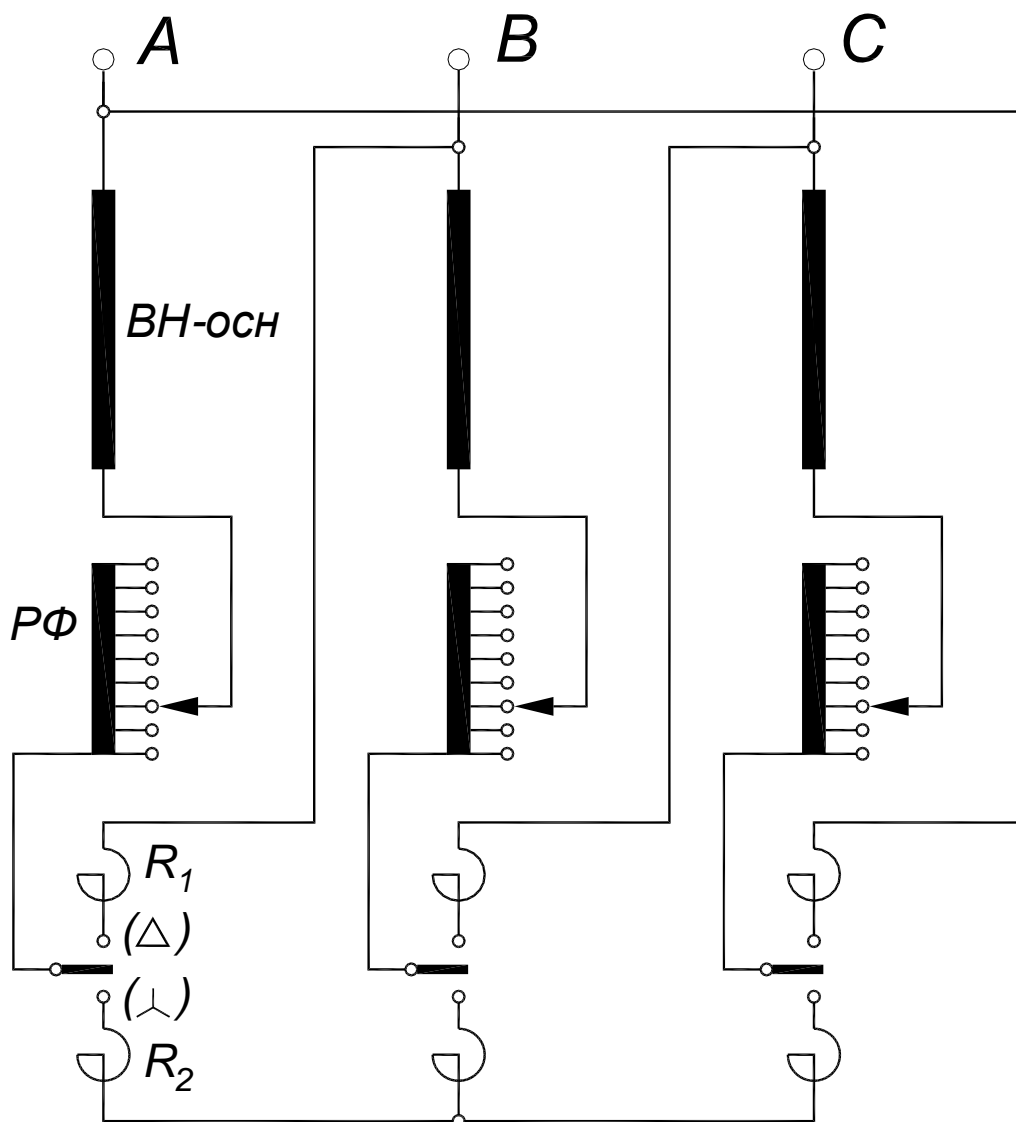
Проучванията показват, че на практика този начин на регулиране се прилага в редки случаи и то за токове по-малки от 1000 А на вторичната страна.

За токове по-големи от 1000 А, регулирането се пренася на първичната страна, т.е. чрез изменение на навивките на намотка високо напрежение.

На фиг.2 и фиг.3 са показани две схеми за регулиране на напрежението по метода на “индукционното” регулиране, т.е. чрез изменение на индукцията в магнитопровода. И двете схеми съдържат токоограничаващи реактори R_1 и R_2 .



Фиг.2. Схема с два реактора свързани в звезда



Фиг.3. Схема с два реактора и превключване на намотка регулационна от триъгълник в звезда и обратно

Намотка високо напрежение (фиг.2) е свързана в звезда и съдържа – основна (ВН-осн.) намотка, намотка с грубо стъпало (РГ), два токоограничаващи реактора, които се включват и изключват с помощта на обръщача на стъпалния регулатор и намотка регулационна с фини стъпала (РФ). Трансформаторът не се изключва от мрежата за целия диапазон на регулиране.

Схемата от фиг.3 позволява разширяване на обхвата на регулиране чрез превключване на намотка високо напрежение от електрическо съединение “звезда” в електрическо съединение ”триъгълник” и обратно.

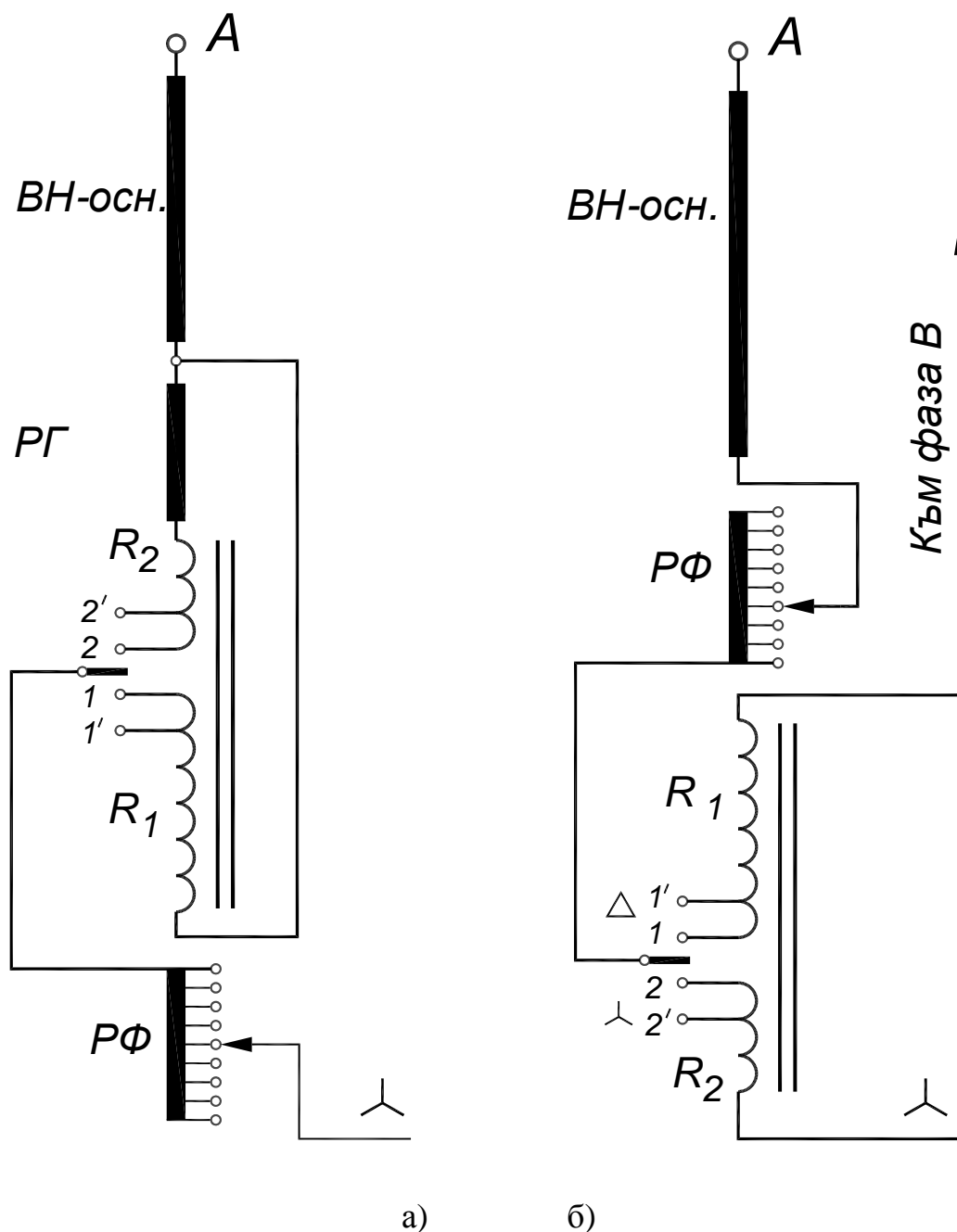
Не е трудно да се види, че при схемата от фиг.3 оразмеряването на регулационната намотка се определя от диапазона $\sqrt{3} : 1$, ($U_{\phi} = U_{л} / \sqrt{3}$, т.е. регулационната намотка съдържа значително по-малък брой навивки спрямо схемата от фиг.2. Като недостатък на схемата може да се посочи това, че при превключването

трансформаторът се изключва от мрежата. Направените проучвания показват, че това не пречи на производствения процес.

При схемата от фиг.3 се избягва грубото стъпало, броят на намотките намалява с една, опростява се извеждането на отводите.

И за двете схеми токоограничаващият реактор R_1 е включен за първата половина от стъпалата, които съответстват на по-високите вторични напрежения. За ниските стойности на вторичните напрежения реакторът е изключен.

При необходимост от реактор и за ниските вторични напрежения, но с друга стойност на индуктивното съпротивление, схемите могат да се изпълнят с втори реактор R_2 , като се използва една и съща магнитна верига.



Фиг.4. Схема на два реактора с обща магнитна верига

На фиг.4.а и фиг.4.б е показано конструктивно изпълнение на схеми с два реактора използващи една и съща магнитна верига. Отклоненията 1' и 2' са резервни отклонения, т.е. при необходимост от по-малко индуктивно съпротивление.

Намотките на двата реактора са с различен брой навивки, които съответстват на индуктивното им съпротивление предвидени за съответната схема.

И при двете схеми, независимо от включените токоограничаващи реактори е налице директна трансформация на напрежението. Разбира се, тези схеми са по-неикономични, защото токоограничаващите реактори представляват отделни електромагнитни единици и участват в схемата на регулиране като отделно грубо стъпало.

Проучванията показват, че освен общоприетите изисквания към регулационните намотки за нормалните силови трансформатори, към регулационните намотки на електропещните трансформатори се поставя и изискването броят на навивките на отделните стъпала да се оразмери така, че възможност вторичното напрежение да се изменя по-равномерно, а стъпалните напрежения в момента на превключването да бъдат приблизително еднакви [4]. Вижда се, че последното изискване е тясно свързано с конструкцията на регулационната намотка.

От (1) следва, че най-просто конструктивно решение се получава когато всички стъпала са с еднакъв брой навивки (w_{ct}) [5]. Това се изпълнява при многоходовите винтови или при цилиндрични намотки.

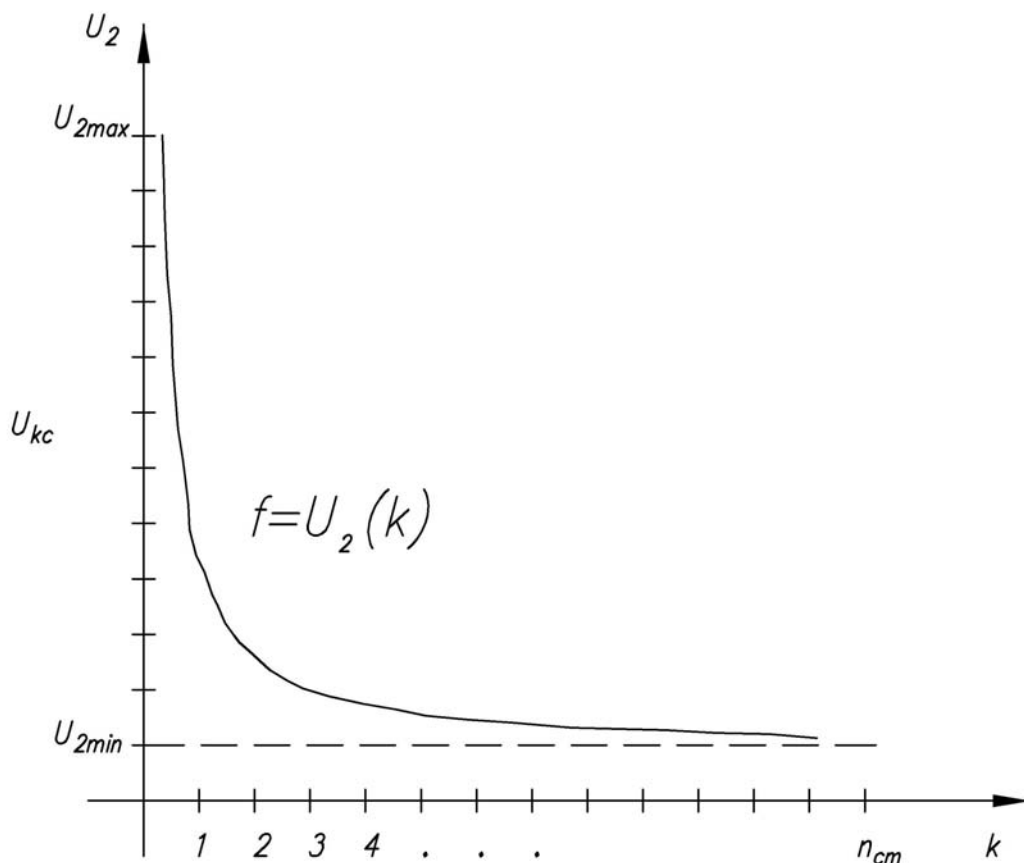
Вторичното напрежение при "k" включени стъпала е

$$U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1}, \quad (2)$$

където $w_1' = w_{осн.} + w_{R1}$ при включен реактор R_1 , и $w_1' = w_{осн.} + w_{пг} + w_{R2} + kw_{ct}$ при включен реактор R_2 е брой на навивките на цялата намотка високо напрежение, k - номер на включеното стъпало, w_{R1} - брой на навивките на намотката на първи реактор, w_{R2} - съответно на втори реактор.

От (2) става ясно, че при изменение на броя на стъпалата от 0 до пълния брой стъпала, вторичното напрежение $U_2(k)$ се изменя по хиперболичен закон (фиг.5). Това означава, че разликата между стойностите на вторичните напрежения за съседните стъпала ще бъде голяма в областта на максималните вторични напрежения и малка в областта на минималните вторични напрежения. Този режим на работа е неблагоприятен за стъпалния регулатор, тъй като той ще работи с повишени стъпални напрежения в областта на високите вторични напрежения, които се овладяват много трудно. Очевидно, за да се облекчи работата на стъпалния регулатор, в областта на високите вторични напрежения, респективно високите навивкови напрежения, стъпалото трябва да бъде с минимален брой навивки, а в областта на минималните навивкови напрежения, стъпалото трябва да бъде с максимален брой навивки. На практика това означава броят на навивките за стъпало да бъде различен, което е трудно да се осъществи конструктивно.

При известно фазово напрежение U_1 , обхват на регулиране на фазното вторично напрежение - U_{2max} и U_{2min} , броя на навивките на намотка високо напрежение ($w_{ВНОСН}$), броя на навивките на намотка регулационна (w_P), броя на навивките на токоограничаващия реактор (w_R) и броя на навивките на вторичната намотка (w_2), за вторичните напрежения се извежда зависимостта за схемата от фиг.2



Фиг.5. Изменение на вторичното напрежение при директно регулиране на напрежението

Съответното максимално и минимално вторично напрежение ще бъде:

$$U_{2max} = U_{1\phi} \frac{w_2}{w_{BH} + w_{R1}} \quad (3)$$

$$U_{2min} = U_{1\phi} \frac{w_2}{w_{BH} + w_{P1} + w_{R2} + w_{P\phi}} \quad (4)$$

След разделяне на горните равенства и въвеждане на величината дълбочина на регулиране $K_U = \frac{U_{2\max}}{U_{2\min}}$, ($K_U > 1$), за броя на навивките на регулационната намотка се получава (5):

$$w_P = (K_U - 1) \cdot w_{\text{ВНОСН}} + K_U w_{R1} - w_{R2} \quad (5)$$

Често, по конструктивни съображения се приема $w_{R1} = w_{R2} = w_R$. Тогава, за броя на навивките на регулационната намотка се извежда (6)

$$w_P = w_{\text{ВНОСН}} (K_U - 1) + w_R (K_U - 1) \quad (6)$$

Броят на навивките за цялата намотка високо напрежение е (7):

$$w' = (w_{\text{ВНОСН}} - w_R) K_U ; \quad (7)$$

-за схемата от фиг.3 (превключване на намотка ВН от “триъгълник” в “звезда”), аналогично на горните разсъждения се записва:

$$U_{2\max} = U_1 \frac{w_2}{w_{\text{ВНОСН}} + w_R} \quad (8)$$

(тук намотка високо напрежение е свързана в триъгълник - $U_{\text{Л}} = U_{\Phi}$);

$$U_{2\min} = U_1 \frac{w_2}{\sqrt{3} (w_{\text{ВНОСН}} + w_{\text{РГ}} + w_{R2} + w_{\text{РФ}})} \quad (9)$$

(тук намотка високо напрежение е свързана в звезда $U_{\Phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}$).

За броя на навивките на намотка регулационна се извежда:

$$w_P = \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right) w_{\text{ВНОСН}} + \frac{K_U}{\sqrt{3}} w_{R1} - w_{R2} \quad (10)$$

При $w_{R1} = w_{R2} = w_R$,

$$w_P = \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right) w_{\text{ВНОСН}} + \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right) w_R \quad (11)$$

Броят на навивките за цялата намотка високо напрежение (основна и регулационна) е (12):

$$w' = (w_{\text{ВНОСН}} - w_{\text{R}}) \frac{K_{\text{U}}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

За да се направи оценка на анализиранияте схеми по отношение на тяхната икономичност се въвежда така наречения коефициент на регулиране K_{WP} , който се получава като отношение на броя на навивките на регулационните намотки за двете схеми. В случая уравнение (6) и (11), или

$$K_{\text{WP}} = \frac{w_{\text{ВНОСН}} (K_{\text{U}} - 1) + w_{\text{R}} (K_{\text{U}} - 1)}{\left(\frac{K_{\text{U}}}{\sqrt{3}} - 1\right) \cdot w_{\text{ВНОСН}} + \left(\frac{K_{\text{U}}}{\sqrt{3}} - 1\right) w_{\text{R}}} = \sqrt{3} \frac{K_{\text{U}} - 1}{K_{\text{U}} - \sqrt{3}} \quad (13)$$

Последният израз (13) е в сила при $K_{\text{U}} > \sqrt{3}$.

Нека $K_{\text{U}} = 3,5$, тогава $K_{\text{WP}} = 2,449$, което показва, че броят на навивките на регулационната намотка за схемата от фиг.2 е 2,449 пъти по-голям от броя на навивките на регулационната намотка за схемата от фиг.3.

3. Заключение

Изведени са някои общи зависимости за определяне на броя на навивките на регулационните намотки и е извършен анализ на някои схеми за директно регулиране на напрежението при електропещни трансформатори с мощност по-малка от 1000 kVA. Разгледани са особеностите на схеми с токоограничаващи реактори.

Получените аналитични зависимости дават възможност да се направи предварителна оценка при каква дълбочина на регулирането на напрежението могат да се прилагат горните схеми. Освен това, за случаите когато дълбочината на регулиране е по-малка от $\sqrt{3}$ се получават отрицателни стойности за регулационната намотка (за схемата от фиг.3), т.е. разглеждането на тези случаи нямат физически смисъл. Това всъщност е недостатък на тази схема с директно регулиране на напрежението. Схемата от фиг.2 е лишена от този недостатък. Тя може да се прилага и при $K_{\text{U}} < \sqrt{3}$.

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тихомиров, П.М. *Расчет трансформаторов для дуговых электрических печей*. Госэнергоиздат, М. – Л., 1959.
- [2] Sigaudi G.L. *Furnace transformers*. Proceedings of the Scientific Jubilee Conference “The Transformer Production is 100 years old”. Budapest, 18-21 June, 1985.

[3] Dachev A., Behar Y., Dacheva R., Stoykov K. *Some Problems with Designe of Furnace Transformers with Direct Voltage Regulation*. Proceedings of the Scientific Jubilee Conference “ The Transformer Production is 100 years old ”. Budapest, 18-21 June, 1985, стр.

[4] Дачев А., К. Стойков. *Анализ и сравнение на някои схеми за директно регулиране на напрежението на електропещни трансформатори. Доклад на младежки симпозиум “СИЕЛТ 83”*. Пловдив, 1983.

[5] Аншин В.Ш., Крайз А.Г., Мейксон М.Е. *“Трансформаторы”*. *Трансформаторы для промышленных электропечей*. Энергоиздат, Москва, 1982, стр. 20 – 23.

Автор: Кирил Стойков, гл. ас. - катедра „Общаелектротехника”, Технически Университет - София, E-mail address: *email: k_stoykov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 16.09.2011

Рецензент доц. д-р Живко А. Даскалов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИТЕ НА ПЛАЗМЕНО ПОВЪРХНОСТНО АКТИВИРАНЕ С ДИЕЛЕКТРИЧЕН БАРИЕРЕН РАЗРЯД - I част

Петър Динев, Диляна Господинова, Ивалина Аврамова,
Тодорка Владкова, Кармен Гайдау

Резюме: Плазмено подпомогнатата защита чрез забавители на горенето на дърво, дървени изделия и целулозни материали, на текстилни и кожени изделия е замислена и разработена като резултат от появата и развитието на плазмено подпомогнатата капилярна импрегнация. Предшестващото капилярната импрегнация плазмено химично активиране (и функционализиране) променя съществено електрическата, химичната и капилярната активност на порестата повърхност, което от своя страна определя подобряването на такива характеристики на импрегнационния процес като дълбочина на проникване, скорост на разпространение и адсорбция на импрегнационния разтвор, количество на сухото вещество „внедрено“ внедрено през повърхността на порестата среда.

Ключови думи: диелектричен бариерен разряд, плазмено подпомогнатата капилярна импрегнация, забавители на горенето.

INVESTIGATION ON DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE SURFACE ACTIVATION EFFECTS - part I

Peter Dineff, Dilyana Gospodinova, Ivalina Avramova,
Todorka Vladkova, and Carmen Gaidau

Abstract: The plasma aided flame retardation of wood, wooden products and cellulosic fibrous materials has been conceived and developed as a result of a plasma aided process of capillary impregnation. The dielectric barrier discharge surface pre-treatment modifies the chemical and capillary activity and improves such characteristics of the impregnation process as the penetration depth, speed of solution spreading and adsorption, and capacity of adsorbed solution.

Keywords: dielectric barrier discharge, plasma aided capillary impregnation, flame retardation of porous media (wood, polymer materials, leather, textile).

1. Introduction

The plasma aided flame retardation of wood, wooden products and cellulosic fibrous materials has been conceived and developed as a result of a new plasma aided process of capillary impregnation. The ability of the wood matrix to adsorb

water is thus of critical importance for the water solution capillary impregnation of the wood. The plasma-chemical surface pre-treatment modifies the chemical activity of wood surface as well as the its capillary activity and improves such technological characteristics of the impregnation process as the penetration depth, speed of solution spreading and adsorption, and specific quantity of adsorbed solution per unit of surface area. This allows using the plasma aided retardation as a finishing process and applying it “in situ”. A system of plasma device and applicators has been created to produce cold technological plasma through dielectric barrier discharge (DBD) at atmospheric pressure and room temperature [1, 2].

It is well known that heat treatments and machining reduce the wood wettability and chemical activity by modifying this water-reactive matrix in different ways. We found earlier that the cold plasma pre-treatment of soft wood, like pine (*Pinus sylvestris*), improves technological characteristics such as a solution spreading and adsorption speed, as well as a specific amount of the adsorbed flame retardant. In this way, the plasma pre-treatment of pine wood improves its flame retardation and allows “in situ” performance of the procedure [3, 4].

Douglas fir (*Pseudotsuga*) is a largely used wood in a lot of building constructions, flooring, timbers, but its flame retardency by capillary (or surface) impregnation is difficult due to its relatively high density and surface inactivation. Therefore the impregnation of this type of wood is often performed under high pressure or vacuum, the procedure requiring complicated apparatus and machines and a simple geometric shape of the constructions, i.e. lumbers or timbers. In addition, the flame retardency is successful at flame retardant penetration depth of 10÷15 mm but than an unacceptable decrease (down to 30 %) of the wood mechanical parameters arises, [5].

We investigated the effect of plasma pre-treatment onto the wood surface activation (or functionalization) as well as the effect of different surfactant systems onto the ionic activity of the impregnation solution, both aimed at improvement of Douglas fir wood flame retardation. Some experimental results of this investigation are presented here: alteration the wood surface chemical composition or surface functionalization as a result of the cold plasma pre-treatment at atmospheric pressure and room temperature monitored by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS-) analyses; impregnating solution impregnation on bare or plasma pre-treated Douglas fir wood without or with addition of a surfactant to the impregnating solution and the change of wood thermal degradation as a result of a flame retardation under different conditions monitored by thermal analysis (TGA, DTA, DSC).

2. Experimental

Douglas fir soft wood (*Pseudotsuga menziesii*, Canada), density of 678 g/cm³ and moisture content of 7.8 %) and pine soft wood (*Pinus Sylvestris*, Bulgaria) were used in this investigation. Capillary impregnation test samples with size of 5x30x150 mm were manufactured by heard wood.

On the basis of the prior art as well as on a own former experience in the plasma

aided impregnation of wood and wooden materials, [6, 7], an oxidative surface plasma pre-treatment on a part of the test samples was performed for 1 min in a dielectric barrier air discharge at atmospheric pressure at industrial frequency (50 Hz) and two voltage – 10 and 15 kV, oxygen and ozone or nitrogen oxides (NO_x) respectively non-equilibrium cold plasma, and increased frequency (10 kHz) at voltage of 10 kV.

The *DBD* plasma system was consisted of a coplanar shaped rectangular electrodes with one glass barrier (thickness of 3 mm) arranged closeness to grounded electrode with operating distance between high voltage electrode and barrier of 6 mm, Fig 1a. The *DBD* was assured by two different - low frequency (50 Hz) and high frequency (10 kHz), voltage generators. The wood samples were disposed in operating volume and treated for one minute (60 sec) under chosen frequencies and voltages.

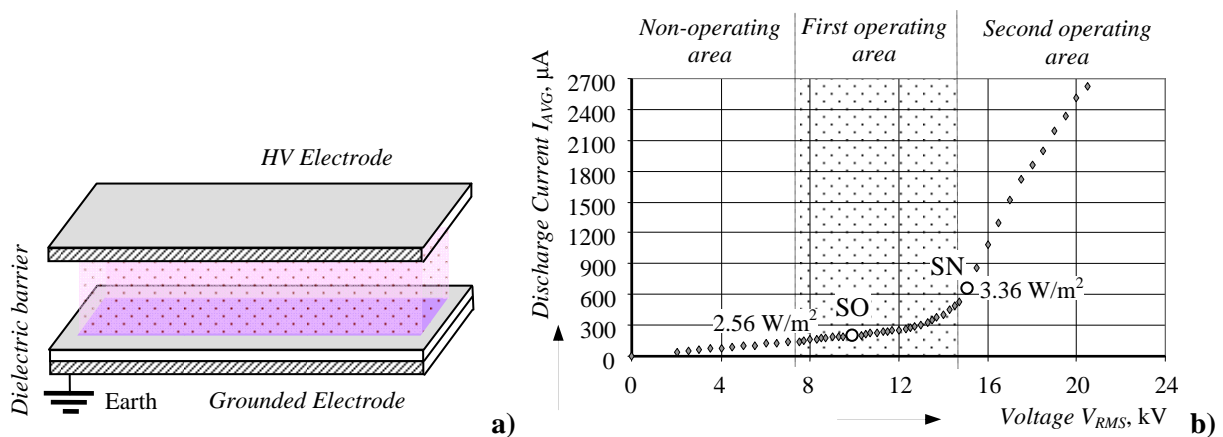


Fig. 1. Dielectric barrier discharge coplanar electrode system with one glass barrier (a), static volt-ampere characteristic $I_{AVG} - V_{RMS}$, and regimes of plasma pre-treatment at industrial frequency of 50 Hz - SO: voltage of 10 kV (RMS); real specific power 2.56 W/m^2 , and SN: voltage of 15 kV (RMS); real specific power 3.36 W/m^2 (b).

A tendency to the halogen containing flame retardants replacement by halogen-free ones is observed lately because of the toxicity of the halogens, [8]. A halogen-free, phosphorus and nitrogen containing flame retardant is used in this investigation in form of 30 w. % water solution. The impregnating water solution (*FRIS*, dry substance of 30 w. %; phosphorus content of 13 w. %, $\text{pH} = 7 \div 8$ and density of 1.14 g/cm^3) was based on a halogen free phosphorus and nitrogen containing flame retardant. A new flame retardant product on the basis of ortho-phosphorous acid, urea and ammonia was studied.

Wood inactivation is a surface phenomenon affecting just a thin outer layer of wood. An inactivated wood surface does not absorb capillary well an impregnating solution containing phosphorous compound as flame retardant. Plasma-chemical surface activation (functionalization) with an effective participation of ionic surfactants and silicone spreaders eliminates the inactivation-impregnating problem creating a protective flame retardant layer on the wood surface. The air plasma treatment gives different results from the nitrogen and oxygen treatments. Anionic surfactants (*AS*, “*Aniticrystallin A*“, Chimatech, Ltd., Bulgaria) in quantity of 5 vol. %, or silicone super spreader (*SSP*, Y-17113, Momentive Performance

Materials GmbH & Co. KG, Germany) in quantity of 0.1 vol. %, as well as their combinations, were used to control the ion activity of the flame retardant impregnation water solution. The capillary impregnation was performed on bare (for comparison) or plasma pre-treated Douglas fir wood samples at atmospheric pressure by spraying of the corresponding flame retardant solution (390 ml/m²).

X-ray photoelectron spectroscopy is a very powerful non-destructive surface analytical technique which provides valuable data on chemical surface composition and surface reorganization after plasma-chemical pre-treatment. XPS is a surface chemical analysis technique that can be used successful to analyze the surface chemistry of a material in its "as received" state, or after some treatment such as cold plasma pre-treatment. The binding energy is a characteristic of the atoms, which can be used for elemental identification. XPS-analysis for this work was carried out using a photoelectron spectrometer VGS ESCALAB Mk II with monochromatic AlK α radiation source ($FWHM = 0.5$ eV). The angle between the directions of the incident X-ray and that of the observations (fixed by analyzer entrance slit) was 50. XPS-spectra are obtained by irradiating a material with a beam of X-rays while simultaneously measuring the kinetic energy and number of electrons that escape from the top 1 to 10 nm of the material being analyzed. XPS detects all elements with an atomic number (Z) of 3 (lithium) and above. This limitation means that it cannot detect hydrogen ($Z=1$) or helium ($Z=2$). Detection limits for most of the elements are in the parts per thousand (ppm) ranges, [9].

The interpretation of the curve fit of the carbon C_{1s} peak after Kazayawoko (1998) was used to interpret the changes of wood surface chemistry after plasma pre-treatment, [10]. This study was developed as part of a large investigation on plasma-chemically activated and flame retarded wood surface, [1, 3, 4, 6, and 7].

Thermal analysis – thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), and differential thermal analysis (DTA), was performed in air at a heating rate of 50 °C /min in the temperature range of 25÷1200 °C using Perkins-Elmer equipment. The sample size was of about 3.0 mg.

3. Experimental results and discussion

The studied plasma aided capillary impregnation is based on both: a plasma-chemical pre-treatment of the wood surface and the impregnating flame retardant solution ion activity optimization, expecting that an increase of the wood capillary activity and the impregnating solution adsorption speed and capacity would allow performance of a good enough flame retardation of porous wood surface [1, 2, 7].

The dielectric barrier discharge surface activation effects or the expected surface reorganization and alternation of the chemical composition as a result of the plasma pre-treatment as well as of the flame retardant solution impregnation were monitored directly by XPS-analysis, and the bare and flame protected Douglas fir wood thermal behavior – by TGA, DTA, and DSC-analysis.

3.1. DBD activation effect and surface chemical composition

The inactivated wood surface usually contains the same components as the bulk but the proportions among polysaccharides, lignin and extractives may be substantially

different as a result of the different conditions and methods of surface formation. It is well known, [5] that a high temperature expose during drying, cutting, etc. inactivates the wood surface due to physical and chemical modifications leading to reduced ability of solutions to properly wet and penetrate. Thus, an inactivated wood surface makes difficult the impregnation. The plasma treatment cleaning the surface and changing its chemical composition impacts the surface wettability. Oxidative cold plasma treatment accompanied with an accumulation of oxygen containing groups on the surface usually increases its polarity and wettability, the effect depending on the operation conditions [1, 7].

Similar changes are the basis of the expecting *DBD* surface activation effect on the Douglas fir wood surface, plasma pre-treatment in three types of dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure was performed: *i) DBD* at industrial frequency (50 Hz) and relatively low voltage (10 kV) at which the major active species arise from ionized and activated air oxygen; *ii) DBD* at industrial frequency and relatively high voltage (15 kV) at which the major active species arise from ionized and activated air oxygen and nitrogen, Fig. 1; *iii) DBD* at high frequency (10 kHz) and relatively low voltage (10 kV) at which the major active species arise from both: ionized and activated air oxygen but the cold plasma density is higher [10, 11].

The surface chemical composition change after such plasma pre-treatment was monitored by comparative *XPS*-analysis of non-treated and plasma pre-treated Douglas fir wood samples and some results are presented in Table 1.

Table 1. Elemental composition of Douglas fir and pine heart wood surfaces before (*K*) and after plasma pre-treatment (*SO*, *SN*, *SHF*) determined from wide *XPS*-spectra.

Kind of Wood: Density, kg/m ³	Samples		Peaks	Chemical Surface Composition, at. %				
				C	O	N	nO/nC	nN/nC
Heart Douglas Fir wood (<i>Pseudotsuga menziesii</i> , Canada): 678 kg/m ³	<i>K</i> (Non-Treated)			77.69	21.79	0.52	0.28	0.0067
	<i>DBD</i> Pre- treated	<i>SO</i>	10 kV (50 Hz)	68.30	31.70	0.00	0.46	0.0000
		<i>SN</i>	15 kV(50 Hz)	69.10	29.90	1.00	0.43	0.0145
		<i>SHF</i>	10 kV (10 kHz)	74.00	25.50	0.50	0.34	0.0068
Heart Pine Wood (<i>Pinus Syl- vestris</i> , Bul- garia): 371 kg/m ³	<i>K</i> (Non-Treated)			74.80	24.40	0.70	0.33	0.0094
	<i>DBD</i> Pre- treated	<i>SO</i>	10 kV (50 Hz)	70.10	28.50	0.60	0.41	0.0086
		<i>SN</i>	15 kV(50 Hz)	70.40	29.00	0.60	0.41	0.0058
		<i>SHF</i>	10 kV (10 kHz)	73.50	26.10	0.40	0.36	0.0049

The *XPS*-wide spectra of pre-treated and untreated wood samples show three peaks at 285.0, 533.2, and 400.4 eV attributed respectively to C_{1s}, O_{1s} and N_{1s}. The elements carbon (C), oxygen (O) and nitrogen (N) were detected on the investigated Douglas fir wood surfaces. The nitrogen, detected on the non plasma treated - control sample, is most probably adsorbed on the surface from the ambient air. The atomic percents of the elements as well as of the carbon components (i.e., C1, C2 C3 and C4) were determined from the wide and high-resolution *XPS*-spectra - Table 1 and 2.

The presented in Table 1 data confirm the expected oxidation of the Douglas wood surface: *i*) the surface oxygen content of all Douglas fir wood plasma treated samples is higher (25.5÷31.7 at. %) as compared to that of the non-treated sample (21.79 at. %); *ii*) the total percentage of the surface carbon bonded to oxygen (the last column, Table 2) is also higher (41.9÷44.6 %) for all plasma treated samples compared to that (35.9 %) of the non-treated one; *iii*) the nO/nC ratio (Table 1) of plasma treated samples is higher (0.34÷0.46) compared to that (0.28) of the non-treated one. The plasma pre-treatment provoked oxidation of the Douglas wood surface is similar but in different degree to the plasma enhanced oxidation of the pine wood surface, Table 1 and 2.

According to *Kazayawoko et al.*, the high-resolution spectrum of the carbon peak C_{1s} showing the presence of different chemical states, or classes, of carbon on the bare wood surface (K). The C_{1s} peak was observed to consist of four main components, which were ascribed to four classes of carbon atoms present on wood surface: C1 (285.0±0.4 eV) – carbon atoms are those bonded to carbon or hydrogen atom; C2 (285.6±0.4 eV) - carbon atoms are bonded to a single non-carbonyl oxygen atom; C3 (288.0±0.4 eV) - carbon atoms are bonded to two non-carbonyl or to a single carbonyl oxygen atom, and C4 (289.5±0.4 eV) – carbon atoms are ascribed to the carboxyl oxygen group. C1, C2 and C3 states of carbon are the main components of the C_{1s} peak whereas the C4 component detects in some cases, Table 2, [10].

XPS-measurement results, Table 1 and 2, and carbon (C_{s1}) and oxygen (O_{s1}) peaks analysis, Table 2 and 3, lead to the conclusion that the air plasma-chemical surface modification of wood at atmospheric pressure by *DBD* is a useful and effective method for surface chemical activation of inactivated wood (*Douglas fir, pine*) by oxidation of lignin, resin and extractive materials. That is right because the *XPS*-analysis of the bare Douglas fir surface reveals by the nO/nC ratio (0.28) the existence of lignin (about 0.33), and resin and extractive materials (about 0.10) on the wood surface.

It is evident from the data in Table 2, different type of oxygen to carbon bonding (C-O; C=O; O-C-O; or O-C=O) is observed for the plasma pre-treated under different operation conditions Douglas fir wood samples, indicating the impact of the operation conditions on the wood surface oxidation. The C_{1s} peak was observed to consist a maximum increased C2 state of carbon (C-O) and increased C3 state (C=O, O-C-O) on the functionalized surface of Douglas fir wood samples (*SO*) under the first operating condition of *DBD* (50 Hz, 10 kV). The second operating condition of *DBD* (50 Hz, 15 kV) increased in maximum degree the C3 (C=O, O-C-O) and C4 state of carbon (O-C=O), but decreased the C2 state. The third operating condition of *DBD* (10 kHz, 10 kV) increased the third C2, C3 and C4 together Table 2. The air plasma-chemical functionalization of Douglas fir wood surface examined in the daylight of the alteration of carbon to oxygen bonding holds out opportunities for its controlling by the operating condition of *DBD* pre-treatment.

Table 2. Carbon peak C_{s1} components or proportions of oxygen and carbon functional groups of Douglas fir and pine heart wood surfaces before (*K*) and after plasma pre-treatment (*SO*, *SN*, *SHF*) determined from high-resolution XPS-spectra.

Kind of Wood: Density, kg/m ³	Samples		Carbon peak C_{s1} components, %					
			C1 (C-C or C-H)	C2 (C-O, C-OH)	C3 (C=O, O-C-O)	C4 (O-C=O)	nC1/nC2	$\sum_2^3 C_i$
			(285.0 ±0.4 eV)	(286.0 ±0.4 eV)	(288.7 ±0.4 eV)	(289.5 ±0.4 eV)	-	-
Heart Douglas Fir wood (<i>Pseudotsuga menziesii</i> , Canada): 678 kg/m ³	<i>K</i> (Non-Treated)		64.1	31.0	4.9	0.0	2.068	35.9
	<i>DBD</i> Pre- treated	<i>SO</i>	55.4	38.9	5.7	0.0	1.424	44.6
		<i>SN</i>	58.1	23.5	12.8	5.6	2.472	41.9
		<i>SHF</i>	57.5	35.0	6.2	1.3	1.643	42.5
Heart Pine Wood (<i>Pinus Syl- vestris</i> , Bul- garia): 371 kg/m ³	<i>K</i> (Non-Treated)		54.1	34.8	8.8	2.3	1.554	45.9
	<i>DBD</i> Pre- treated	<i>SO</i>	50.9	37.2	9.8	2.1	1.368	49.1
		<i>SN</i>	45.2	40.4	11.9	2.6	1.119	54.8
		<i>SHF</i>	45.4	40.1	12.0	2.5	1.132	54.6

The high-resolution spectrum of the oxygen peak O_{1s} includes the following main four different chemical states of oxygen atom on the wood surfaces: O1 (531.5±0.4 eV) – O=C; O2 (532.5±0.4 eV) – O-H; O3 (533.0±0.4 eV) – O-C or H-O-H; and O4 (534.5±0.4 eV) – not defined [13]. The carbon states and oxygen states are relevant – C3 to O1 and C2 to O3, but the amounts of C2 and C3 and O1 and O3 aren't corresponding. The found difference is due to the water (H-O-H) absorbed in the surface layer, Table 3.

XPS findings revealed that *DBD* pre-treatment increases the nO/nC ratio by oxidation of the Douglas fir surfaces and decreases the nC1/nC2 ratio, Table 2.

ACKNOWLEDGMENTS

The financial support of the National Science Fund, Ministry of Education and Science of Bulgaria, for the Bulgarian-Romanian Bilateral Research Project „*Development of New Properties by Surface Modification of Polymers Based Materials*” is gratefully acknowledged.

Authors: **Peter Dineff** and **Dilyana Gospodinova** are with the Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering on Technical University of Sofia, 8 St. Kliment Ohridski Blvd., Sofia 1000, Bulgaria; e-mail: dineff_pd@abv.bg; dilianang@abv.bg; **Ivalina Avramova** is with Bulgarian Academy of Science, Institute of General and Inorganic Chemistry, 11 Acad. Georgi Bonchev Str., Sofia 1113, Bulgaria; e-mail: iva@igic.bas.bg; **Todorka Vladkova** is with the Department of Polymer Engineering on University of Chemical Technology and Metallurgy, 8 St. Kliment Ohridski Blvd., 1000 Sofia, Bulgaria; e-mail: tgV@uctm.edu; **Carmen Gaidau** is with National R&D Institute for Textile and Leather, Division – Leader and Footwear Research Institute, 93 Ion Minulescu Str., 031215, Bucharest 3, Romania; e-mail: carmen.gaidau@icpi.ro.

Автори: **Петър Динев** и **Диляна Господинова** от катедра „Електрически апарати” на Електротехническият факултет на Техническият университет - София, 1000 София, бул. „Св. Климент Охридски” № 8; електронна поща: dineff_pd@abv.bg; dilianang@abv.bg; **Ивалина Аврамова** от Института по обща и неорганична химия на Българската академия на науките, 1113 София, ул. “Акад. Георги Бончев” № 11, електронна поща: iva@igic.bas.bg; **Тодорка Владкова** от катедра „Полимерно инженерство” на Химико-технологичния и металургичен университет, 1000 София, бул. „Св. Климент Охридски” № 8; електронна поща: tgV@uctm.edu; **Кармен Гайдау** от Националният изследователски институт по текстил и кожи - Институт по кожарска и обувна промишленост, Румъния, 031215 Букурещ 3, ул. „Йон Минулеску” № 93 електронна поща: carmen.gaidau@icpi.ro

Постъпила на 10.11.2011

Рецензент проф. д-н Е. Николов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИТЕ НА ПЛАЗМЕНО ПОВЪРХНОСТНО АКТИВИРАНЕ С ДИЕЛЕКТРИЧЕН БАРИЕРЕН РАЗРЯД - II част

Петър Динев, Диляна Господинова, Ивалина Аврамова,
Тодорка Владкова, Кармен Гайдау

Резюме: Плазмено подпомогнатата защита чрез забавители на горенето на дърво, дървени изделия и целулозни материали, на текстилни и кожени изделия е замислена и разработена като резултат от появата и развитието на плазмено подпомогнатата капилярна импрегнация. Предшестващото капилярната импрегнация плазмено химично активиране (и функционализиране) променя съществено електрическата, химичната и капилярната активност на порестата повърхност, което от своя страна определя подобряването на такива характеристики на импрегнационния процес като дълбочина на проникване, скорост на разпространение и адсорбция на импрегнационния разтвор, количество на сухото вещество „внедрено“ внедрено през повърхността на порестата среда.

Ключови думи: диелектричен бариерен разряд, плазмено подпомогнатата капилярна импрегнация, забавители на горенето.

INVESTIGATION ON DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE SURFACE ACTIVATION EFFECTS - part II

Peter Dineff, Dilyana Gospodinova, Ivalina Avramova,
Todorka Vladkova, and Carmen Gaidau

Abstract: The plasma aided flame retardation of wood, wooden products and cellulosic fibrous materials has been conceived and developed as a result of a plasma aided process of capillary impregnation. The dielectric barrier discharge surface pre-treatment modifies the chemical and capillary activity and improves such characteristics of the impregnation process as the penetration depth, speed of solution spreading and adsorption, and capacity of adsorbed solution.

Keywords: dielectric barrier discharge, plasma aided capillary impregnation, flame retardation of porous media (wood, polymer materials, leather, textile).

3.2. DBD activation effect and surface chemical composition after plasma aided impregnation

The plasma treatment cleaning the surface and changing its chemical composition impacts the surface wettability and impregnation by water solution. The surface

chemical composition change after such plasma-aided impregnation with water solution containing phosphorous and nitrogen flame retardant was monitored by comparative XPS-analysis of non-treated and plasma pre-treated Douglas fir wood samples, non-corrected and corrected by anionic surfactant (of 2, 5, 10 and 20 vol. %; AS2, AS5, AS10 and AS20) flame retardant solution (FRIS) and some results are presented in Table 4.

The appearance of nitrogen (N) and phosphor (P) on the surface of the flame retarded by FRIS samples in fixed ratio nN/nP (0.58) is not a surprise having for that the flame retardant on the surface (up to 5 nm in depth) contains nitrogen and phosphorous as element and the nitrogen on the surface of the bare wood is too small (0.58 at. %) compared to the nitrogen (5.7 at. %) on the surface after impregnation, Table 4 and 1.

Table 3. Oxygen peak O_{s1} components of Douglas fir heart wood surfaces before (*K*) and after plasma pre-treatment (*SO*, *SN*, *SHF*) determined from high-resolution XPS-spectra.

Kind of Wood:	Samples	Oxygen peak components, %						
		O1 (O=C)	O2 (O-H)	O3 (O-C; H-O-H)	O4 not-de- fined	C2+C3	O1+O3	
		(531.5 ±0.4 eV)	(532.5 ±0.4 eV)	(533.0 ±0.4 eV)	(534.5 ±0.4 eV)	%	%	
Heart Douglas Fir wood (<i>Pseudotsuga menziesii</i> , Canada)	<i>K</i> (Non-Treated)		0.0	0.0	100	0.0	35.9	100.0
	DBD Pre- treated	SO	3.2	0.0	91.8	5.0	44.6	95.0
		SN	5.5	59.9	34.6	0.0	36.3	40.1
		SHF	12.2	51.2	36.6	0.0	41.2	48.8

The correction in the ion activity of the impregnating FRIS by the supplementation of an anionic surfactant did not change materially the ratio nN/nP – from 0.58 to 0.61 at. %, but decreased the nitrogen from 5.7 to 3.7 at. %, and the phosphorous from 9.8 to 6.1 at. % on the surface, Table 4 and 5. The phosphor and nitrogen containing flame retardant penetrated in depth of the wood matrix without changing its chemical composition.

Table 4. Elemental composition of Douglas fir heart wood surfaces flame retarded by capillary impregnation (FR) and plasma-aided capillary impregnation determined from wide XPS-spectra.

Impregnated Samples	Peaks	Chemical Surface Composition, at. %				
		C	O	N	P	nN/nP
FR	Non-treated	46.6	37.9	5.7	9.8	0.58
PI10-FR	DBD pre-treated	53.8	32.3	4.8	9.1	0.53
PI15-FR		61.9	30.0	3.5	4.6	0.76
PIHF-FR		52.2	35.4	5.3	7.1	0.75

The other way about the plasma-aided impregnation with basic FRIS, DBD pre-treatment changed materially the ratio nN/nP – from 0.58 to 0.53 (0.76 and 0.75) at. %, Table 4. Generally, the phosphorus and nitrogen are simultaneously reduced (below 9.8 at. %) if an ionic surfactant presents in the FRIS, Table 4 and 5. These

results indicating that the reduction of the phosphorus and nitrogen content on the surface is most probably due to quick penetration of the impregnating solution in the bulk of the wood. The more significant decrease of the phosphorus and nitrogen content on the surface with the increase of the anionic surfactant amount, Table 5, compare samples *PIHF-FR-AS2* - *PIHF-FR-AS20*, as well as the almost constant nN/nP ratio on the compared surfaces confirms this supposition.

It is not the same case of the plasma pre-treated wood or the plasma-aided impregnation. The comparison of the surface elemental composition of Douglas fir samples impregnated with the basic *FRIS* (without surfactant addition) plasma pre-treated and non pre-treated shows some significant differences in the phosphorus and nitrogen content on the non treated and plasma pre-treated surfaces varying in dependence on the operation conditions of the plasma treatment, Table 4 and 5. It should be marked also, that nN/nP ratio of the plasma non pre-treated sample (of 0.58) differs significantly from that of the plasma pre-treated samples.

This indicates that some chemical interactions between the plasma pre-activated wood surface and the flame retardant occurs changing otherworld almost constant nN/nP ratio. If we have for that the plasma pre-treatment alters the chemical reactivity of the wood surface by accumulation mainly of oxygen containing groups (Table 1 and 2) most probably they interact somehow with the flame retardant.

Table 5. Elemental composition of Douglas fir wood surfaces flame retarded by anionic surfactant (AS) aided capillary impregnation (FR-AS) and plasma-aided capillary impregnation (PI-FR-AS) with different amount of surfactant (2, 5, 10, and 20 vol. %) determined from wide XPS-spectra.

Impregnated Samples	Peaks	Chemical Surface Composition, at. %				
		C	O	N	P	N/P
FR-AS2	Non-treated	62.0	28.2	3.7	6.1	0.61
PI10-FR-AS2	<i>DBD-LF</i> pre-treated	66.2	25.9	2.9	5.0	0.58
PI15-FR-AS2		50.2	36.8	5.6	7.4	0.76
PIHF-FR-AS2	<i>DBD-HF</i> pre-treated	53.2	34.0	5.8	7.0	0.83
PIHF-FR-AS5		59.8	30.8	4.1	5.3	0.77
PIHF-FR-AS10		53.3	36.2	3.6	6.9	0.52
PIHF-FR-AS20		58.9	35.7	2.2	3.2	0.69

3.3. DBD activation effect by thermal (TGA, DTA and DSC) analysis

Solid materials do not burn directly: they must be first decomposed by heat (pyrolysis) to release flammable gases. Visible flames appear when these flammable gases burn with the oxygen in the air. If solid materials do not break down into gases, than they will only smolder slowly and often self extinguish, particularly if they char and form stable carbonaceous barrier which prevents access of the flame to the underlying material. Materials like wood burn vigorously because once ignited, the generated heat breaks down the long-chain molecules to smaller fragments transpiring as gases. The gas flame maintains itself by the action of high energy species (that is H^+ and OH in the gas phase) decomposing the molecules to free carbon that can react with the air oxygen to “burn” CO, generating heat energy. The different types flame retardants inhibit the flaming process on different mechanisms, [8].

The most common and best known fire retardance methods for wood are based on changing the pathway of pyrolysis. In this simple and inexpensive method, wood is

treated with a substance that enhances the pyrolysis reaction of cellulose through the pathway leading mainly to char formation. Ideally, the reactions would proceed so that cellulose decomposes to char and water: $(C_6H_{10}O_5)_n \rightarrow n(6C + 5H_2O)$, [12].

It is well known, [8, 12], that the phosphorus containing flame retardants act efficiently in the solid phase of the burning material. Under heating they deliver polymeric forms of the phosphoric acid that forms glassy layer inhibiting the pyrolysis process by braking down the material charring and flammable gases release necessary to feed the flame. The delivered phosphoric acid is able to do both, to suppress a glucosans formation and to block the flammable volatile products release. Substances influencing on pyrolysis often react with the hydroxyl group attached to the sixth carbon atom of cellulose molecule, leading eventually to the stabilization of the structure through the formation of a double bond between the fifth and sixth carbon atom. This action mode leads to predominant char formation than flammable gases. Hence the pyrolysis with char formation gets a priority in presence of the phosphorous flame retardant. The char barrier layer grows and thus cut off the head and oxygen transfer to pyrolysis zone. At the same time it doesn't allow the flammable gases to pass trough and flame spreading is stopped. The thickness and morphology of the "char barrier" determine the quality of the flame retardency. The phosphorus and nitrogen containing flame retardants combine the flame retarding mechanisms of both phosphorus and nitrogen compounds with synergetic effects reinforcing their function.

Thermal analysis – *TGA*, *DTA* and *DSC*, was employed for evaluation of the influence of wood treatment on pyrolysis and combustion. Thermal analysis gives basic information on the mechanism of thermal decomposition, ignition and burning as well as data on the wood treatments and modification.

A clear distinction should be made between fire barrier assemblies which utilize fire resistant materials (rated) and flame or fire retarded materials (indexed). The terms seem alike and are often confused but are quite distinct. Fire rated materials prevent ignition over fixed length of time. Fire retarded materials, on the other hand, will ignite. They slow down, however, the flame spread and smoke development of the burning material. Fire retardant materials are typically used by the building codes regulation for interior finish materials. A low flame spread materials will not necessarily improve the performance of a fire rated assembly.

When a wood product burns at a constant rate of heat release per unit area, the boundary between the pyrolysed material and the intact wood, i.e. the pyrolysis front, proceeds to the wood in depth direction. Since all pyrolysing wood can be considered to char, the *charring rate* corresponds to the propagation rate of the pyrolysis front. Charring rate is an essential quantity for the fire resistance of wooden structures, because the wood under the char layer preserves its original properties. Important factors for the charring rate of wood are the density, the external heat flux and the moisture content.

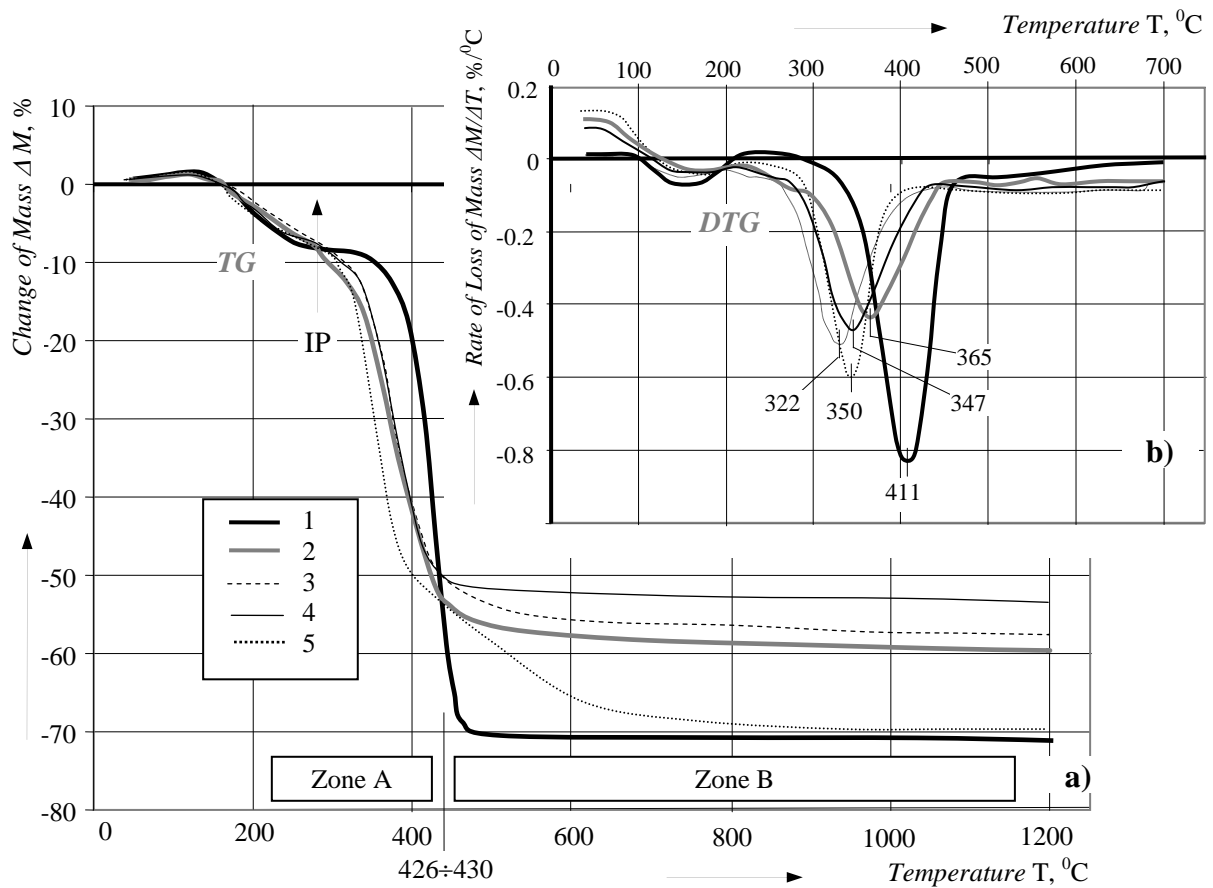


Fig. 2. Thermal analysis – TGA (a) and DTGA (b) spectra, of bare Douglas fir wood (1), flame retarded wood by capillary FRIS impregnation with 2 vol. % of anionic surfactant (2) and flame retarded wood by plasma-aided capillary impregnation at different operating rate of DBD pre-treatment: 3 – low frequency (50 Hz) DBD at 10 kV; 4 - low frequency (50 Hz) DBD at 15 kV, and 5 - high frequency (10 kHz) DBD at 10 kV (at 50 °C/min).

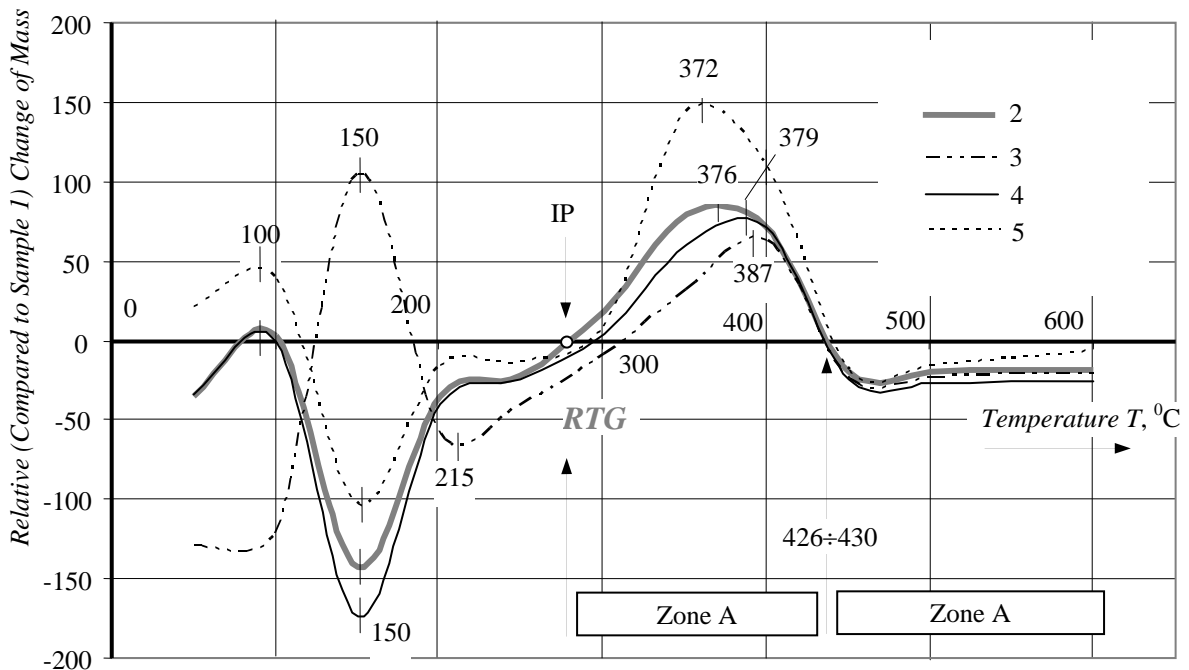


Fig. 3. Thermal analysis – TGA spectra, or relative change of mass obtained in comparison with the bare Douglas fir wood, of bare Douglas fir wood (1), flame retarded wood by capillary FRIS impregnation with 2 vol. % of anionic surfactant (2) and flame retarded wood by plasma-aided capillary impregnation at different operating rate of DBD pre-treatment: 3 – low frequency (50 Hz) DBD at 10 kV; 4 - low frequency (50 Hz) DBD at 15 kV, and 5 - high frequency (10 kHz) DBD at 10 kV (at 50 °C/min).

Charring rate decreases with increasing density according to the power law – Douglas fir wood belong to the class of high density woods (678 kg/m^3), i.e. its charring rate is about 1 mm/min . Charring rate is not generally much influenced by fire retardants. However, the char yield is usually increased quite a lot, that might contribute to the protection of the wood core, [12].

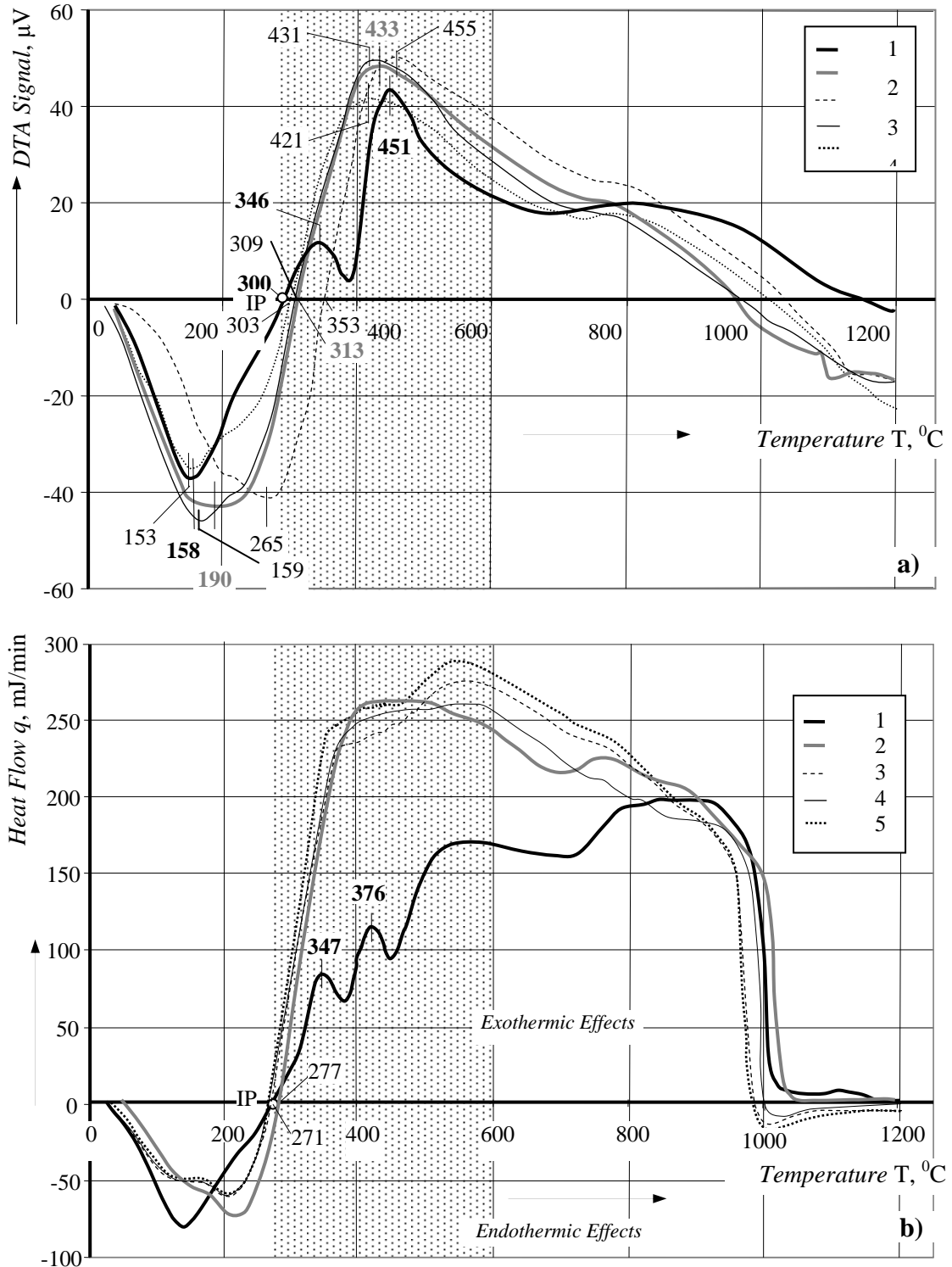


Fig. 4. Thermal analysis – DTA (a) and DSC (b) curves, of bare Douglas fir wood (1), flame retarded wood by capillary FRIS impregnation with 2 vol. % of anionic surfactant (2) and flame retarded wood by plasma-aided capillary impregnation at different operating rate of DBD pre-treatment: 3 – low frequency (50 Hz) DBD at 10 kV; 4 – low frequency (50 Hz) DBD at 15 kV, and 5 – high frequency (10 kHz) DBD at 10 kV (at heating rate of $50 \text{ }^{\circ}\text{C/min}$).

However, the correlation between results of thermal analysis - *TG* (*DTG*), *DTA* and *DSC*, and the real fire behavior of wood was not established yet, [13]. Usually the thermal analysis is carried out at thermodynamically stable equilibrium, i.e. the temperature rate below to the $4\div 10$ °C/min range. The real fire reach the flashover (about 600 °C) for ten minutes and the relevant heating rate is essentially higher – from 50 to 60 °C/min. One better approximation to real fire might be a thermal analysis at increased rate of heating (50 °C/min) closer to the real fire condition.

TG and *DTG analysis* curves of the above described samples are presented in Fig. 2a. The mass loss at all studied samples in the first temperature zone (up to the ignition point) is slight due to a release of a small amount of inflammable volatile substances and the differences between the samples indicate their different dehydration and decomposition.

The intense pyrolysis of the non-protected wood sample, Fig. 2a, *TG*-curve 1, in the flaming zone (the first after the ignition point) is accompanied with a very sharp mass loss (more than 60 %) due to a formation of a lot of low molecular weight flammable volatile products whereas suppressed flaming and started below ignition point (*IP*) glowing with coal char formation is visually observed for all flame retarded samples, Fig. 2a, *TG*-curves 2÷5, accompanied with less mass loss compared to the control wood sample. The *DBD* pre-treatment effect on the flame retardency for different operational conditions, Fig.2b, *DTG*-curves 3÷5 was expressed by the appearance of the main peak at lower temperatures (322, 347, 350 °C) comparing to the flame retarded wood sample (365 °C), i.e. it reinforced the flame retardency effect, in comparison with bare wood (411 °C). The formation of protective barrier char layer started earlier and finished before the flaming start of the bare wood, Fig. 2b. This *DBD* pre-treatment effect attended with a well expressed growth of the loss of mass compared to the bare wood. The built char barrier (in temperature zone A) retarded the loss of mass of flame retarded samples after 426÷430 °C (zone B), Fig. 3. The total mass loss at the 600 °C of *DBD*-aided flame retarded samples was 52, 55 % for low and 66 % for high frequency *DBD*, against 58 % for flame retarded wood samples and 71 % for bare wood.

DSC and *DTA* curves of the flame retarded wood, Fig. 4, curves 2÷5, to that of the bare wood, curve 1, demonstrated significant alterations of the thermal effects and the heat flow in all above described temperature zones indicating in this way that the used flame retardant and *DBD* pre-treatment influenced all steps of the wood pyrolysis and burning.

The comparison of curve 2 to curve 1, Fig. 4a, shows: *i*) a slight shift of the *IP* to the higher temperature – from 300 °C for the bare wood and up to 303÷350 °C for the flame protected one; *ii*) the appearance of a enlarged endothermic peak at 190 °C for the flame retarded wood evidently is connected to the thermal decomposition of the used flame retardant; *iii*) the observed for bare wood flaming peak at 346 (347) °C is suppressed and absorbed by an enlarged charring peak at 433 °C for flame retarded wood. Such large peak relevant to the building of the protective char barrier is observed too after the *IP* at different temperature for *DBD* pre-treatment flame retarded wood: 421 and 431 °C for low and 455 °C for high frequency *DBD*.

A significant difference was found using *FRIS* leading to an enlarged total exothermic effect in comparison with the bare wood, Fig. 3b. *DBD* pre-treatment at the same time improves the flame retardancy and diminishes this total exothermic effect but it remains higher than the bare wood one.

CONCLUSION

As a result of the carried out experimental investigations on the *DBD* pre-treatment effects on the Douglas fir surface chemistry and flame retardancy after capillary (surface) impregnation with phosphor and nitrogen containing flame retardant we are in position for the following main conclusion:

1. The Douglas fir wood surface is very sensitive to the ionic activity of the impregnation water solution;
2. The Douglas fir wood plasma or *DBD* pre-treatment have significant influence over the ionic surface balance of the wood, keeping its amphoteric character;
3. *DBD* pre-treatment at different operation conditions has as result the change of the surface chemistry – an oxidation of the wood surface is realized;
4. Both the cold plasma pre-treatment (or chemical surface modification) and the control of the *FRIS* ionic activity by different surfactants (spreaders) offer some possibilities for the improvement of capillary (surface) impregnation process and the flame retardancy of Douglas fir wood;
5. Plasma-aided capillary impregnation process with ion active flame retardant water solutions give new opportunities for improvement of the flame retardancy of wood and wood products and can be adopted as an universal approach to the impregnation processes;

ACKNOWLEDGMENTS

The financial support of the National Science Fund, Ministry of Education and Science of Bulgaria, for the Bulgarian-Romanian Bilateral Research Project „*Development of New Properties by Surface Modification of Polymers Based Materials*” is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] **Dineff, P., D. Gospodinova, L. Kostova, T. Vladkova, and E. Chen.** *Plasma aided surface technology for modification of materials referred to fire protection.* Problems of Atomic Science and Technology, 2008, 6; Series Plasma Physics (14), pp. 198÷200.
- [2] **Dineff, P., L. Kostova.** *Method for Plasma Chemical Surface Modification.* H05H 1/24, International Patent Publication No.: WO Patent 2006/133524 A2; International Patent Application No.: PCT/BG2006/000012; Priority Date: 14.06.2005 (109189); Publication Date: 21.12. 2006.
- [3] **Dineff, P., D. Gospodinova.** *Electrode Configuration and Non-Uniform Dielectric Barrier Discharge Properties.* XVI-th International Symposium on

- Electrical Apparatus and Technologies “SIELA 2009”, 04÷06 June 2009, Bourgas, Bulgaria; Proceedings, 2009, vol. 1, pp. 79÷88.
- [4] **Dineff, P., D. Gospodinova.** *Atmospheric pressure plasma polymer modification - new visions, challenges and solutions*. II. International Conference on Challenges in Higher Education & Research in the 21-st Century, Sozopol, Bulgaria. Proceedings of Papers, Heron Press, Sofia, 2004: pp. 193÷196.
- [5] **Sernek, M.** *Comparative analysis of inactivated wood surfaces*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, 2002.
- [6] **Vladkova, T., P. Dineff, and D. Gospodinova.** *Wood flour - New filler for rubber processing industry II. Cure characteristics and mechanical properties of NBR compounds filled by corona-treated wood flour*, “J. Appl. Polym. Sci.”, **91**(2), 883 (2003)
- [7] **Dineff, P., D. Gospodinova, L. Kostova, T. Vladkova, and C. Erfan.** *New attempt at plasma aided flame retardation in wood and cellulosic fibrous materials*. XX-th Congress of The Society of Chemist and Technologist of Macedonia “BICONGRESS 2008”, Ohrid, Macedonia, 17÷20 September, 2008. Proceedings of papers, 2008, PPM-11-E.
- [8] **Flame Retardants – Frequently asked questions.** Website of European flame retardants association (EFRA): www.cefic-efra.org.
- [9] **Beecher, J., C. Frihart:** *X-ray Photoelectron Spectroscopy for Characterization of Wood Surfaces in Adhesion Studies*. Wood Adhesives 2005: Session 1A – Analytical Techniques, pp. 83÷89.
- [10] **M. Kazayawoko, J. Balatinecz, R. Woodhams and R. Sodhi,** *XPS of lignocellulosic materials treated with maleated polypropylenes*, Journal of Wood Chemistry and Technology, Vol. 18, Issue 1, pp. 1÷26 (1998).
- [11] **Östman, B., L. Tsantaridis.** *Heat Release and Classification of Fire Retardant Wood Products*. *Fire and Materials*, 1995. Vol. 19, Issue 6, pp. 253÷258.
- [12] **Hakkarainen, T., E. Mikkola, B. Östman, L. Tsantaridis, H. Brumer, P. Piispanen.** *Inovative Eco-Efficient High Fire Performance Wood Products for Demanding Applications. State of The Art*, Inno Fire Wood, March, 2005, pp. 2÷47.
- [13] **Helwig, M.** *Methods of Testing the Flammability of Treated Wood*. Meeting of Working Group COST Action E37: *Sustainability Through New Technologies for Enhanced Wood Durability*, Hamburg, Germany, 08.÷09.11.2004.

Authors: **Peter Dineff** and **Dilyana Gospodinova** are with the Department of Electrical Apparatus, Faculty of Electrical Engineering on Technical University of Sofia, 8 St. Kliment Ohridski Blvd., Sofia 1000, Bulgaria; e-mail: dineff_pd@abv.bg; dilianang@abv.bg; **Ivalina Avramova** is with Bulgarian Academy of Science, Institute of General and Inorganic Chemistry, 11 Acad. Georgi Bonchev Str., Sofia 1113, Bulgaria; e-mail: iva@igic.bas.bg; **Todorka Vladkova** is with the Department of Polymer Engineering on University of Chemical Technology and Metallurgy, 8 St. Kliment Ohridski Blvd., 1000 Sofia, Bulgaria; e-mail: tgvl@uctm.edu; **Carmen Gaidau** is with National R&D Institute for Textile and Leather, Division – Leader and Footwear Research Institute, 93 Ion Minulescu Str., 031215, Bucharest 3, Romania; e-mail: carmen.gaidau@icpi.ro.

Автори: **Петър Динев** и **Диляна Господинова** от катедра „Електрически апарати” на Електротехническият факултет на Техническият университет - София, 1000 София, бул. „Св. Климент Охридски” № 8; електронна поща: dineff_pd@abv.bg; dilianang@abv.bg; **Ивалина Аврамова** от Института по обща и неорганична химия на Българската академия на науките, 1113 София, ул. “Акад. Георги Бончев” № 11, електронна поща: iva@igic.bas.bg; **Тодорка Владкова** от катедра „Полимерно инженерство” на Химико-технологичния и металургичен университет, 1000 София, бул. „Св. Климент Охридски” № 8; електронна поща: tgvl@uctm.edu; **Кармен Гайдау** от Националният изследователски институт по текстил и кожи - Институт по кожарска и обувна промишленост, Румъния, 031215 Букурещ 3, ул. „Йон Минулеску” № 93 електронна поща: carmen.gaidau@icpi.ro

Постъпила на 10.11.2011

Рецензент проф. д-н Е. Николов

МАГНИТНО СТИМУЛИРАНЕ НА БАРИЕРЕН РАЗРЯД В УСЛОВИЯТА НА НАДЛЪЖНО МАГНИТНО ИЗОЛИРАНЕ

Петър Динев, Диляна Господинова, Райна Ценева

Резюме: *Магнитното поле може да задържи електроните, както в напречно, така и в надлъжно направление. Това позволява да бъдат създадени подходящи конфигурации на магнитното поле, които могат да задържат електроните в ограничен обем за неограничено дълго време - достатъчно, за да се усили наследствеността при смяна на полярността на електродите. Така към двата известни механизма на „наследствена памет” – дискретната пространствена структура на положителния заряд, която остава „да живее” след елементарния разряд, и повърхностно разпределената върху диелектричната бариера дискретна структура от електрони, захванати в повърхностния слой, трябва да се прибави и възможността да бъдат създадени магнитни граници, които да осигурят дълъг живот на електроните в магнитно изолирани обеми от работната междина.*

Ключови думи: *диелектричен бариерен разряд, магнитно стимулиране с външно постоянно магнитно поле, ефект на магнитно огледало.*

MAGNETIC STIMULATED DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE TO TERMS OF LONGITUDINAL MAGNETIC ISOLATION

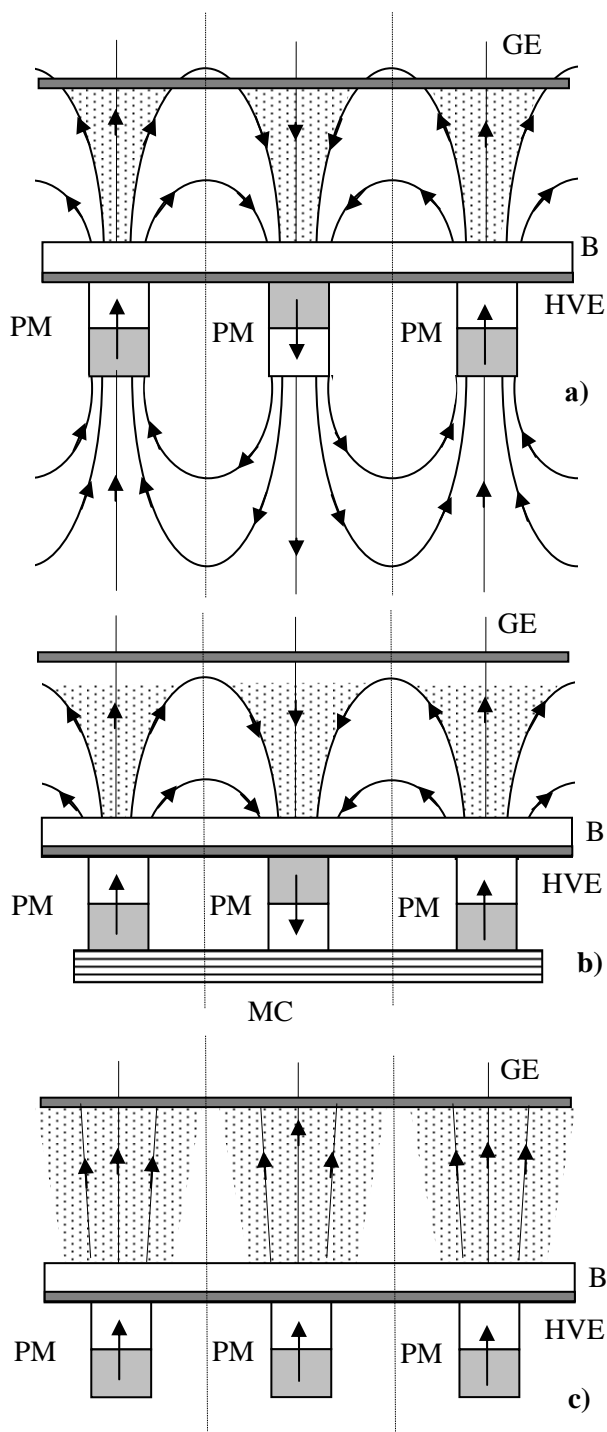
Peter Dineff, Dilyana Gospodinova, and Rajna Tzeneva

Abstract: *The magnetic field can hold electrons as in the transversal and longitudinal direction. This allows creating the appropriate configurations of the magnetic field that can hold electrons in a limited volume for unlimited period of time - enough to increase “inherited memory” when switching the polarity of the electrodes. So the two well known mechanisms of “inherited memory” - a simple discrete spatial pattern of positive charges, which remains “live” after the dying of elementary discharges, and the discrete surface pattern of trapped electrons on the dielectric barrier surface, have to be added the possibility to create suitable magnetic boundaries to ensure long life of electrons in magnetically separate volumes part of the working gap. This study was developed as part of a large investigation on magnetic stimulation of dielectric barrier discharge at atmospheric pressure in air.*

Keywords: *dielectric barrier discharge, plasma aided capillary impregnation, flame retardation of porous media (wood, polymer materials, leader, textile).*

1. Въведение

Въпреки подробното описание на магнетронния ефект, неговото практическо използване при неравновесните електрически разряди, както и възможното магнитно стимулиране на бариерните разряди при атмосферно налягане оста-



Фиг. 1. Магнитни структури, създаващи (a, b) и не създаващи (c) т.нар. магнитна граница (стена) в областта на високоволтовия електрод и диелектричната бариера.

HVE – високоволтов електрод; *GE* – заземен противоелектрод; *B* – диелектрична (стъклена) бариера; *PM* – постоянни (редкоземни) магнити; *MC* – магнитопровод. Заштрихованите области на работната междина показват „коридорите“ за достъп на електроните до диелектричната бариера.

ват неизвестна и неизползвана възможност за управление на тяхната неравновесност, [1÷5]. Внасянето на бариерния разряд във външно постоянно магнитно поле добавя ново силово въздействие върху електроните и увеличава тяхната подвижност. Независимо от направлението на външното магнитно поле спрямо електрическото поле на разряда – надлъжно или напречно (магнетронен ефект), то се явява инструмент за изменение (увеличаване) на неравновесността на атмосферния бариерен разряд. В този смисъл се възприема представата за магнитна стимулация на неравновесните електрически разряди при високо (атмосферно) налягане, [6]. Изследвания върху получаването на хомогенен бариерен разряд, [1, 4 и 5], определят условията за неговото получаване така:

- съществуват, или се появяват, множество електрони, които стават начало на паралелно развиващи се електронни лавини - лавинен стадий на разряда;
- стримерна форма на разряда се осъществява при достигане на критична стойност на т. нар. критерий на *Meek* ($\alpha \cdot d \geq 20$, $n_e \geq 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$, $E_0 = 26 \text{ kV/cm}$);

- преходът към стримерна форма на разряда се затруднява от електрическото взаимодействие между две съседни лавини, което означава, че електрическото взаимодействие между паралелно развиващите се лавини отмества този преход към по-висок критичен интензитет.

Така формираните пред-стави за развитие на бариерния разряд се изграждат изключително върху електростатичния характер на взаимодействията между обемните заряди, диелектричната бариера и електродите - теория на *Townsend-Meek*. Ако се отчете, обаче, динамиката на развитие на микроразрядите, на лавинния и на стримерния стадий, то може да се предполага, че елементарните електромагнитни взаимодействия също така трябва да оказват съществено влияние върху формите и развитието на бариерния разряд. Това е доказано експериментално по два начина: *първо*, чрез използването на един и два феромагнитни (студено валцувана електротехническа стомана) електрода; *второ*, чрез създаването на външно постоянно магнитно поле в работната междина – между единия от двата електрода и диелектричната бариера, [7, 8]. Съществуват три подхода за анализ на експериментално доказаното от нас магнитно стимулиране на бариерния разряд във външно магнитно поле, което се изразява в значимо нарастване на активната мощност на разряда в различните операционни режими:

- *първият*, се основава върху действието на известната лоренцова сила върху траекторията на електрона, увеличаването на вероятността за ударно взаимодействие с тежката компонента на неравновесната плазма и увеличаване на вероятността за електромагнитно взаимодействие между всеки две съседни лавини, което променя съществено условията за преход към стримерна форма на горене на разряда;

- *вторият*, се основава отново върху действието на лоренцовата сила върху траекторията на електрона, но ударението се поставя върху ефекта на т.нар. магнитно огледало (или магнитна тапа), който позволява отражение на голяма част от електроните от външното магнитно поле с голяма плътност и силно влияние върху стримерните стадии на развитие на бариерния разряд – на катодно и анодно насочени стримери;

- *третият*, се основава върху единната представа за действието на лоренцовата сила, която включва: и удължаването на живота на електроните при движението им към анода при нарастване на вероятността за ударна йонизация в лавинния стадий на развитие на разряда; и ефекта на магнитно огледало, което създава условия за проява на нов ефект на памет (на наследяване) при развитието на разряда - част от електроните се наследяват от развиващите се стримери, а друга част от започващия нов разряд след смяната на полярността на електродите.

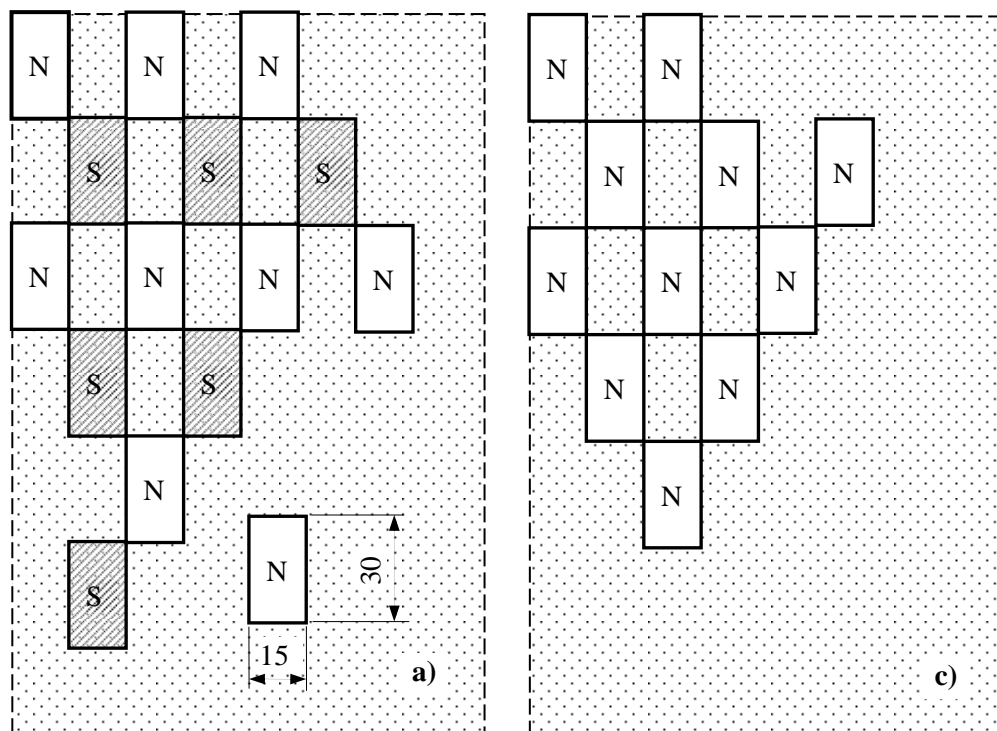
ЗАДАЧАТА на тази работа е да съпостави две еднакви по структура конфигурации от постоянни магнити, но различаващи се съществено с това, че в единия от случаите конфигурацията образува т.нар. магнитна граница върху повърхността на диелектричната бариера като постоянните магнити са с редуваща се полярност, а във втория от изследваните експериментално случаи

постоянните магнити имат еднаква полярност, т.е. не образуват магнитна граница, фиг. 1.

2. Ефект на магнитно отражение и магнитно огледало (граница)

Надлъжното задържане на движещия се по посока на нарастване на магнитната индукция B електрон е резултат от непрекъснато нарастващата лоренцова сила при навлизането на електрона в магнитното поле - $F_L = e [\mathcal{V}_\perp \cdot B_R]$, където e е зарядът на електрона; \mathcal{V}_\perp - напречната на магнитното поле скорост на електрона, който се движи по ларморова окръжност с радиус $r_B = (m_e \cdot \mathcal{V}_\perp) / (e \cdot B)$ около магнитната силова линия; B_R - радиалната компонента на магнитната индукция, [9].

Съществува т.нар. *точка на отражение*, в която скоростта на навлизане \mathcal{V} на електрона в нарастващото магнитно поле става равна на нула, докато напречната скорост \mathcal{V}_\perp достига достатъчно голяма стойност и електронът започва да се движи в обратна посока навън. Не всички електрони, обаче, се отразяват по този начин - тези, които имат достатъчно висока скорост преминават. Съществува *конус на преминаване*, т.е. електроните, които се движат около магнитните силови линии вътре в този конус (под критичния ъгъл на конуса) преминават, докато тези извън конуса се отразяват или търпят пълно магнитно отражение. Принципът на „магнитното огледало” се използва широко за създаването на магнитно изолирани повърхности и затворени обеми, [9].



Фиг. 2. Магнитни структури от постоянни редкоземни магнити, създаващи (а) и не създаващи (с) магнитно огледало (стена) в областта на диелектричната бариера.

На тази теоретична основа може да се приеме за изследване възможността на повърхността на диелектричната бариера да се създаде „магнитно огледало”,

или магнитно изолирана граница, чрез използването на подходяща структура от постоянни анизотропни стронциеви или редкоземни магнити, фиг. 1а и б. Една нова пространствена ориентация на постоянните магнити, фиг. 1с, води до практически хомогенно магнитно поле и до рязко нарастване на граничния ъгъл на преминаване - практически всички електрони достигат до повърхността на диелектричната бариера.

За целите на експерименталното изследване се реализират три конфигурации на постоянните магнити – *първата*, представлява плоскопаралелна (копланарна) двуелектродна система с асиметрично разположение на диелектричната бариера откъм високоволтовия електрод без постоянни магнити, създаващи външното магнитно поле; *втората*, представлява същата електродна система с „магнитно огледало”, образувано от шахматно разположените от страната на високоволтовия електрод (*HV-E*) правоъгълни постоянни магнити с периодична промяна на полярността **S-N-S**, фиг. 1а; *третата*, представлява същата електродна система с „магнитното огледало”, но с магнитопровод откъм обратната страна на електрода, който я затваря едностранно - асиметрична магнитна система **S-N-S**, и променя (увеличава) критичния ъгъл на конуса на преминаване, фиг. 1б; *четвъртата*, представлява същата електродна система без магнитопровод, но с шахматно разположение на постоянните магнити и еднаква полярност **N-N-N**, т.е. тя няма “магнитно огледало”, фиг. 1с. Магнитните структури се реализират с два вида постоянни магнити, които се различават съществено по магнитните си характеристики - с анизотропни стронциеви и редкоземни магнити.

3. Експериментални изследвания

Изследванията се провеждат върху плоско-паралелна (копланарна) електродна система чрез външната характеристика на атмосферния бариерен разряд (средна стойност на разрядния ток - ефективна стойност на пада на напрежението върху електродната система), снета при дискретно изменение на въздушната (работната) междина d : 1, 3, 6, 9, 12 и 15 mm.

Методът на статичната волтамперна характеристика е в сила за газови смеси (и за въздух) при различни налягания, независимо от размерите на изследваната двуелектродна разрядна система. Освен това, анализът на волтамперната характеристика позволява да бъдат определени параметрите на операционните режими на горене на атмосферния бариерен разряд, критичните параметри на запалване на разряда и преходите от един към друг операционен режим, и напрежението на горене, което се явява основна характеристика на всеки от операционните режими, и накрая, функционалната зависимост между активната мощност и приложеното променливо напрежение, [7].

Средната стойност на плътността на тока (AVG) се измерва директно при захранване на електродната система с напрежение с индустриална честота (50 Hz), а при известна активна площ на електродите се изчислява съответната средна стойност на плътността на тока. Повърхнинната плътност на активната мощност p_s се изчислява по известната методика на *Динев-Господинова*, [7].

Повърхнинната плътност на активната мощност, респективно активната мощност, се възприема като количествена мяра не само на елементарните процеси в плазмата (дисоциация, йонизация, рекомбинация), но и на всички химични промени, протичащи с обмен на електрони вътре в обема на разряда и върху повърхността на “потопените” в плазмата подложки. В този смисъл, зависимостта на повърхнинната плътност на мощността p_s от приложеното напрежение U върху електродната система се разглежда като основна технологична характеристика на разряда, [7].

Диелектричната бариера (В) е изработена от лист алкално стъкло с една и съща дебелина при всички изследвани електродни системи: $b = 3 \text{ mm} = \text{const}$. Тя е изработена от алкално стъкло със следните електрически параметри: относителна диелектрична проницаемост $\varepsilon_r = 10$; специфично обемно електрическо съпротивление $\rho_V = 10^9 \text{ }\Omega\text{m}$; тангенс от ъгъла на диелектричните загуби $\text{tg } \delta = 25$ (при 20°C). Разположена е асиметрично в близост до високоволтовия електрод (HV-E). Диелектричната бариера, високоволтовият електрод и постоянните магнити (PM) образуват равнинна слоеста структура, като постоянните магнити са залепени непосредствено върху алуминиевия (немагнитния) високоволтов електрод. Той, от своя страна, представлява самозалепващо алуминиево фолио с дебелина $500 \text{ }\mu\text{m}$, така че стъклената бариера е конструктивният компонент, който механически носи електрода и постоянните магнити, фиг. 1 и 2.

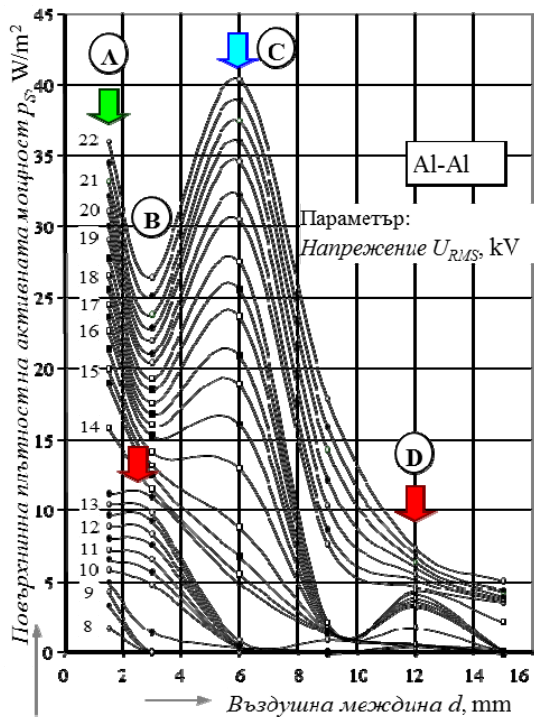
Разработени са два вида магнитни структури - с анизотропни стронциеви и с редкоземни постоянни магнити. Магнитните структури с анизотропни стронциеви (стронциев ферит) постоянни магнити образуват плътна мрежа (разположени са плътно един до друг, а не шахматно) с много по-голяма елементарна клетка поради по-големите размери на постоянните магнити - $80 \times 57 \times 12 \text{ mm}$. Магнитните и електрическите им характеристики са следните (СФ 24, Фирма „Магнит” ООД, Перник, България): $B_r = 0,37 \text{ T}$; $H_{c,i} \geq 224 \text{ kA/m}$; $(BH)_{max} \geq 24 \text{ kJ/m}^3$, $\mu_r = 1,2$; $T_Q = 462^\circ\text{C}$; $\rho_V = 10,6 \text{ }\Omega\text{m}$; $\delta = 4,5 \div 5 \text{ g/m}^3$. Магнитите структури, съставени от синтеровани неодимови (редкоземни) постоянни магнити $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, позволяват много рационално да се реализира значително по-силно магнитно поле (и стимулиране на бариерния разряд) при значително по-слабо увеличаване на теглото и на размерите на електродната система. Това се дължи на добрите магнитни характеристики на неодимовите постоянни магнити:

$B_r = 1,0 \div 1,4 \text{ T}$; $H_{c,i} = 750 \div 2000 \text{ kA/m}$; $(BH)_{max} = 200 \div 440 \text{ kJ/m}^3$, $T_C = 310 \div 440^\circ\text{C}$ и значително по малките геометрични размери – $30 \times 15 \times 3 \text{ mm}$. Те могат с успех да изграждат, както отворени (без магнитопровод), така и затворени равнинни (слоини) магнитни системи. Феромагнитният магнитопровод (МС) се разполага като четвърти слой върху стъклената бариера, като механически е свързан към нея чрез действащите електромагнитни сили между него и постоянните магнити. Магнитопроводът е изработен от студено валцувана електротехническа неориентирана стомана М 250-35А (БДС EN 10106:2007) с параметри : $1,5 \text{ T}$, 50 Hz , $2,5 \text{ W/kg}$. Набира се от четири слоя ламели, изрязани

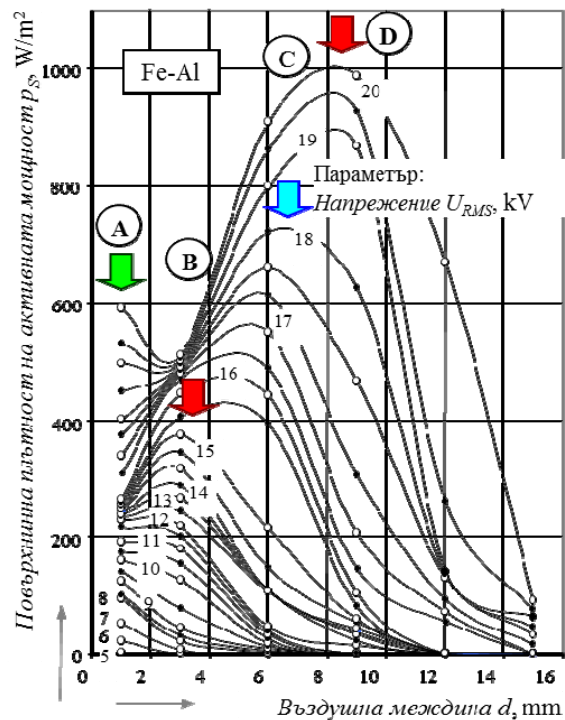
от лист електротехническа стомана с обща дебелина $\delta = 4 \times \Delta = 4 \times 0,35 = 1,4$ mm, така че да затвори магнитно системата от външната страна, в съответствие с предшестващи експериментални скринингови изследвания, [7].

4. Експериментални резултати и дискусия

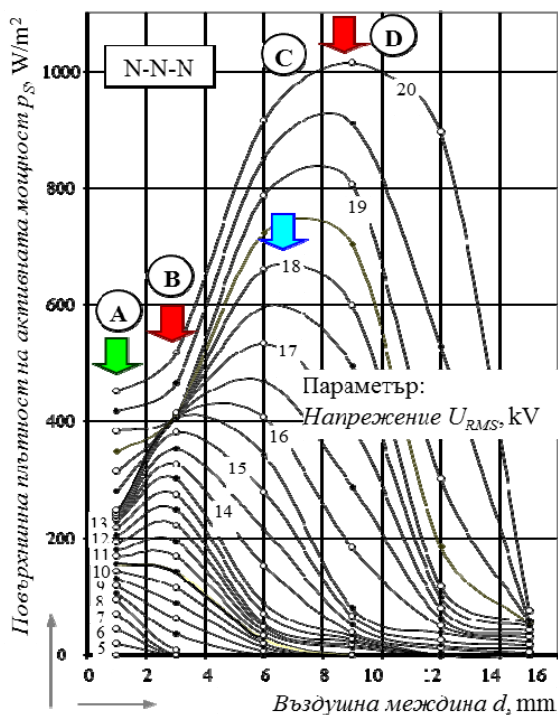
Изменението на разстоянието d , при постоянно налягане (p_0) и температура (T_0), нарушава подобие на бариерните разряди – те не са подобни и се запалват и горят по различен начин. Технологичната характеристика показва етапите, през които преминават тези силно различаващи се разряди. Нещо повече, ясно се отличават различните механизми (операционни режими) на горене - *първият максимум* на p_s (при междини около $1 \div 1,5$ mm) се определя от лавинния характер на разряда и може да се приеме като квазихомогенна форма на горене на разряда; *вторият* и другите максимуми се определят от последователната поява на *катодно* (анодни) и *анодно* (катодни) *насочени стримери*. Трудността за идентифициране на различните операционни режими на бариерния разряд във въздух при атмосферно налягане, както и появата на повече характерни максимуми, може да се свърже единствено с разделното участие на процеси, свързани с дисоциирането и йонизирането на кислорода и азота във въздуха. Последователно на фиг. 2 и 3 са показани технологичните характеристики и съответстващите им операционни режими, отбелязани с буквите А, В, С, D, на бариерни разряди без магнитно стимулиране с външно постоянно магнитно поле. Внасянето на феромагнитен противоелектрод много съществено променя технологичната характеристика. В този случай би трябвало да се говори за “вътрешно” магнитно стимулиране, тъй като бариерният разряд не гори във външно магнитно поле. Още нещо, очевидно е значимото подобряване на всички операционни режими на горене на разряда. Може да се твърди, че най-съществено е стимулирането и на двете стримерни форми на горене на бариерния разряд във въздух. При това, смяната на алуминия с електротехническа стомана не променя съществено размерите и теглото на електродната система. Технологичните характеристики, представени на фиг. 4 и 5, показват магнитно стимулиране на бариерни разряди с външно постоянно магнитно поле, създадено от анизотропни стронциеви постоянни магнити. Изследвани са две отворени (без магнитопровод) магнитни системи, съставени от анизотропни стронциеви постоянни магнити, разположени плътно един до друг. Може да се твърди, че съществена разлика между двете схеми на магнитно стимулиране - с и без магнитно огледало, няма. Естествено, това може да се дължи на относително ниското по интензитет постоянно магнитно поле. Магнитното „огледало” няма съществено предимство при тези условия пред стимулирането, определено от увеличената вероятност за ударно взаимодействие и удължения живот на електроните. На фиг. 6 и 7 са показани технологичните характеристики на бариерни разряди, които горят в магнитни структури, изградени с редкоземни постоянни магнити.



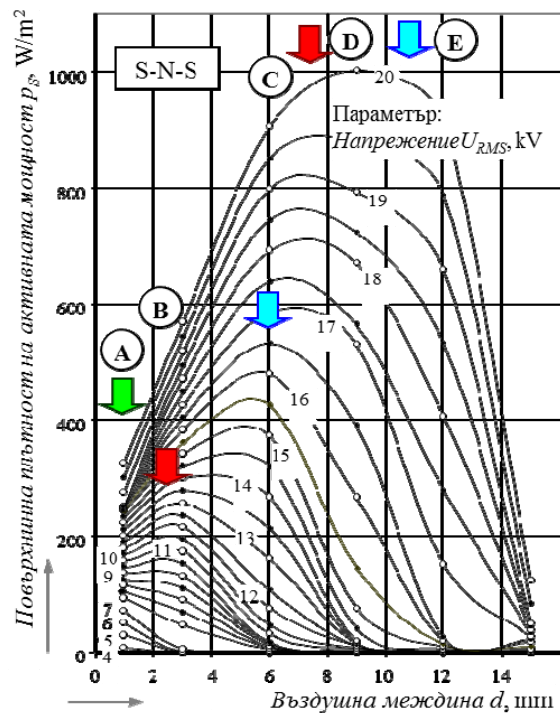
Фиг. 2. Изменение на повърхнинната плътност на активната мощност p_s на атмосферен бариерен разряд, който гори в плоско-паралелна двуелектродна система с немагнитни (алуминиеви) електроди, в зависимост от изменението на въздушната междина d при постоянна дебелина на стъклената (диелектричната) бариера $b = 3$ mm.



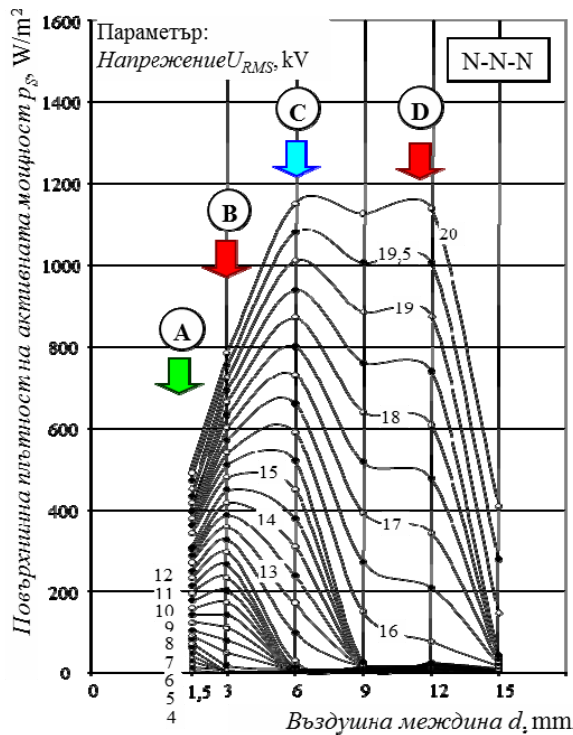
Фиг. 3. Изменение на повърхнинната плътност на активната мощност p_s на атмосферен бариерен разряд, който гори в плоско-паралелна двуелектродна система със стоманен (магнитен) противоелектрод (GE) и алуминиев (немагнитен) високоволтов електрод (HV-E), в зависимост от изменението на въздушната междина d при постоянна дебелина на стъклената (диелектричната) бариера $b = 3$ mm.



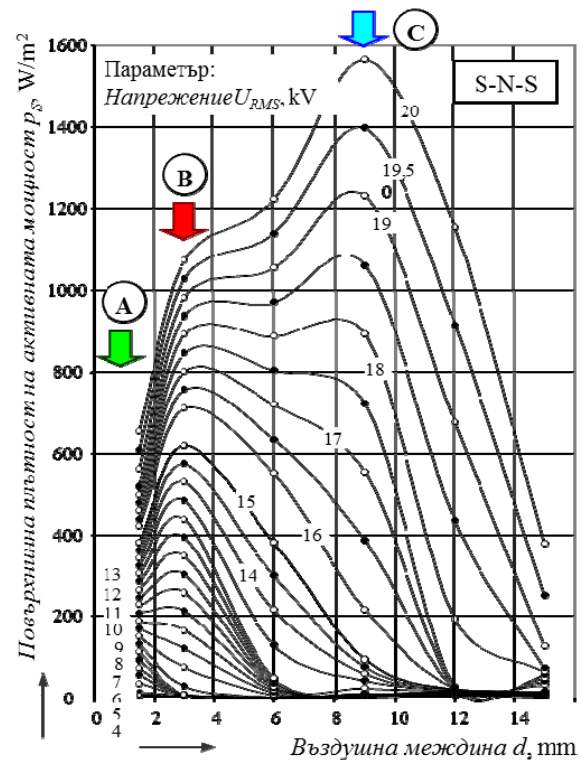
Фиг. 4. Изменение на повърхнинната плътност на активната мощност p_s на атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд, който гори в плоскопаралелна електродна система с немагнитни (алуминиеви) електроди и външно магнитно поле - магнитна конфигурация от вида S-S-S със stronциеви постоянни магнити, в зависимост от изменението на въздушната междина d при постоянна дебелина на стъклената (диелектричната) бариера $b = 3$ mm.



Фиг. 5. Изменение на повърхнинната плътност на активната мощност p_s на атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд, който гори в плоско-паралелна електродна система с немагнитни (алуминиеви) електроди и външно магнитно поле - магнитна конфигурация от вида S-N-S (магнитно огледало) със stronциеви постоянни магнити, в зависимост от изменението на въздушната междина d при постоянна дебелина на стъклената (диелектричната) бариера $b = 3$ mm.



Фиг. 6. Изменение на повърхнинната плътност на активната мощност p_s на атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд, който гори в плоско-паралелна електродна система с немагнитни (алуминиеви) електроди и външно магнитно поле - магнитна конфигурация от вида N-N-N с редкоземни постоянни магнити, в зависимост от изменението на въздушната междина d при постоянна дебелина на стъклената (диелектричната) бариера $b = 3$ mm.



Фиг. 7. Изменение на повърхнинната плътност на активната мощност p_s на атмосферен магнитно стимулиран бариерен разряд, който гори в плоско-паралелна електродна система с немагнитни (алуминиеви) електроди и външно магнитно поле - магнитна конфигурация от вида S-N-S (магнитно огледало) с редкоземни постоянни магнити, в зависимост от изменението на въздушната междина d при постоянна дебелина на стъклената (диелектричната) бариера $b = 3$ mm.

Тук ефектът на “магнитното огледало” вече е изразен много по-ясно, фиг. 7, във всички операционни режими на горене на бариерния разряд. Явно, увеличената стойност на интензитета на магнитното поле позволява ясно да се разграничат двата ефекта от действието на външното магнитно поле - увеличената вероятност за ударно взаимодействие между леката и тежката компонента на неравновесната плазма на разряда и удължения живот на електроните в областта на магнитното огледало.

Проведено изследване чрез числено моделиране на магнитното поле в разрядната междина при шахматно разположение на постоянните магнити по схемата на “магнитно огледало”, показва това, че използването на едностранно затворена магнитна система не променя съществено разпределението на магнитната индукция в близост до диелектричната бариера, както и не разкри съществена разлика във влиянието на външното магнитно поле по отношение на надлъжната и напречната компонента на магнитната индукция. Нещо повече, установи се влошаване на разпределението на магнитната индукция и намаляване на нейната стойност, което е в добро съответствие с наши изследвания върху магнитното стимулиране в триелектродна разрядна система с плоскопаралелни немагнитни и магнитни електроди. Тези допълнителни изследвания ни дават основание да твърдим, че показаната магнитна структура от постоянни магнити, фиг.1a, образуваща “магнитно огледало” върху повърхността на диелектричната бариера позволява в максимална степен да се

прояви ефекта от магнитното стимулиране на разряда върху технологичната му характеристика.

5. Заключение

В резултат от проведеното теоретично и експериментално изследване могат да се направят следните съществени изводи:

1. Магнитното стимулиране на бариерния разряд във въздух с външно постоянно поле позволява да се достигнат значими резултати при всички операционни режими на горене на разряда и това, което е от особена важност за практическото приложение на тази плазмена технология – при относително големи разрядни междини;
2. Представата за “магнитно огледало” е приложима при по-висока интензивност на външното постоянно магнитното и това е възможно като се съставят подходящи структури от редкоземни постоянни магнити.
3. “Затварянето” на магнитната система не носи съществени положителни резултати, поради което е излишно да се търси усложняване на магнитната система.

БЛАГОДАРНОСТИ

Тази работа е осъществена с изключителната финансова подкрепа на Националния фонд за научни изследвания по проект MOMH-ДУНК-01/3: «Създаване на Университетски научно-изследователски комплекс (УНИК) за иновации и трансфер на знания в областта на микро/нано технологии и материали, енергийна ефективност и виртуално инженерство»; задачи SP4.2 „Получаване, изследване, и характеризирание на многослойни мултифункционални нетъкани материали с участието на нановлакна за филтри, термоизолации, и индустриално приложение” и SP4.3 “Получаване, изследване и функционален избор на модифицирани повърхности с неорганични/органични хибридни зол-гел покрития с индустриално и екологично предназначение”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Roth, J.** Industrial Plasma Engineering: Application of non-thermal plasma processing. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001.
- [2] **Kögelschatz, U.** Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Plenum Publishing Corporation, March 2003, Vol. 23, No. 1, pp. 1÷46.
- [3] **Becker, K., U. Kögelschatz, K. Schoenbach, R. Barker** (Eds). Non-equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2005.
- [4] **Shishoo, R.** (Ed.). *Plasma Technologies for Textile*. Cambridge: Woodhead, 2007.
- [5] **Fridman, A.** *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press, 2008.
- [6] **Dineff, P., D. Gospodinova.** *Technological Characteristics of Magnetically Stimulated Surface Dielectric Barrier Discharge*. X. International Conference on Advanced Materials and Operations “AMO’10”, June 27÷29, **2010**, Varna, Bulgaria. *Advanced Materials and Operation Journal*, Vol.: 1, Issue: 3, **2010**: pp. 63÷72.
- [7] **Динев, П., Д. Господинова.** *Технологични характеристики на магнетронен диелектричен бариерен разряд при атмосферно налягане*. XXV. Юбилейна научна конференция с международно участие „МТФ’07”, 14÷16 септември **2007**, Созопол, България. Сборник доклади, **2007**, Том: 1, стр. 232÷237.
- [8] **Динев, П., Д. Господинова.** *Технологични характеристики на магнетронен диелектричен бариерен разряд във вакуум*. XXV. Юбилейна научна конференция с международно участие „МТФ’07”, 14÷16 септември **2007**, Созопол, България. Сборник доклади, Издателство на ТУ-София, **2007**, Том 1, стр. 238÷244.
- [9] **Динев, П.** *Електротехнология. Част първа: Въведение в електротехнологията*. София, Технически университет, 2000, стр. 385÷388.

Автори: Петър Динев, Диляна Господинова и Райна Ценева, катедра „Електрически апарати” на Електротехническият факултет на Техническият университет – София, E-mail address: dineff_pd@abv.bg

Постъпила на 10.11.2011

Рецензент проф. д-н Е. Николов

ОПТИМИЗАЦИЯ НА ФОРМАТА НА МОГНИТОПРОВОД С ГЕНЕТИЧЕН АЛГОРИТЪМ

Илиана Маринова, Анелия Терзова, Валентин Матеев

Резюме: В тази статия е представен подход за оптимизация на формата на електромагнитна система, използващ генетичен алгоритъм. Използван е двумерен модел, реализиран с метода на крайните елементи. Оптимизационна процедура е организирана да създава предварително зададено поле. Моделът е реализиран с компютърната програма Femm. Оптимизационната процедура е реализирана посредством тулбокса за генетични алгоритми на програмата Matlab, който използва Femm модела през Octave/Lua интерфейс. Предложеният метод е демонстриран при оптимизация на формата на полюсите на безчетков постоянно токов двигател.

Ключови думи: оптимизация, генетични алгоритми, метод на крайните елементи, компютърно проектиране

SHAPE DETERMINATION OF MAGNETIC CORE BY GENETIC ALGORITHM

Iliana Marinova, Aneliya Terzova, Valentin Mateev

Abstract: In this work a general approach for shape optimization by genetic algorithm method is proposed. 2D finite element field magnetic model is implemented and applied for optimal shape determination for given field distribution. Field modeling employs the Femm software package. Optimization is made by genetic algorithm toolbox of Matlab which employs the Femm model true Octave/Lua interface. An example of BLDC motor pole is designed for optimal shape determination.

Keywords: shape optimization, genetic algorithms, finite element method

1. Introduction

Permanent magnet brushless DC (BLDC) motors are increasingly being used in industrial and household products because of their high torque density, high efficiency, and low noise. Several applications of these motors require to be satisfied some specifications such as accurate positioning with high speed and etc. The vibration due to mechanical or electrical exciting force can disturb these requirements. Especially, because of the increase of the motor speed and the application of the high energy permanent magnet, the exciting force of high frequency due to electromagnetic origin causes new problems. The machine performance depends on the interaction between

the rotor and the stator fields and it is greatly affected by the configuration of the rotor permanent magnets and stator teeth. Pole shape improvement can be performed using modern optimization methods to obtain better magnetic field distribution. [1]

From the mathematical point of view, optimization is a process of finding global maximum (or minimum) of some objective function. There are several approaches to this problem. One class of optimization techniques uses well-known conjugate-gradient (CG) methods for solving systems of linear equations, and Quasi-Newton (QN) methods for the non-linear case. Another class is so-called Simplex method, using the concept of a simplex in choosing in which direction to lead the search. Both these techniques are considered local in that the solution they find is highly dependent on the initial point of search. They can never guarantee that the solution is really the best, but due to their usual tight connection with the problem, they tend to converge to the solution relatively quickly. Another problem with local techniques is that all of them impose some constraints on the objective function in terms of continuity and differentiability, which are sometimes impossible to achieve. Very different class from these is stochastic optimization. Techniques that fall into this category are considered global and they usually work with population of candidate solutions, not just with one solution, using probabilistic transitions between points in search space. Since they usually do not use any knowledge about the problem, their convergence is slower than that of local techniques. But the fact that they can work with any kind of optimization function, being it noncontinuous, non-differentiable, or with any kind of constraints, gives global techniques a great potential for use in various fields where finding the best solution is more important than the convergence time. Different stochastic methods are developed: genetic algorithms (GA), evolution strategies, Monte Carlo, simulated annealing, particle swarm, etc. GA is one of the methods that proved to be good in solving problems in electromagnetics – they are robust enough and easily implemented in the same time. [1-5, 10]

2. Optimization process realization

Optimization is made by genetic algorithm toolbox of Matlab which employs the Femm model true Octave/Lua interface.

Finite element method is used to solve electromagnetic problem. The Femm software package [7] was employed. Computations were automated using Octave-Femm library. Fig.1.

Octave/Lua interface is a Matlab toolbox that allows for the operation of Finite Element Method Magnetics (Femm) via a set of Matlab functions. The toolbox works with Octave, a Matlab clone. When Octave-Femm starts up a Femm process, the usual Femm user interface is displayed and is fully functional. The user then has the choice of accomplishing modeling and analysis tasks either exclusively through functions implemented by the toolbox, or by a combination of manual and programmatic operations – whichever is easiest for the task at hand. The syntax of the Octave-Femm toolbox closely mirrors that of Femm's existing Lua scripting language interface associated with Femm v4.2. However, there are some differences between the Lua functions and the analogous Octave/Matlab implementations. [8, 9]

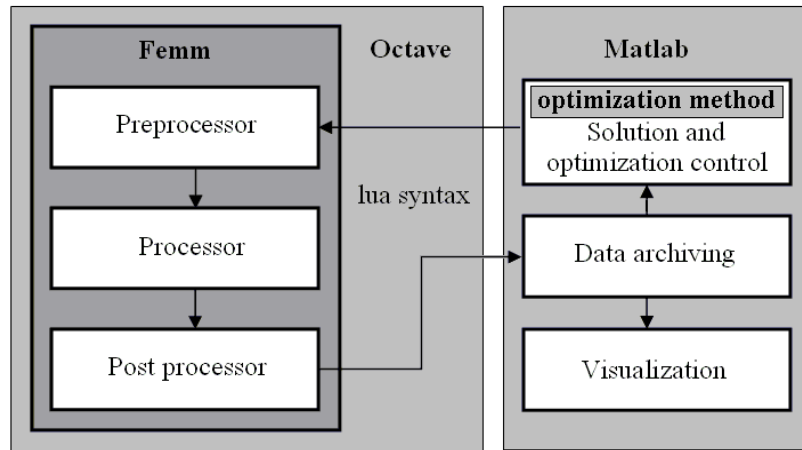


Fig.1 Block structure of proposed optimization process.

3. Brushless DC Motors

In Fig. 2 is shown the geometry of investigated BLDC motor. The stator consist of 24 slots. Used relative magnetic permeability for stator material is $\mu=4416$. The rotor consists of 4 poles. Poles are four permanent magnets. Material used for the poles is NdFeB 32 alloy whit relative magnetic permeability 1.045, electrical conductivity 0.694 S/mm and coercivity 883310 A/m. The rotor shaft is made of nonmagnetic material.

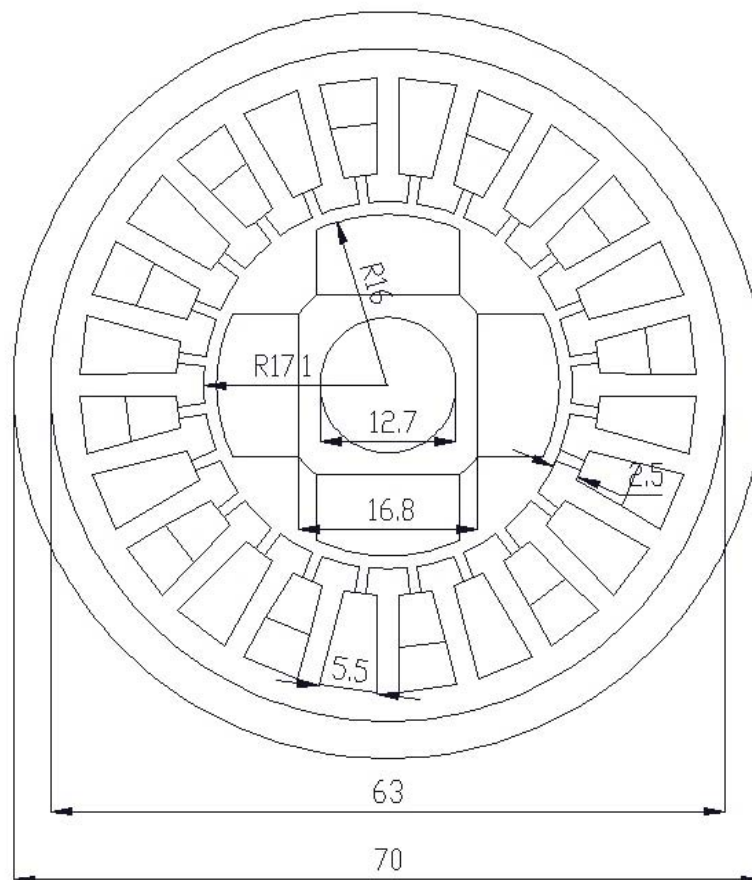


Fig.2 BLDC motor cross-section

4. Implementation

BLDC motor pole is investigated (Fig.3-a) for optimal shape determination. The pole face should be shaped in such way that cogging torque has a minimum value. 2D finite element field magnetic model is implemented and applied for optimal shape determination for the given cogging torque.

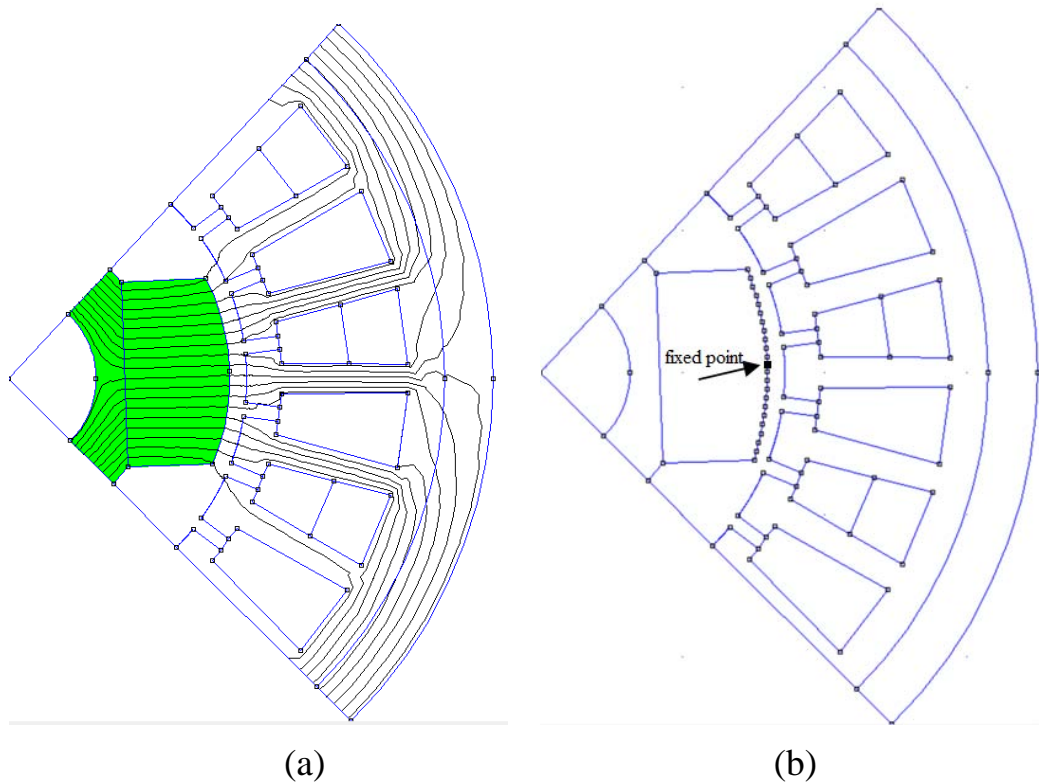


Fig.3 Permanent magnet pole

Objective Function (OF) used by optimization process is (1):

$$OF = \min(CT) \quad (1)$$

where CT represents calculated cogging torque. The value of OF is minimized (ideally, to set it to zero) by changing pole face, so that the cogging torque declines from the prescribed one.

Pole shape is described by eleven variable points from the top which have symmetrical position underneath (Fig.2-b). One fixed point is used as pole shape constraint. Variable point's coordinates are parameters of optimization process. In that case multiparametric optimization problem is solved.

Calculated cogging torque value by Femm is used in objective function (1).

5. Results

Magnetic field distributions obtained by Femm are shown in Fig.-Fig. 5-7. These results represent the field distribution for important stages of optimization process. On Fig.5 is shown magnetic field distribution with poles initial shape. Magnetic field distribution during shape optimization process is presented on Fig.6. Finally obtained result can be seen on Fig.7, where BLDC motor magnetic field distribution with poles best shape is demonstrated.

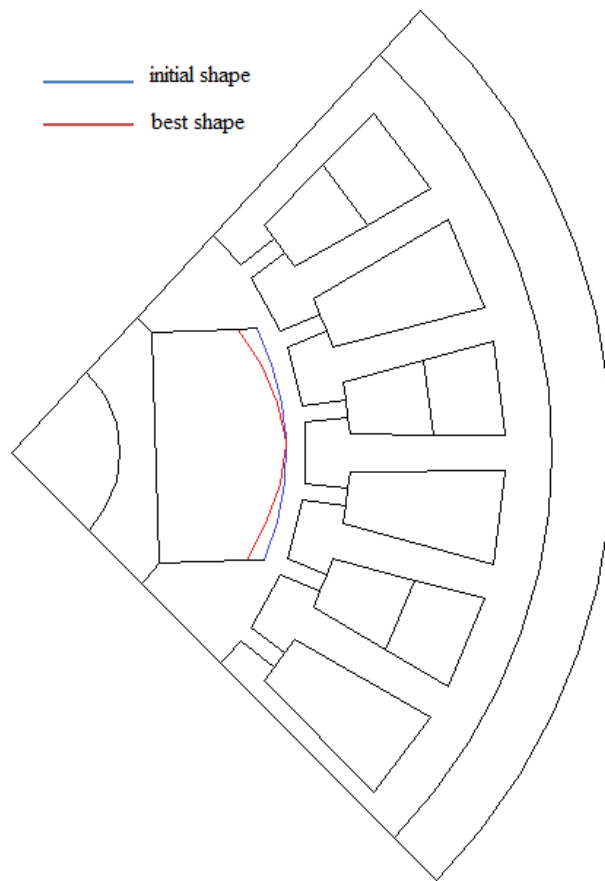


Fig.4. Initial and best shape of pole

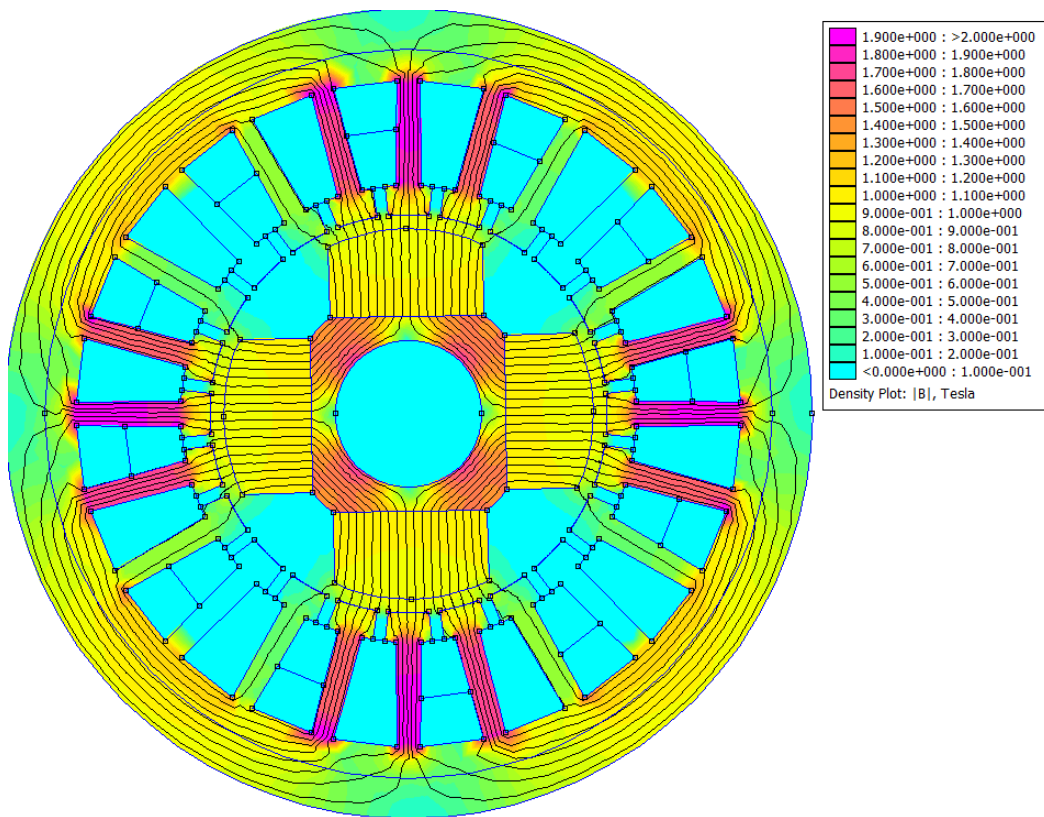


Fig.5 Magnetic field distribution with poles initial shape

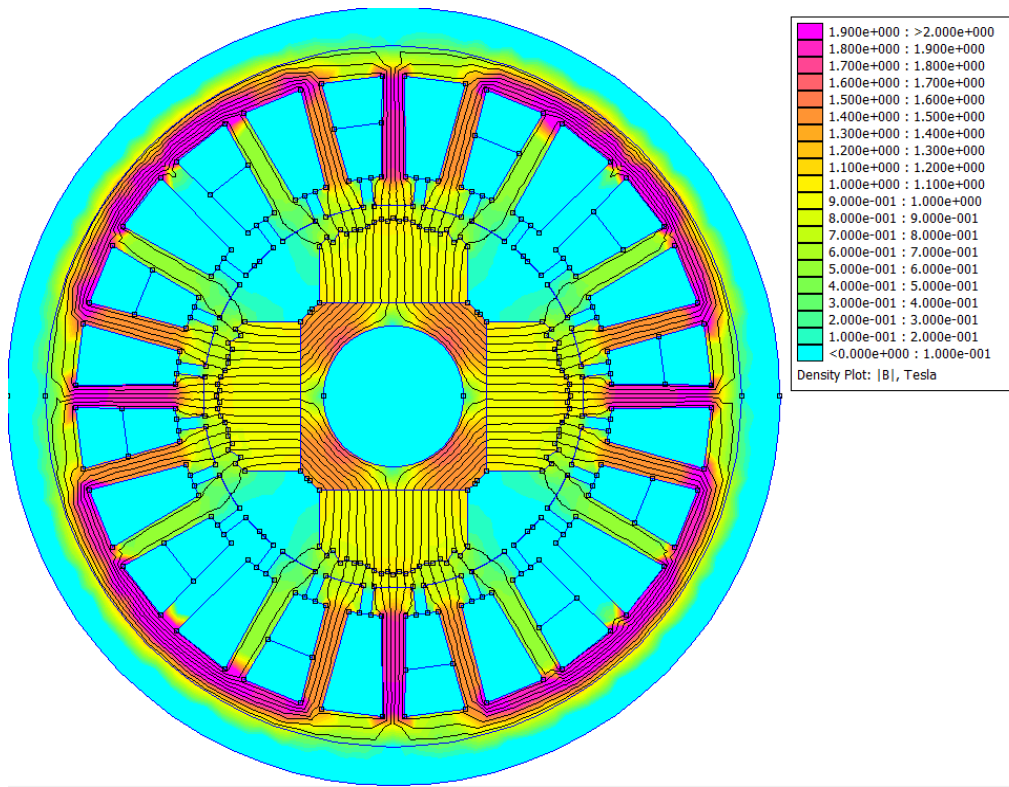


Fig.6 Magnetic field distribution during shape optimization process

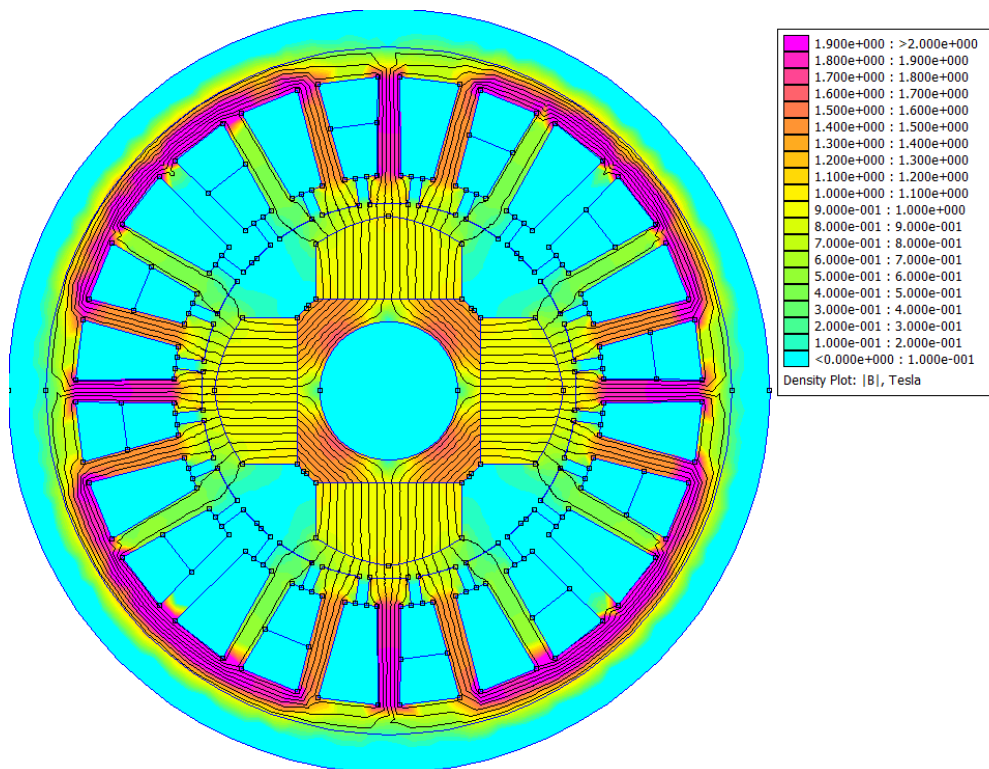


Fig.7 BLDC motor magnetic field distribution whit poles best shape

Result for cogging torque values in BLDC motor is calculated by Femm model. Calculated initial cogging torque values and final cogging torque are shown on Fig.8.

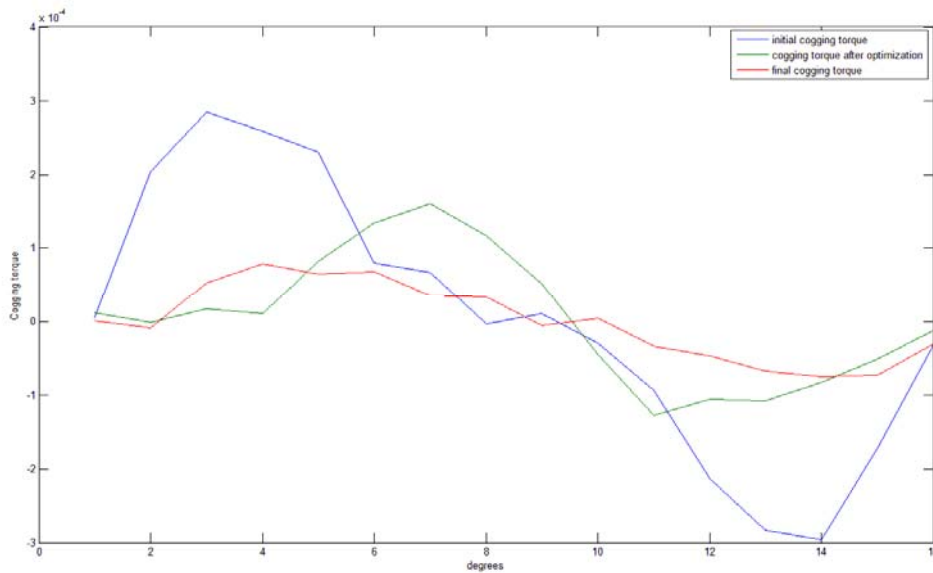


Fig.8 Calculated initial cogging torque values and final cogging torque in motor.

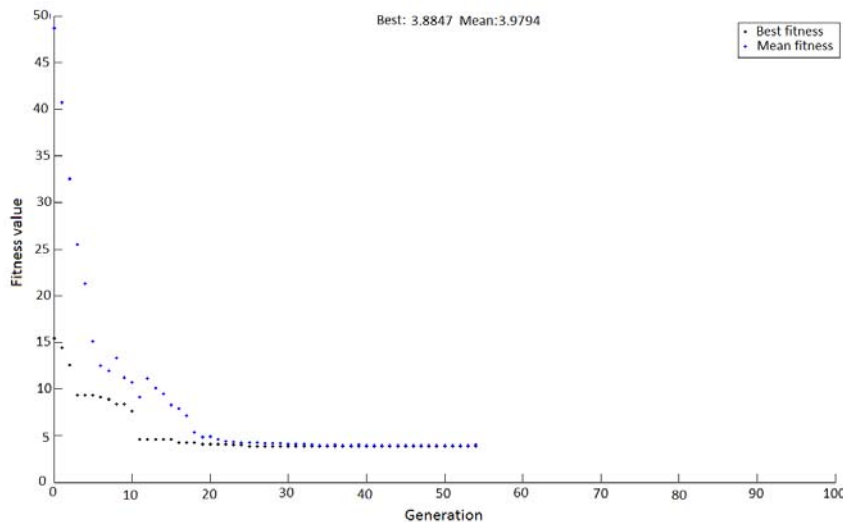


Fig.9 Optimization process progress for each generation.

Optimization process progress for each generation is shown on Fig 9. There the evolution of best solution can be observed for sequence of different generations. In that case optimization process includes 55 generations for reaching minimal cogging torque value criteria.

6. Conclusion

Highly effective and fast method and implementation for two-dimensional pole and magnet shape optimization for permanent magnet motor is introduced in this paper. Method is based on GA minimization which employs a finite element method model. Optimization is made by genetic algorithm toolbox of Matlab which employs the Femm model true Octave/Lua interface. Finite element method is used to solve electromagnetic problem. Computations were automated using Octave-Femm library. Matlab environment offers easy storage, processing and visualization of optimization process data. Method's capabilities are for general optimal shape determination for

given field distribution using complex objective function. A BLDC motor pole is designed for optimal shape determination. This example illustrates multiparametric optimization problem. GA method realization offers some strong advantages in that case such as fast global minimum reaching and high accuracy due to Femm model included in optimization process.

7. Acknowledgement

Part of this research is supported by the National Science Fund of the Ministry of Education and Science of Bulgaria under Contract “D002-157/2008”.

REFERENCES

- [1] Jabbari A., Shakeri M., Gholamian A., (2009), **Rotor Pole Shape Optimization of Permanent Magnet Brushless DC Motors Using the Reduced Basis Technique**, Advances in Electrical and Computer Eng., Vol. 9, No. 2, pp. 75-81.
- [2] Timarac I., Gacanovic M., **Genetic algorithms and their application in solving shape optimization problems in electromagnetics**, Proceedings of the International PhD Seminar “Computational Electromagnetics and Technical Applications”, Banjaluka, Bosnia and Herzegovina, 2006.
- [3] Wiak S., Krawczyk A., Doležel I., **Intelligent computer techniques in applied electromagnetics**, Springer-Verlag, 2008.
- [4] Di Barba P., **Multiobjective shape design in electricity and magnetism**, Springer, 2010.
- [5] Di Barba P., Savini A., Wiak S., **Field models in electricity and magnetism**, Springer, 2008.
- [6] Alexandrov A., **Computer aided design of electrical apparatus**, Avangard-Prima, 2004.
- [7] Meeker D., **Finite element method magnetics**, Version 4.2, User’s manual, 2009.
- [8] Meeker D., **Finite element method magnetics: OctaveFEMM, Version 1.2**, User’s manual, 2009.
- [9] Matlab Inc, **The Language of Technical Computing, MATLAB Graphics Reference**, 2006.
- [10] Terzova A., Katsarski K., Kashukeev K., Mateev V., Marinova I., (2010), **Computer Modelling and Optimization of Electromagnets in Education on Electrical Apparatus**, Proceedings of the International PhD Seminar “Computational Electromagnetics and Optimization in Electrical Engineering”, 10-13 September 2010, Sofia, Bulgaria, 2010, pp. 154-158.

Автори: Илиана Маринова, професор дтн инж., катедра “Електрически апарати”, email: iliana@tu-sofia.bg; бак. инж. Анелия Терзова, студент, катедра “Електрически апарати”; маг. инж. Валентин Матеев, асистент, катедра “Електрически апарати”, email: vmateev@tu-sofia.bg

Постъпила на 09.11.2011

Рецензент проф. дтн Е. Николов

МОДЕЛИРАНЕ НА ПРЕХОДЕН ПРОЦЕС НА ЕЛЕКТРОМАГНИТЕН ИЗПЪЛНИТЕЛЕН МЕХАНИЗЪМ

Валентин Матеев, Илиана Маринова, Анелия Терзова

Резюме: В статията е разгледан подход за изграждане на многосвързан модел, обединяващ задача за анализ на поле на електромагнитно устройство заедно с електрическата му верига. Моделът на електрическата верига е реализиран в среда Matlab/Simulink. Полевите модели са изпълнени с компютърната програма Femm. Двете задачи в двете среди са свързани и решени последователно за всяко стъпка във времевата област. Възможностите на подхода са демонстрирани при изследването на преходен процес на включване на електромагнитен изпълнителен механизъм.

Ключови думи: многосвързани задачи, свързани задачи поле електрическа верига, електромагнитни механизми, моделиране

TRANSIENT ELECTROMAGNETIC MODELING OF ELECTROMAGNETIC SYSTEM

Valentin Mateev, Iliana Marinova, Aneliya Terzova

Abstract: In this work a general approach to couple field models with electric circuits is presented. Transient 2D finite element field models and circuit coupling are described. The system of electric circuit is created in Matlab/Simulink environment. Field modeling employs the Femm software package. They are coupled together and solved simultaneously at each time step in the time domain. A DC electromagnetic actuator with controllable power supply is investigated as application example.

Keywords: multiphysics field modeling, circuit coupling, electromagnetic system modeling.

1. Introduction

The process of numerical simulation of electrical equipment requires that the effect of electric and power electronic circuits to be considered. To take geometric complexity, non-linearity, induced eddy currents, mechanical movement and electric circuits with general topologies into account, it is necessary to couple the Finite Element Method (FEM) with electric circuit analysis. For higher accuracy, it is essential to take into account the interaction of the physical field models in FEM domain with circuit domain.

Over the past years, field and circuit coupling has been commonly used in time domain simulations. There are two basic approaches to coupling the FEM with circuit equations. One is direct coupling where the field and circuit equations are coupled directly together and solved simultaneously. The other one is indirect coupling. In this case, the FEM and circuit simulator are treated as separate systems. They communicate with each other by means of coupling coefficients. These coupling coefficients can be lumped inductance matrices along with the back emf vector extracted from field solutions and computed winding currents from circuit simulation; or they can be winding currents computed from field solutions and equivalent circuit parameters (impedances, circuit voltages) across winding terminal ports derived from circuit simulation. Another better choice for the coupling coefficient approach is to derive lumped inductance matrices and back emf vector from field solutions and equivalent circuit parameters from the circuit simulation because this way of indirect coupling is more accurate and stable. For direct coupling, the obvious advantages are reliable convergence and computationally efficiency. Indirect coupling becomes attractive when there is a need to allow field simulators and circuit simulators to work independently, which makes the development of individual simulators more flexible and the implementation of the coupling easier. [1-7]

In this paper, a highly efficient approach for indirect coupling the FEM with external electric circuits is presented.

A DC electromagnetic actuators with double E-shaped core is investigated as application example to demonstrate the proposed methods. Electromagnetic actuator is fed by controllable power electronic current supply.

2. Multiphysics Simulation Environment

Multiphysics field and electric circuit coupling is made with Finite Element Method Magnetics (Femm) software package v4.2 [8], controlled by Octave/Lua interface and electric circuit model is made in Matlab/Simulink environment. Block structure of proposed model coupling is shown in Fig. 1.

Finite element method is used to solve electromagnetic and thermal problem. The Femm software package was employed. Computations were automated using Octave-Femm library.

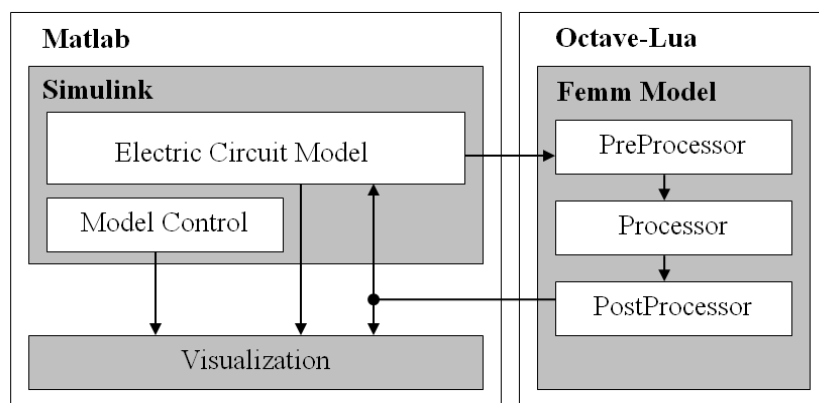


Fig.1. Block structure of proposed model coupling.

Octave/Lua interface is a Matlab toolbox that allows for the operation of Femm via a set of Matlab functions. The toolbox works with Octave, a Matlab clone. When Octave-Femm starts up a Femm process, the usual Femm user interface is displayed and is fully functional. The user then has the choice of accomplishing modeling and analysis tasks either exclusively through functions implemented by the toolbox, or by a combination of manual and programmatic operations – whichever is easiest for the task at hand.

The syntax of the Octave-Femm toolbox closely mirrors that of Femm’s existing Lua scripting language interface associated with Femm. However, there are some differences between the Lua functions and the analogous Octave/Matlab implementations. [4, 9, 10]

3. Implementation

A DC electromagnetic actuators with double E-shaped core is investigated (Fig.2), where $a=8\text{mm}$, $b=90\text{mm}$, $c=42\text{mm}$, $X=40\text{mm}$, $Y=60\text{mm}$.

Electromagnet consists of a stationary ferromagnetic core and a movable ferromagnetic part (armature), which is separated from the core by an air-gap δ . A coil with windings w is also provided, serving as a source of power to energize the magnetic circuit. Magnetomotive force (mmf) Iw , creates magnetic flux. Magnetic flux creates electromagnetic force which will attract the armature. The power consumed in a DC electromagnet is due to the resistance of the windings, and is dissipated as heat. The electromagnet is powered by controllable power electronic block presented by its circuit.

DC electromagnet modeling is made as transient multiphysics problem where separate problems are described as follows.

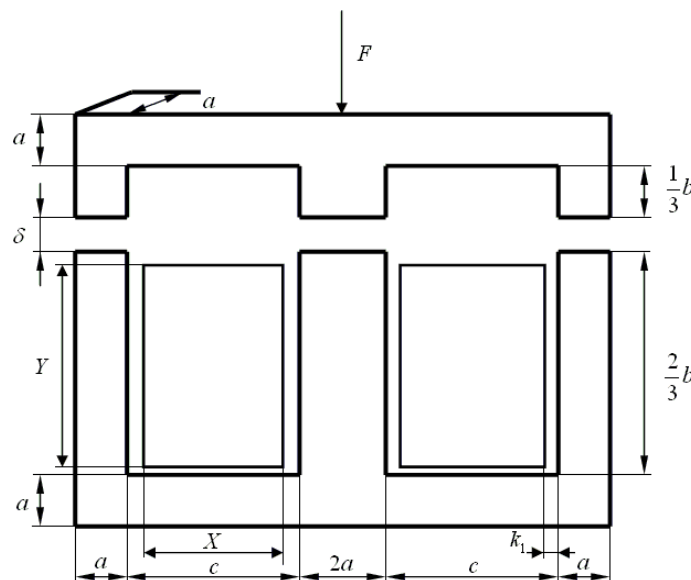


Fig.2. Double E-shaped electromagnet.

3.1. Magnetic Problem

The static magnetic field is governed by the Poisson’s equation with respect to the magnetic vector potential

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (1)$$

where μ is magnetic permeability;

\mathbf{J} is the current density in the coil;

\mathbf{A} is the magnetic vector potential.

For open boundary electromagnetic problem the homogeneous Dirichlet's boundary conditions are imposed on its boundary. On the planes of symmetry either homogeneous Dirichlet's or natural boundary conditions are imposed.

The electromagnetic force is calculated by the Maxwell stress tensor method. As the motion is only in y-direction, only y-component of the velocity is non-zero.

Magnetic inductance L is calculated by stored magnetic field energy – W expressed by (2)

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2)$$

where i is the coil current.

Results for magnetic field distribution is shown in Fig.5.

3.2. Thermal problem

The thermal field at steady-state is governed by the Poisson's equation with respect to the temperature T

$$\lambda \nabla^2 T = -Q \quad (3)$$

where Q is the heat source defined by the electric losses in the coil;

λ is the thermal conductivity.

Heat source density Q defined by the electric losses in the coil are calculated by(4)

$$Q = \frac{J^2}{\sigma} \quad (4)$$

where σ is specific electric conductivity of coil material.

For the thermal problem buffer zone is not introduced and convection boundary conditions are imposed on the outer surface of the electromagnet. On the planes of symmetry natural boundary conditions are used.

Convection boundary conditions expressed by (5) are imposed on the outer surface of electromagnet.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = -q \quad (5)$$

where q is the heat flux and k is the convection coefficient and n is unit outward surface normal vector.

On the planes of symmetry natural boundary conditions are used (6)

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

3.3. FEM Coupling

DC electromagnet is described with its two FEMM thermal and magnetic field models (Fig.3). Simple first order coupling between two field models is made. The coupling of the two fields is in both directions. The electromagnetic field analysis de-

depends on the results of the thermal field. The electrical conductivity is with temperature dependent value, which influences the electric current in coil region. Indirect coupling between the two problems (magnetic field and thermal one) has been utilized. The two problems are solved successively and after each solution the values of electromagnetic force and average temperature are stored.

3.4. Circuit Model

The electromagnet is powered by controllable power electronic block presented by its circuit. Electric circuit equation for the electromagnet coil is (7)

$$u = R(T)i + \frac{d\Psi(\delta)}{dt} \quad (7)$$

where u is the supplied voltage;

$R(T)$ is the resistance of the coil;

i is the coil current;

ψ is the flux linkage.

The current i flowing in the coil is a nonlinear function of flux linkage ψ that, in turn, is a function of air-gap δ and core magnetization

$$u = R(T)i + L(\delta, \Psi) \frac{di}{dt} \quad (8)$$

Commonly the values of magnetic inductance must be predefined as function to solve (8). Here needed inductance values are FEM determined only for ψ and δ of current load step.

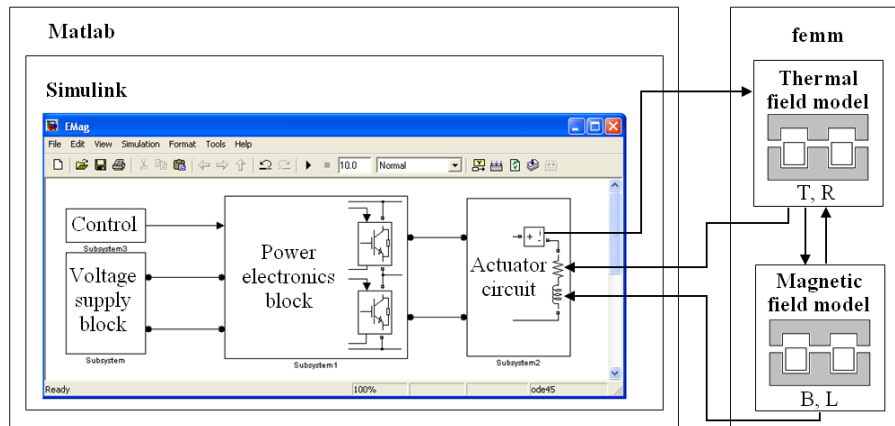


Fig.3. Coupled field problem block diagram.

Mechanical motion equation (9) must be included due to movable electromagnet core

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F - F_0 \quad (9)$$

where F is the electromagnetic force and F_0 is the initial force halting the armature. Air-gap is calculated in each time step using electromagnetic force.

3.5. Circuit-FEM Coupling

Both field problems are coupled with Matlab/Simulink circuit model interfacing with Octave/Lua, shown in Fig.3.

In circuit model the electromagnet is represented with its coil resistance - R and inductance – L (Fig.4), both calculated by Femm. Interactions are successively and for each time step the values of R and L are updated due to circuit current signal.

Circuit model is represented with several Simulink sub-system blocks, shown in Fig.4.

Power electronics block is a DC-DC controllable converter which fed the electromagnetic actuator circuit. In fact, it could be replaced by any supply source or electronic circuit model.

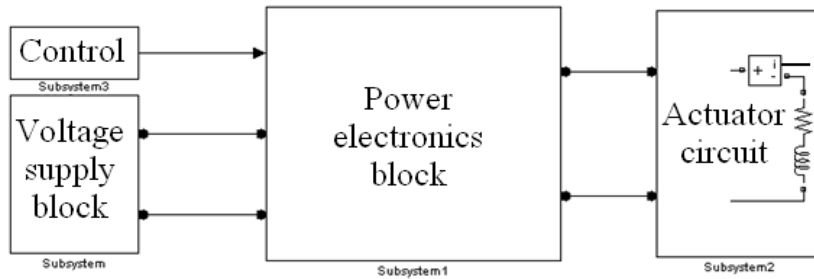


Fig.4. Electric circuit in Simulink.

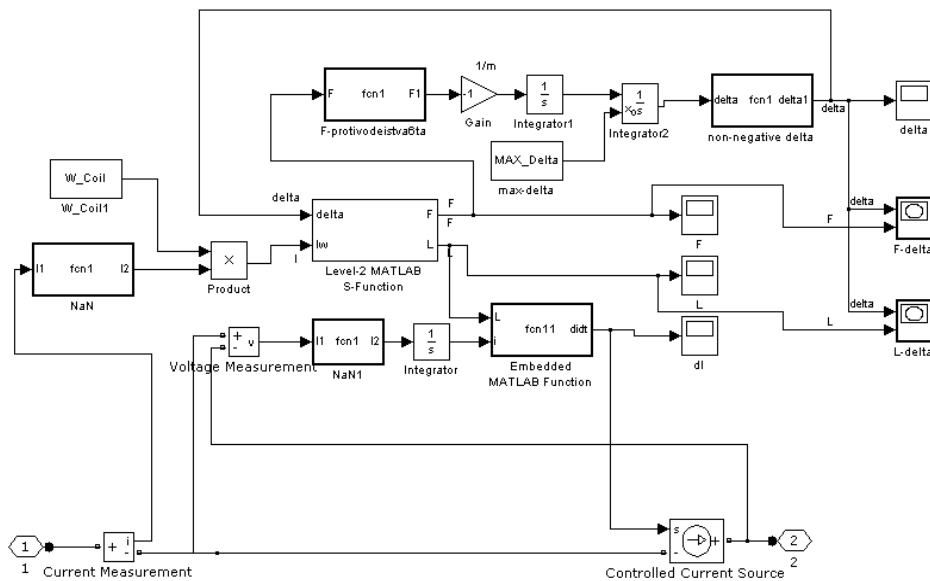


Fig.5. Electromagnetic actuator circuit sub-system.

Calculated electromagnetic force is used for air-gap calculation in each time step by (9).

Simulink block diagram of actuator circuit is presented in Fig.4. It realizes the Simulink-Octave interface. Octave-Femm interface is made by Lua-scrip file called by Simulink.

4. Results

As it has been mentioned above a DC electromagnetic actuators with double E-shaped core is investigated (Fig.2). The actuator is fed by voltage supply block and controllable DC-DC convertor. Used electric circuit schemes are shown in Fig.4. and Fig.5.

4.1. FEM Model

Result for thermal and magnetic field distributions in last moment of closing the armature are shown on Fig.5 and Fig.6. Magnetic flux density maximal value is 1T and maximal temperature of 45°C is in coil region.

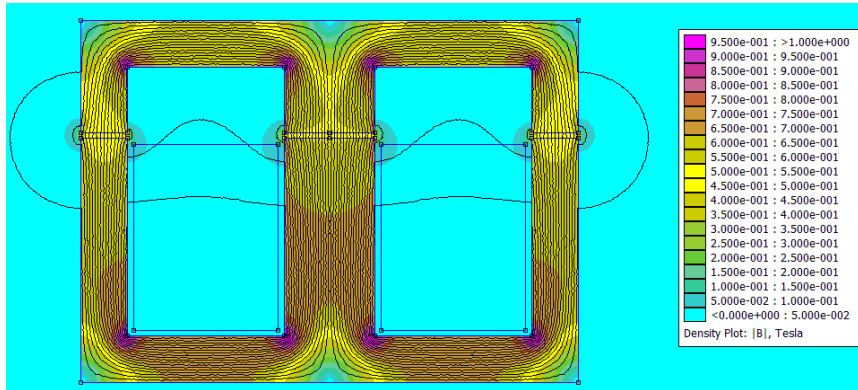


Fig.6. Magnetic flux density distribution.

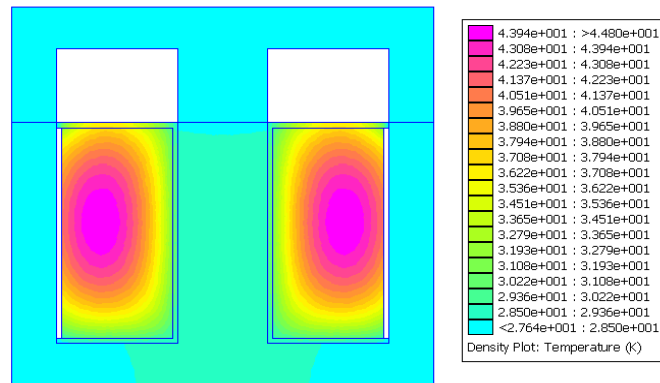


Fig.7. Thermal field distribution.

4.2. Dynamic characteristics

Dynamical characteristics of DC electromagnetic actuators are evaluated in time range 0 to 2 seconds. Transient process of closing the armature is presented. Matlab ODE23t method with time varying time step is used in evaluation [10].

DC electromagnetic dynamical characteristics are shown in Fig.-Fig. 8-11. Relatively low speed of armature displacement is due to large air-gap and initial damping force.

4. Conclusion

Highly effective and fast method for indirect coupling of field problems with circuit's model is proposed. Method uses the huge capabilities of Matlab/Simulink environment and popular Femm program with Lua-script and Octave interface.

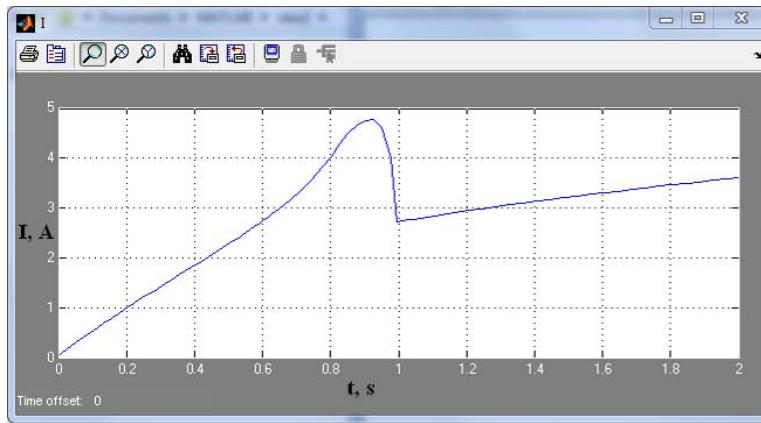


Fig.8. Actuator coil current.

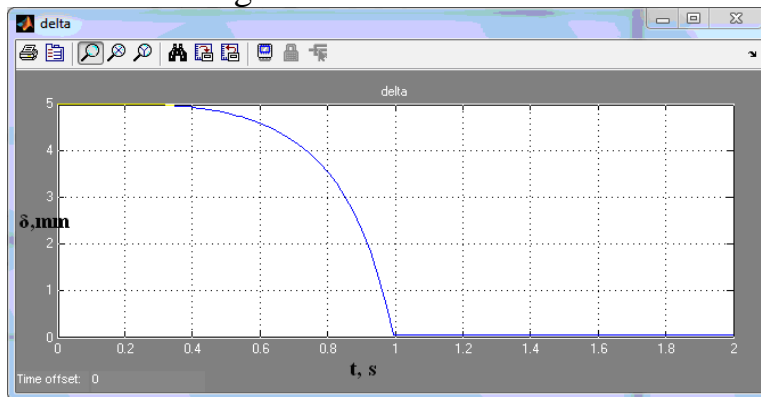


Fig.9. Armature displacement.

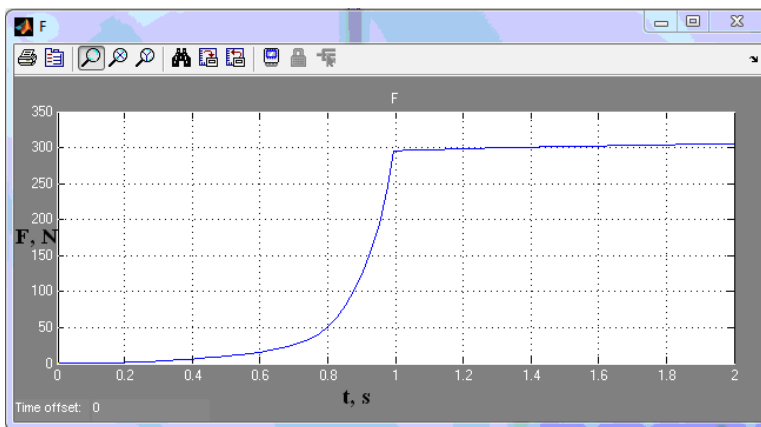


Fig.10. Electromagnetic force.

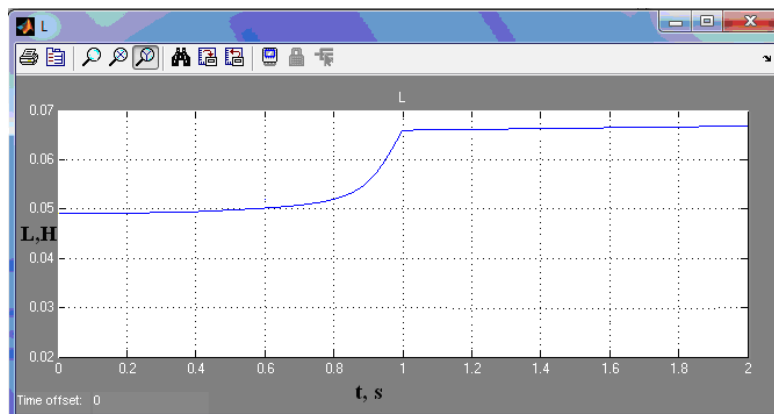


Fig.11. Electromagnetic actuator inductance.

A DC electromagnetic actuators with double E-shaped core is investigated with the proposed approach. The magnetic field model of the investigated electromagnetic actuator is built. The heating model is created. The couple magnetic-heating problem is formulated. The finite element method is applied for modelling of electromagnetic and heating processes and for determination of different characteristics as electromagnetic force, temperature distributions, coil inductance, magnetic flux density distributions etc. Both field problems are coupled with Matlab/Simulink circuit model interfacing with Octave/Lua. Simulink-Octave interface is realized. Octave-Femm interface is made by Lua-scrip file.

Method is suitable for accurate electrical drives investigations, optimization and design activities.

5. Acknowledgment

Part of this research is supported by the National Science Fund of the Ministry of Education and Science of Bulgaria under Contract "D002-157/2008".

REFERENCES

- [1] Zhou P., Fu W., Lin D., Stanton S., Cendes Z., Longya Xu, (2002), **Numerical Modeling of Electrical Machines and Its Application**, Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, 2002, Vol.3, pp. 1936–1942.
- [2] Di Barba P., A. Savini and S. Wiak, **Field models in electricity and magnetism**, Springer, 2008.
- [3] Yatchev I., (2003), **Coupled field problems in electrical apparatus**, Facta Universitatis. Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics, Vol.3, No15, 2003, pp. 1089–1101.
- [4] Terzova A., Katsarski K., Kashukeev K., Mateev V., Marinova I., (2010), **Computer modelling and optimization of electromagnets in education on electrical apparatus**. Proceedings of the 20th International PhD Seminar on Computational Electromagnetics and Optimization in Electrical Engineering - CEMOEE 2010, September 10-13, Sofia, Bulgaria, 2010, pp. 154-157.
- [5] Wiak S., A. Krawczyk and I. Doležel, **Intelligent computer techniques in applied electromagnetics**, Springer-Verlag, 2008.
- [6] Di Barba P., **Multiobjective shape design in electricity and magnetism**, Springer, 2010.
- [7] Alexandrov A., **Computer aided design of electrical apparatus**, Avangard-Prima, 2004 (in Bulgarian).
- [8] Meeker D., **Finite element method magnetics**, Version 4.2, User's manual, 2009.
- [9] Meeker D., **Finite element method magnetics: Octave/Femm, Version 1.2**, User's manual, 2009.
- [10] Matlab Inc, **The Language of Technical Computing, MATLAB Graphics Reference**, 2006.

Автори: Валентин Матеев, асистент маг. инж., катедра “Електрически апарати”, email: vmateev@tu-sofia.bg; Илиана Маринова - професор, дтн инж. катедра “Електрически апарати”, email: iliana@tu-sofia.bg; бак. инж. Анелия Терзова - студент, катедра “Електрически апарати”.

Постъпила на 09.11.2011

Рецензент проф. дтн Е. Николов

МОДЕЛИРАНЕ НА ПОВЪРХНОСТЕН ЕФЕКТ И ЕФЕКТ БЛИЗОСТ

Райна Ценева

Резюме: Статията е посветена на разработването на 2D-моделни, онагледяващи повърхностния ефект и ефекта близост с използването на програмния продукт FEMM, базиран на метода с крайни елементи. Създадени са модели за повърхностния ефект в кръгъл проводник, в кръгла тръба и в проводник с правоъгълно сечение при различни диаметри на проводника и тръбата и при различни честоти – от 50Hz до 100MHz. Също така са показани модели за положителния и отрицателния ефект близост при 2 успоредни правоъгълни шини, както и някои методи за намаляване на този ефект – чрез специални профили на шините и чрез разделянето им в пакет от няколко шини. Дискутирани и анализирани са получените резултати.

Ключови думи: моделиране, ефект близост, повърхностен ефект

MODELING OF SKIN AND PROXIMITY EFFECTS

Raina Tzeneva

Abstract: This paper discusses the development of 2D models illustrating the skin and proximity effects using FEMM software package, based on the finite elements method. Models of the skin effect in conductor of round cross section, round tube and conductor of rectangular cross section with different diameters and frequencies – between 50Hz and 100MHz are realized. Additionally models for the positive and negative proximity effect at two parallel busses with rectangular cross sections and the ways for reduction of this effect – using special profiles of the busses and splitting into packs are presented. The results obtained are discussed and analyzed.

Key words: modeling, proximity effect, skin effect

1. Въведение

Реалното съпротивление на проводника винаги е по-голямо при променлив ток, отколкото при постоянен ток. Алтернативният магнитен поток, създаван от променливия електрически ток взаимодейства с тока в проводника, създавайки електромагнитни вълни, които се стремят да намалят тока в проводника. Електромагнитните сили, образувани в този случай от самоиндукция варират както по големина и по фаза по сечението на проводника, като са по-големи в центъра и

по-малки по периферията на проводника. Следователно електрическият ток се стреми да се натрупа в тази част на проводника, в която противодействащите електромагнитни вълни са минимални, а това е по повърхността на кръгъл или тръбовиден проводник или по повърхността на плоска шина. Този ефект е известен като повърхностен или скин ефект. Ако R_f е активното съпротивление при променлив ток, а R_o – при постоянен ток, то отношението k_d е коефициентът на допълнителните загуби.

$$R_f = k_d R_o \quad (1)$$

Скин ефектът има значително практическо приложение при проектирането на радиочестотни или микровълнови вериги и в системите за пренасяне и разпределение на електрическата енергия.

Повърхностният ефект увеличава загубите в проводника поради намаляване на ефективното му сечение. При високи честоти за намаляване на този ефект проводниците се изработват многожилни. При това се усукват така, че всяка от отделните изолирани една от друга проводящи нишки да заема всички възможни положения по сечението на многожилния проводник.

2. Теоретична част

Токовата плътност J на един безкрайно тънък плосък проводник намалява експоненциално с дълбочината δ от повърхността, както следва [1], [2], [3]:

$$J = J_s e^{-\delta/d} \quad (2)$$

Където d е една константа, наречена дълбочина на проникването. Тя се дефинира като дълбочината под повърхността на проводника до която токовата плътност намалява до $1/e$ (около 0,37) от токовата плътност на повърхността J_s .

Дълбочината на проникването обикновено се изчислява по формулата

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (3)$$

Съпротивлението на плосък проводник (значително по-тънък от d) при променлив ток е точно равно на съпротивлението на плоскост с дебелина d при постоянен ток. За дълги, тънки проводници, каквито са тънките кръгли проводници съпротивлението е приблизително равно на тръба с дебелина на стената d , по която тече постоянен ток. Например за кръгъл проводник съпротивлението при променлив ток се изчислява приблизително по формулата:

$$R = \frac{\rho}{d} \left(\frac{L}{\pi(D-d)} \right) \approx \frac{\rho}{d} \left(\frac{L}{\pi D} \right) \quad (4)$$

където

L – дължина на проводника;

D – диаметър на проводника.

Освен повърхностен ефект, съществува и друг ефект, водещ до неравномерното разпределение на тока по сечението на проводника, наречен ефект близост. Той се дължи на взаимодействието на тока и електромагнитното поле на нами-

ращ се наблизо проводник. В зависимост от посоките на токовете в двата проводника ефектът близост бива:

- прав – при еднакви посоки на двата тока, при което плътността на тока се увеличава в противоположните страни на сеченията на двата проводника;
- обратен – при обратни посоки на двата тока, при което токовата плътност се увеличава в близките страни на сеченията на двата проводника.

Повърхностният ефект води до неравномерно но симетрично спрямо геометричния център на проводника (с кръгло, правоъгълно и др. симетрична форма на сечението) разпределение на тока, то ефектът близост винаги се характеризира с несиметрично разпределение на тока дори и при симетрични сечения. В действителност разпределението на тока при ефекта близост съответства на изменението на индуктивното съпротивление на отделните части от сечението на проводника.

Ефектът близост зависи от същите фактори, от които зависи повърхностният ефект – разстояние между проводниците, честота форма, размери и материал на проводниците.

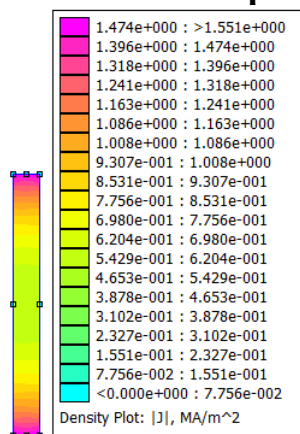
В повечето случаи повърхностният и ефектът близост се разглеждат съвместно, защото те не се проявяват самостоятелно, като коефициентът на допълнителните загуби

$$K_D = K_{\sigma} + K_{\pi} \quad \text{или} \quad K_D = K_{\sigma} \cdot K_{\pi} \quad (5)$$

3. Моделиране на повърхностния ефект и ефект близост

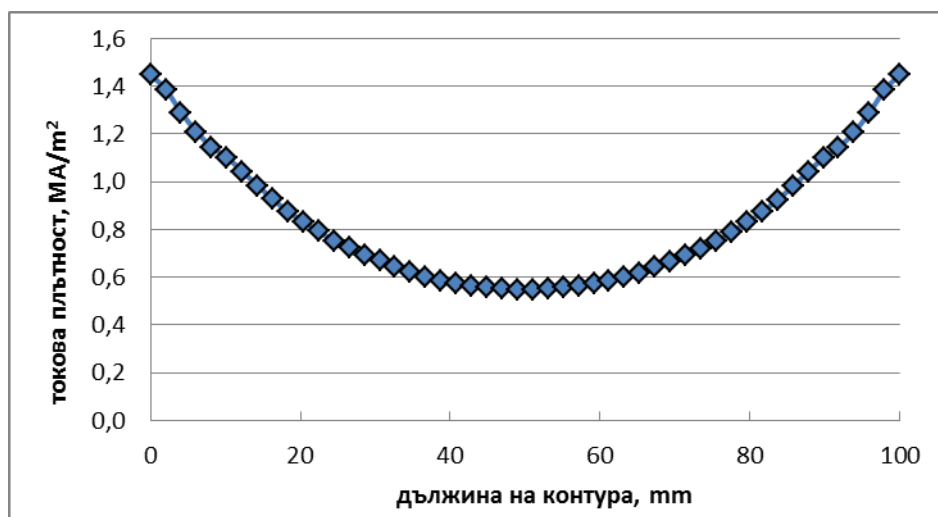
Моделирането е извършено с програмния пакет FEMM, базиран на метода с крайни елементи [4], [5]. Разгледани са следните случаи:

3.1. Повърхностен ефект на правоъгълна медна шина с размери 100 x 10mm, по която тече ток 800А с промишлена честота 50 Hz.



Фиг.1. Разпределение на токовата плътност в правоъгълна медна шина с размери 100 x 10mm, по която тече ток 800А с промишлена честота 50 Hz.

Вижда се, че разпределението на токовата плътност е неравномерно по сечението. На фиг.2 е показано нейното разпределение по надлъжната ос на сечението.

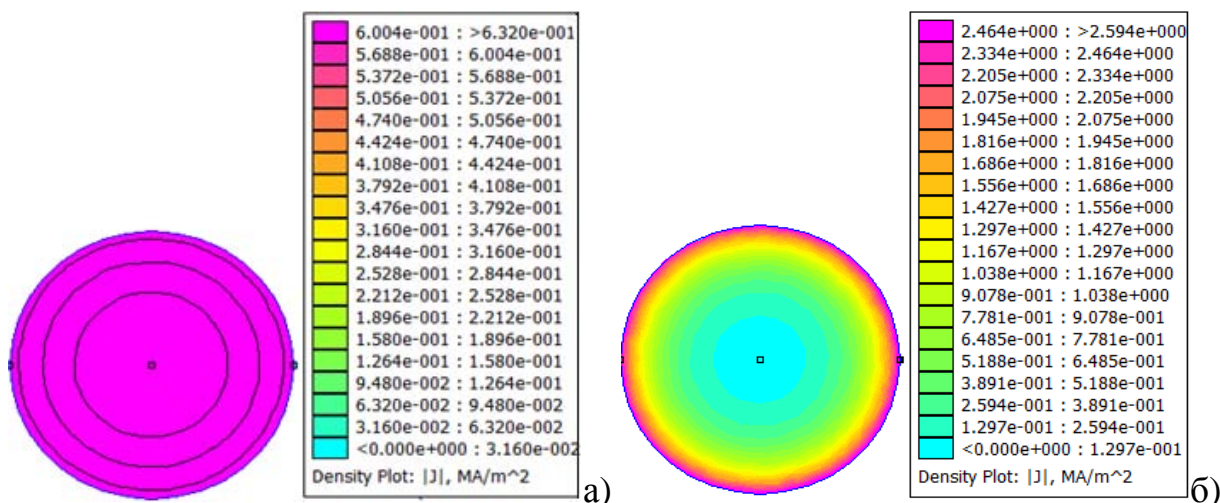


Фиг. 2. Разпределение на токовата плътност по дължината на надлъжната ос на правоъгълна медна шина с размери 100 x 10mm, по която тече ток 800А с промишлена честота 50 Hz.

Токовата плътност е приблизително 3 пъти по-голяма в двата края на контура ($j_{\max} \approx 1,5\text{MA/m}^2$).

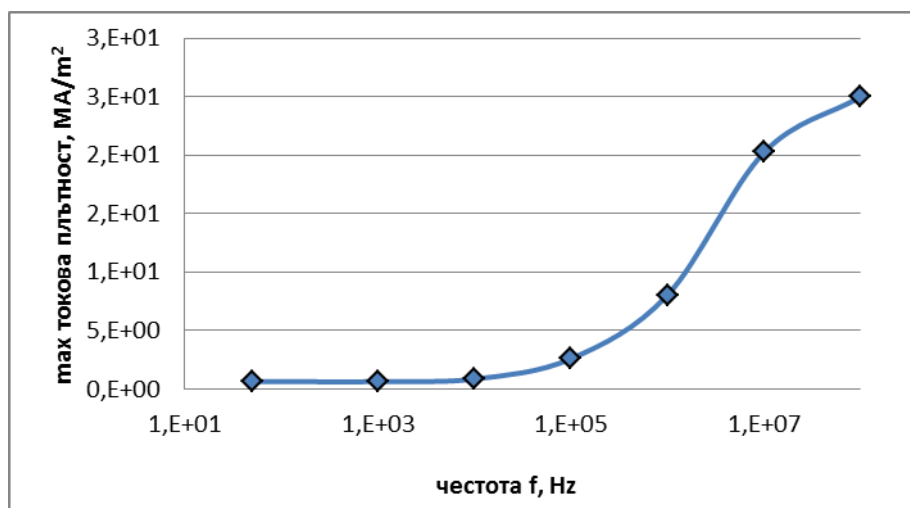
3.2. Скин ефект в цилиндричен проводник при различни честоти.

Разглежда се явлението повърхностен ефект в цилиндричен меден проводник с радиус 1mm, през който тече ток от 2,5А при честота 50Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz, 1MHz, 10MHz и 100MHz. На фиг. 3 е показано разпределението на токовата плътност в сечението при 50Hz – а) и при 100kHz – б).



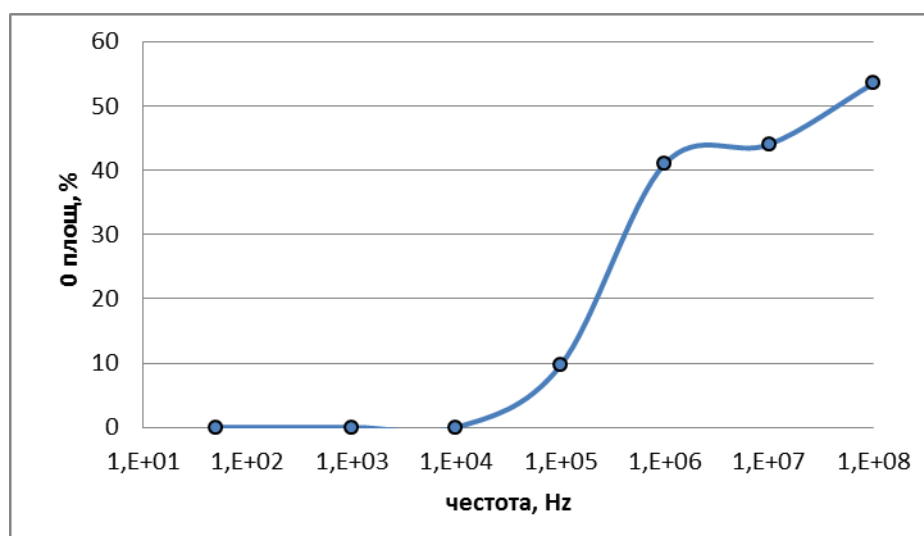
Фиг. 3. Разпределение на токовата плътност в кръгъл меден проводник с радиус 1mm, по който тече ток 2,5А с промишлена честота 50 Hz – а) и при 100kHz – б).

Фиг.4 показва зависимостта на максималната токова плътност при изменение на честотата при този случай. Видно е, че след 1E+04Hz зависимостта е растяща и при 100MHz j_{\max} е 30MA/m², т.е.повърхностният ефект е много силно изразен.



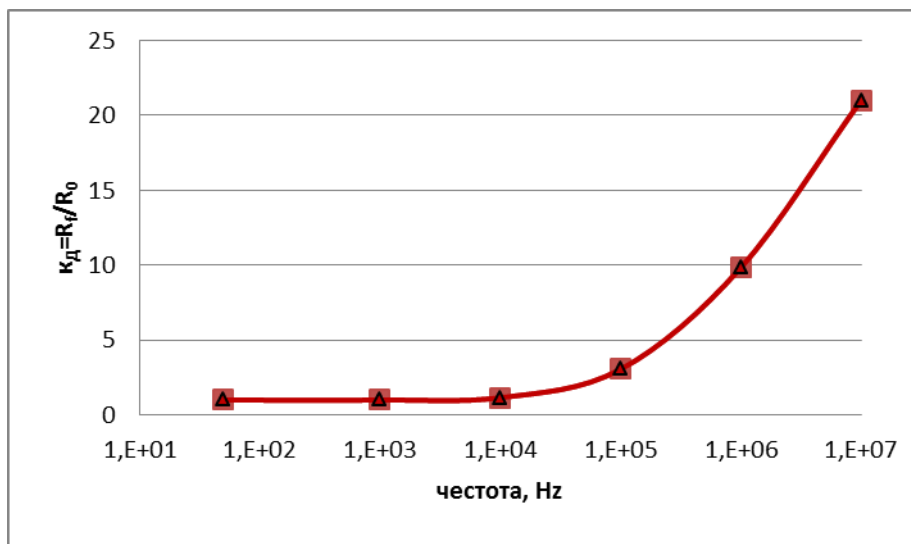
Фиг. 4. Зависимост на максималната токова плътност при изменение на честотата при кръгъл меден проводник с радиус 1mm, по който тече ток 2,5А

На следващата фиг.5 е показана зависимостта на сечението на проводника с нулева токова плътност във функция от честотата. Площта с нулева токова плътност е определена чрез отчитане на броя на пикселите, отговарящ на цветовете от разпределението на токовата плътност в кръглия проводник. За целта е използван програмния продукт Adobe Photoshop.



Фиг.5. Зависимост на сечението на кръгъл меден проводник с радиус 1mm, по който тече ток 2,5А с нулева токова плътност във функция от честотата

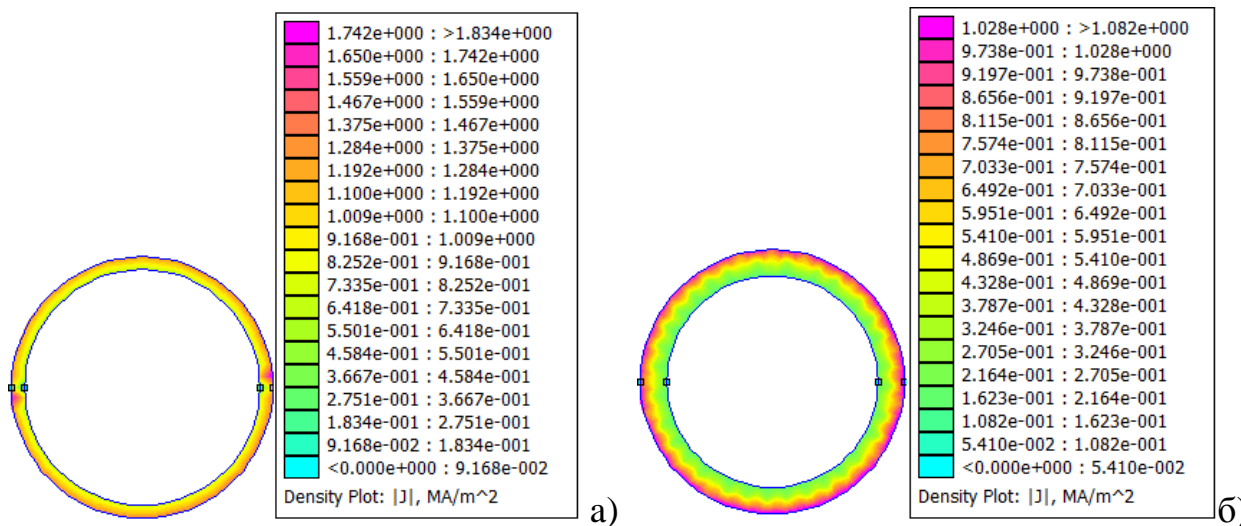
На фиг.6 е показана зависимостта на коефициентът на допълнителните загуби k_d , представляващ отношението на активното съпротивление при променлив ток към съпротивлението при постоянен ток в зависимост от честотата.



Фиг. 6. Зависимост на коефициента на допълнителните загуби k_d , в зависимост от честотата за кръгъл меден проводник с радиус 1mm, по който тече ток 2,5А.

3.3. Скин ефект в цилиндрична медна тръба с променяща се дебелина при честота 40kHz.

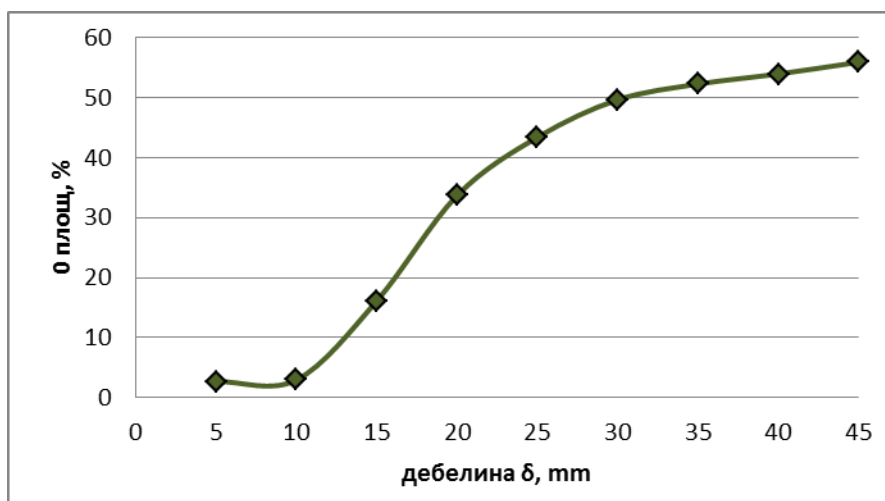
Разглежда се явлението повърхностен ефект в цилиндрична медна тръба с външен радиус 25mm и с дебелина 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 и 45mm през която тече ток от 500А при честота 40kHz. На фиг.7 е илюстриран повърхностният ефект при медната тръба с дебелина 5mm – а) и при 10mm – б).



Фиг.7. Разпределение на токовата плътност в кръгла медна тръба с външен радиус 25mm, по която тече ток 500А с дебелина 5mm – а) и при 10mm – б).

Фиг.8 показва функцията на площта на тръбата с нулева токова плътност в проценти от дебелината на тръбата. Видно е, че при дебелина на тръбата 5 и 10mm тази площ е приблизително нула и това са оптималните дебелини в разглеждания интервал. След тези стойности площта с нулева токова плътност се увеличава и сечението не се използва оптимално. Изследванията показват също,

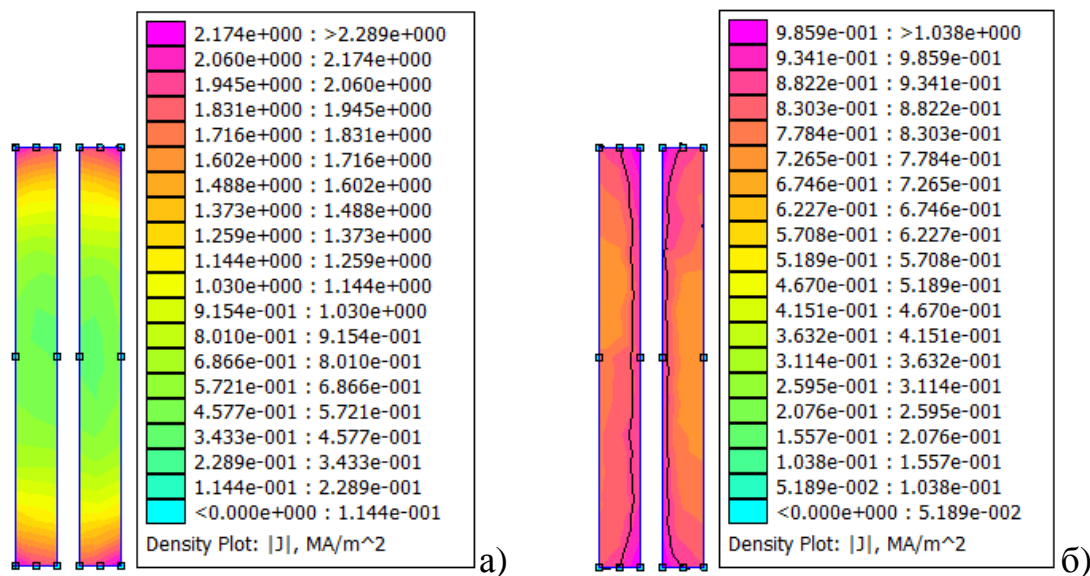
че максималната токова плътност j_{\max} варира между 1,83 и 2,4МА/м², т.е. тя не зависи от изменението на дебелината на тръбата в изследвания пример.



Фиг. 8. Зависимост на сечението на кръгла медна тръба с външен радиус 25mm, по която тече ток 500А с нулева токова плътност във функция от дебелината на тръбата

3.4. Ефект близост между успоредни медни шини с правоъгълно сечение

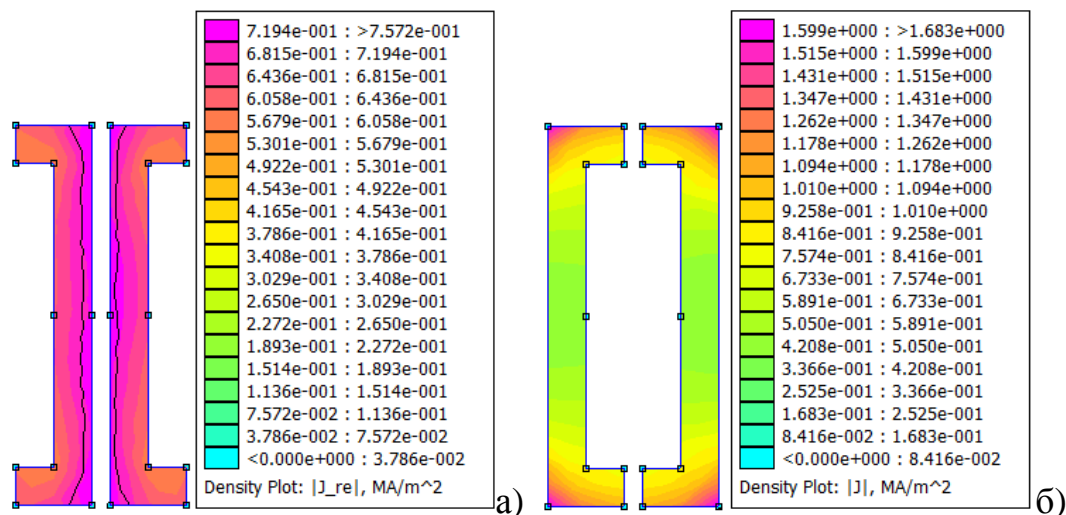
Моделиран е ефектът близост между 2 успоредни медни шини с правоъгълно сечение с размери 100 x 10mm и разстояние между тях 10mm, през които тече ток 800А с честота 50 Hz при следните 2 случая: а) – когато токовете са с еднакви посоки (прав ефект) и б) – когато токовете са с противоположни посоки (обратен ефект). Ефектът е визуализиран на фиг. 9. Видно е също така, че съвместно с този ефект се наблюдава и повърхностния ефект, особено при правия ефект близост.



Фиг. 9 Разпределение на токовата плътност при ефект близост между успоредни медни шини с правоъгълно сечение а) при прав ефект и б) – при обратен ефект, през които тече ток 800А с честота 50Hz.

3.5. Ефект близост между успоредни медни шини с П-образно сечение

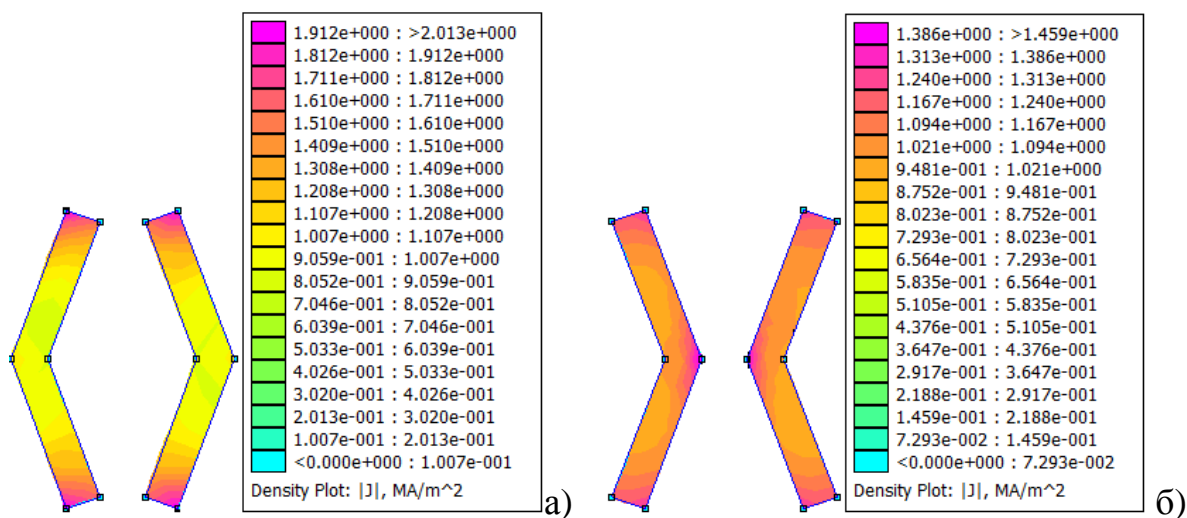
На фиг.9 е показано разпределението на токовата плътност при ефект близост между успоредни медни шини с П-образно сечение а) при обратен ефект и б) – при прав ефект, през които тече ток 800А с честота 50Hz. Използването на П-профили се прилага да се компенсира частично ефектът близост, т.е. да се избегне наличието на участъци с много малка или нулева токова плътност.



Фиг. 9. Разпределение на токовата плътност при ефект близост между успоредни медни шини с П-образно сечение а) при обратен ефект и б) – при прав ефект, през които тече ток 800А с честота 50Hz.

3.6. Ефект близост между медни шини с V-образно сечение

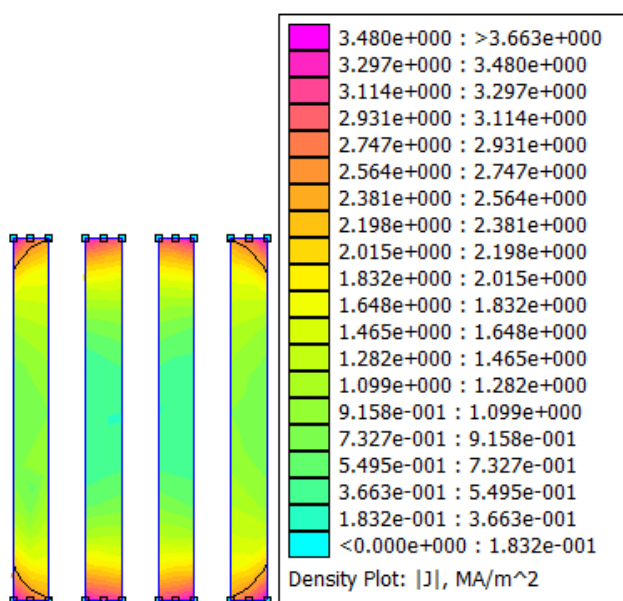
Фиг.10 илюстрира разпределението на токовата плътност при ефект близост между медни шини с V-образно сечение а) при прав ефект и б) – при обратен ефект, през които тече ток 800А с честота 50Hz. Използването на V-профили се използва също частично за компенсиране на ефекта близост.



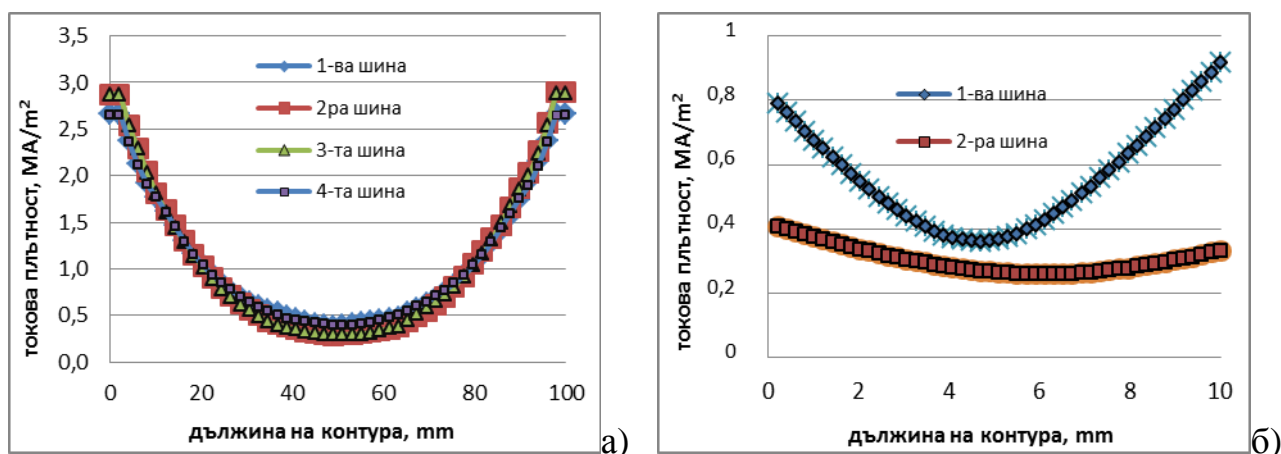
Фиг. 10. Разпределение на токовата плътност при ефект близост между медни шини с V-образно сечение а) при прав ефект и б) – при обратен ефект, през които тече ток 800А с честота 50Hz.

3.7. Ефект близост в пакет шини тип „сандвич”

Понякога за по-равномерното разпределение на токовата плътност в сечението на проводниците при прав ефект близост то се разделя на пакет от 2, 3 или 4 успоредни паралелни шини, разположени на разстояния, равни на дебелината на шината. На фиг.11 е показано разпределението на токовата плътност в пакет от 4 медни шини, всяка с размери 100 x 10mm, с разстояние между тях 10mm. През всяка от шините протича ток от 800А и токовете са с еднакви посоки. На фиг.12 а) е дадено разпределението на токовата плътност по контур, съвпадащ с вертикалната ос на шините. Също така е дадено и разпределението по контур, съвпадащ с хоризонталната ос за вътрешната и за външната шини - фиг.12 б).



Фиг. 11. Разпределение на токовата плътност в пакет от 4 шини



Фиг. 12. Разпределение на токовата плътност за външната и вътрешната шина в пакет от 4 шини – а) по вертикалната ос на шините; б) по хоризонталната ос на шините

Вижда се, че вътрешната и външната шина са еднакво натоварени по вертикалната ос, а по хоризонталната ос външната шина е по-натоварена. Също така

се наблюдава и скин ефекта, като токовата плътност е по-висока в краищата на шините.

4. Заключение

- Създадени са 2D модели за повърхностния ефект в правоъгълен проводник, в кръгъл проводник, в кръгла тръба и в проводник с правоъгълно сечение при различни диаметри на проводника и тръбата и при различни честоти – от 50Hz до 100MHz. Показана е растящата зависимост на максималната токова плътност, на коефициента на допълнителните загуби и на площта с нулева токова плътност от честотата на базата на тези модели. Изчислена е и зависимостта на нулевата токова плътност в зависимост от дебелината на тръбата;

- Моделиран е и ефектът близост при 2 успоредни медни шини с правоъгълно сечение, както и методите за намаляването му чрез използването на специални профили на шините – П-образни и V-образни както и пакет от шини тип „сандвич”. Потвърдено е неравномерното натоварване на вътрешната и външната шина при последния случай.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] William Hart Hayt, Engineering Electromagnetics, McGraw Hill, New York, 2006
- [2] Александров А., Електрически апарати Част 1 Електромагнитни и топлинни проблеми, Херон прес, София, 2002
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect
- [4] Брандиски К., Ячева И., САD системи в електромагнетизма, Сиела, София, 2002
- [5] Meeker D., User's Manual, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2

Автор: Райна Ценева, доцент д-р инж., катедра „Електрически апарати” (ЕА), Електротехнически Факултет, Технически Университет - София, E-mail address: tzeneva@tu-sofia.bg

Постъпила на 10.11.2011

Рецензент проф. д-р Е. Николов

РАБОТА ПРИ МАКСИМАЛНА МОЩНОСТ НА АСИНХРОННА МАШИНА С НАВИТ РОТОР ЗА ВЯТЪРЕН ГЕНЕРАТОР

Владимир Лазаров, Захари Зарков, Людмил Стоянов, Димитър Спиров

Резюме: Статията представя моделирането на ветроенергийна преобразувателна система с прилежащите ѝ системи за управление за извличане на максимална мощност от наличния вятър. Подбран е критерий за оценка на работата на управлението, който е приложен при симулация оценяваща работата на управлението. Показаните симулационни резултати потвърждават адекватността на избрания подход.

Ключови думи: ветрогенератор, двойно захранен асинхронен генератор

MAXIMUM POWER OPERATION OF WOUND ROTOR ASYNCHRONOUS MACHINE FOR WIND GENERATOR

Vladimir Lazarov, Zahari Zarkov, Ludmil Stoyanov, Dimitar Spirov

Abstract: This paper presents the modeling of wind energy conversion system with the contiguous control system for maximum power extraction from the available wind. A criterion for the control operation estimation is selected and is applied in the simulation to assess the control operation. The correct operation of the developed model and control systems are confirmed by the simulation results.

Keywords: wind generator, doubly fed induction generator

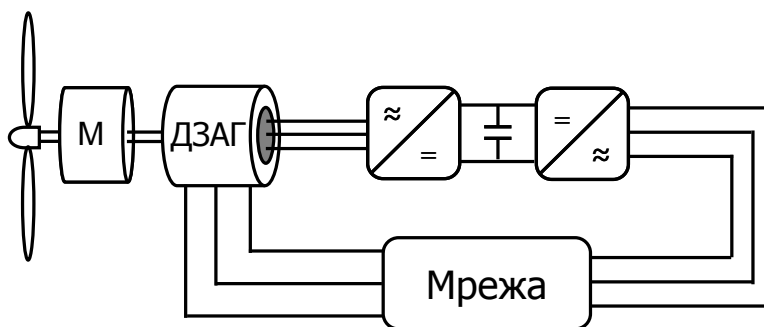
1. Въведение

Една от пречките пред разпространението на възобновяемите източници на енергия е голямата инвестиция, необходима за изграждането и поддържането на преобразуващите системи. Ето защо възвращаемостта на тази инвестиция е от съществено значение. Целта на тази статия е да представи доразвятия модел на двойно захранен асинхронен генератор с електронен преобразувател откъм ротора [1], с който да се симулира ветроенергийна преобразувателна система (ВЕПС) с променлива скорост на въртене и извличане на максимално възможната механична мощност от дадена скорост на вятъра. Определен е и критерий за оценка на правилната работа на системата.

2. Изследвана система

Разглежданата ветроенергийна преобразувателна система се състои от вятърна турбина (ВТ), задвижваща през мултипликатор (М) двойно захранен асинхронен

генератор (ДЗАГ). Тя е представена на фиг.1. В конфигурацията ДЗАГ се използва асинхронна машина с навит ротор. В нейната роторна верига има присъединена структура от два реверсивни преобразувателя на напрежение (РПН) и междинен постоянен ток кръг, позволяваща двупосочно протичане на енергийни потоци в роторната верига - от мрежата към машината и от машината към мрежата. Благодарение на този двупосочен обмен се осигурява работа на асинхронната машина като генератор в максимално широк диапазон на изменение на скоростта на въртене на ротора - от подсинхронна до надсинхронна скорост [2].



Фиг.1. Блокова схема на изследваната ВЕПС

3. Моделиране на елементите от изследваната ВЕПС

Към представения в [1] модел на двойно захранен асинхронен генератор с електронен преобразувател откъм ротора са допълнени моделите на вятърната турбина и междинния постоянен ток кръг. Моделите на тези два компонента са представени по-долу.

А. Вятърна турбина

Моделът на вятърната турбина позволява да се определи механичната мощност (P_{mec}), която се подава на вала на генератора. Мощността се определя посредством уравнение (1) [3], [4]

$$P_{mec} = \frac{1}{2} c_p A_r \rho_a V^3, \quad (1)$$

където c_p е коефициент на мощността, чиято теоретична максимална стойност е 0.593 и се нарича граница на Бец [5], $\rho_a=1.225 \text{ kg/m}^3$ е плътността на въздуха, A_r – площта на перките на вятърната турбина и V - скоростта на вятъра.

В дясната страна на (1) единствената неизвестна величина е коефициентът на мощността на турбината за дадената скорост на вятъра и за скоростта на въртене на ротора на вятърната турбина в момента на изчисление. В представяното изследване се използва аналитичен израз за определянето на този коефициент (2) [4].

$$c_p = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\Lambda} - c_3 \vartheta - c_4 \vartheta^{x_T} - c_5 \right) e^{-c_6 \frac{1}{\Lambda}}, \quad (2)$$

където c_1-c_6 и x_T са емпирични коефициенти, специфични за всяка турбина, ϑ е ъгълът на завъртане на перката по надлъжната ѝ ос. Отношението $1/\Lambda$ се определя от зависимостта (3)

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\vartheta} - \frac{0.035}{1 + \vartheta^3}, \quad (3)$$

където λ е скоростното отношение на турбината, дефинирано като отношението на периферната скорост на перките и скоростта на вятъра.

С определянето на коефициента на мощността по (2) се определя механичната мощност, а механичният момент се изчислява по (4).

$$T_m = \frac{P_{mec}}{\omega_{wtr}}, \quad (4)$$

където ω_{wtr} е скоростта на въртене на ротора на генератора.

Б. Междинен постояннотоков контур

Този контур служи за връзка между двата РПН. Реално той е кондензатор, чийто модел е показан в (5) във вид за директно имплементиране в Matlab/Simulink.

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C}(i_0 - i_{01}), \quad (5)$$

където U_c е напрежението на изводите на кондензатора, C - капацитетът на кондензатора, i_0 – токът преди възела и i_{01} – токът след него.

4. Управление на системата

Управляващата система на електронния преобразувател откъм ротора е представена в [1], ето защо тук са представени само управляващите системи на реверсивния преобразувател на напрежение откъм мрежата и тази за извличане на максимална мощност.

А. Управление на РПН откъм мрежата

Реверсивният преобразувател откъм мрежата осъществява обмена между двойно захранения асинхронен генератор и електрическата мрежа като същевременно осигурява изпълнението на заданието на напрежението на междинния постояннотоков кръг (V_0^*). Изпълнението на тези функции се извършва на два етапа [6], [7], влияейки върху подадените на генератор на Широкоинно Импулсна Модулация (ШИМ) задания за напрежения на променливотоковата страна

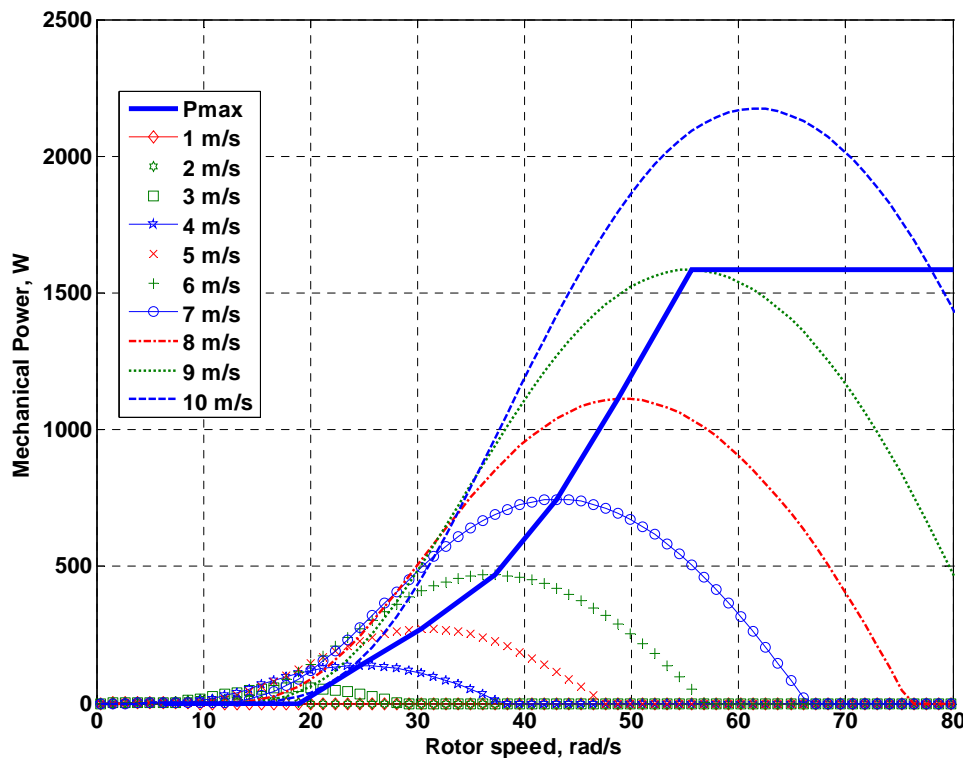
на реверсивния преобразувател на напрежение откъм мрежата (u_{dinv}^* и u_{qinv}^*). Това се осъществява като първо заданието V_0^* се преобразува в задание за променливия ток след преобразувателя по оста q (i_{qinv}^*). Заданието за тока по другата ос (i_{dinv}^*) е нула с цел нулев обмен на реактивна мощност с електрическата мрежа. От заданията i_{dinv}^* и i_{qinv}^* се изчисляват нужните задания за напреженията, използвайки (6).

$$\begin{cases} u_{dinv} = r_{filtre} \cdot i_{dinv} - \omega_s \cdot L_{filtre} \cdot i_{qinv} + u_{dres} \\ u_{qinv} = r_{filtre} \cdot i_{qinv} + \omega_s \cdot L_{filtre} \cdot i_{dinv} + u_{qres} \end{cases} \quad (6)$$

където r_{filtre} и L_{filtre} са съответно активното съпротивление и индуктивността на филтъра между РПН и мрежата, който изглажда пулсациите на тока, u_{dres} и u_{qres} са напреженията на мрежата по двете оси, u_{dinv} , u_{qinv} , i_{dinv} и i_{qinv} са съответно променливотоковите напрежения и токове на преобразувателя по двете оси, ω_s е синхронната скорост на координатната система.

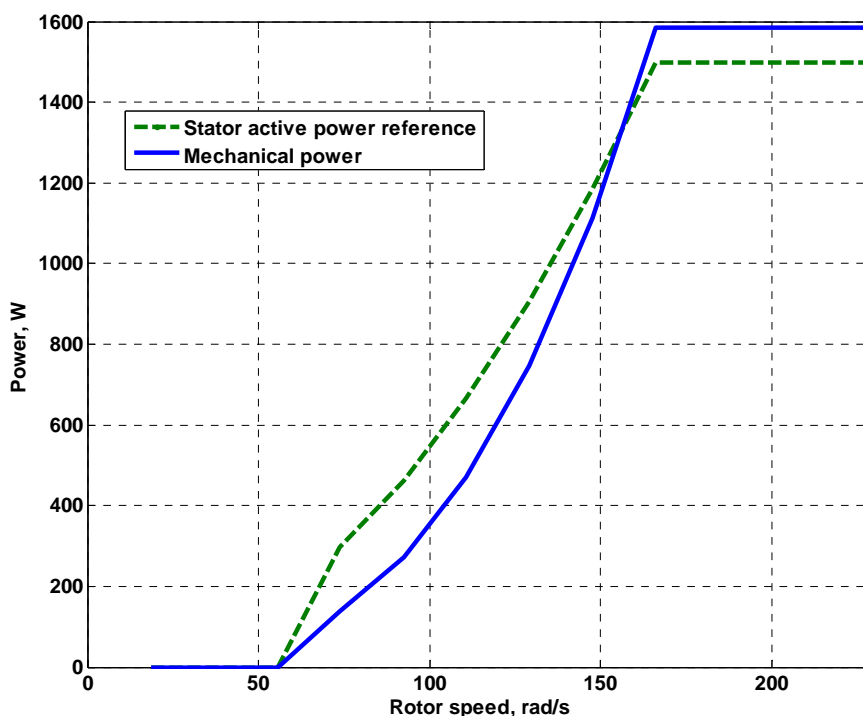
Б. Управление за извличане на максимална мощност от турбината

За дадена скорост на вятъра отдаваната от турбината мощност се изменя в зависимост от скоростта на въртене на ротора, както е показано на фиг.2. Така оптималната работа на вятърната турбина се получава, като се намери характеристиката на максималната мощност. Тя се получава като се свържат максимумите на кривите. Тази крива се ограничаваша за големите скорости на вятъра посредством аеродинамично откъсване с цел намаляване на механичните усилия върху перките и работа при номинална мощност на електрическия генератор.



Фиг.2. Характеристики на вятърната турбина

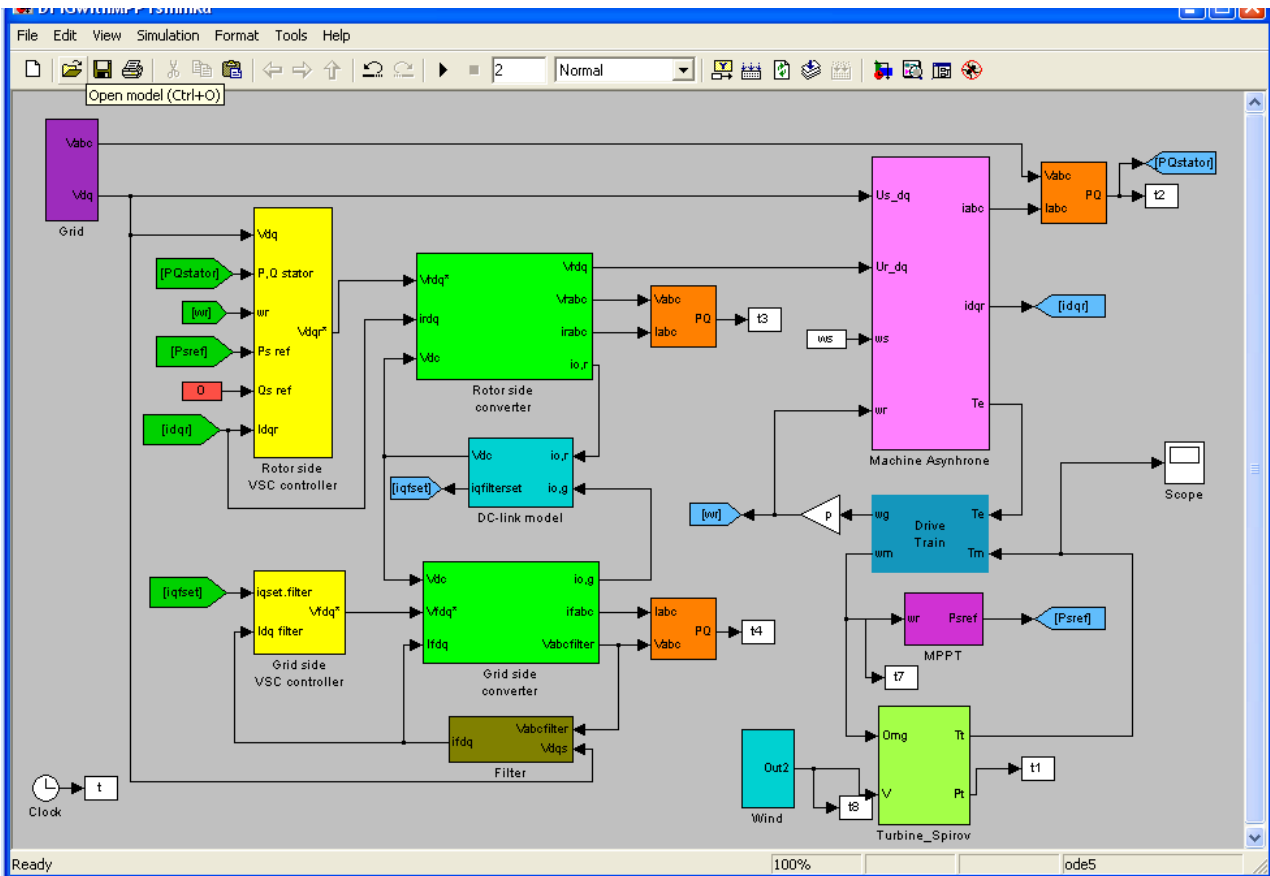
От кривата на максималната мощност трябва да се определи заданието за статорната мощност, което се изисква от управляващата система на РПН откъм ротора. За постигане на подсинхронна скорост на въртене на асинхронния генератор е необходимо статорната мощност да е по-голяма от механичната, като разликата и загубите се покриват от консумираната през ротора мощност. Така кривата за заданието на статорната мощност е над кривата на механичната мощност до синхронна скорост на въртене. Разликата между двете мощности намалява с намаляването на хлъзгането. За надсинхронна скорост на въртене статорната мощност е по-малка от механичната, като загубите се покриват или от разликата (с отдаване на мощност през ротора в мрежата), или от мрежата (с консумиране на мощност през ротора). Енергийните потоци за двете скорости на въртене са дискутирани в [1]. За зоната на ограничението на кривата на максимална мощност на вятърната турбина също се налага постоянна стойност на статорната мощност. Получената крива, по която се определя заданието за статорната активна мощност, е показана на фиг.3.



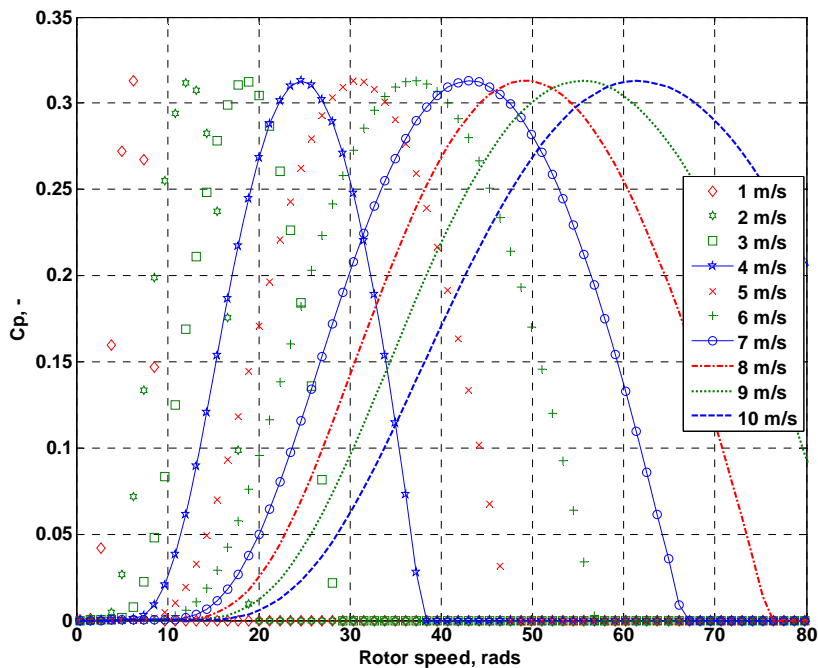
Фиг.3. Задание за статорна активна мощност при дадена механична мощност

5. Симулационни резултати

Описаните модели са внедрени в средата на Matlab/Simulink (фиг.4). Използвани са данни за асинхронна машина МАТ 20 с номинална мощност 1.5 kW и подходяща вятърна турбина. Връзката между валове на турбината и генератора се осъществява посредством мултипликатор с предавателно отношение 1/3. Целта на проведената симулация е да се провери правилната работа на управлението. Индикатор за това е поддържане на коефициента на мощността на вятърната турбина на максимална стойност, която е еднаква независимо от скоростта на вятъра, както се вижда на фиг. 5.

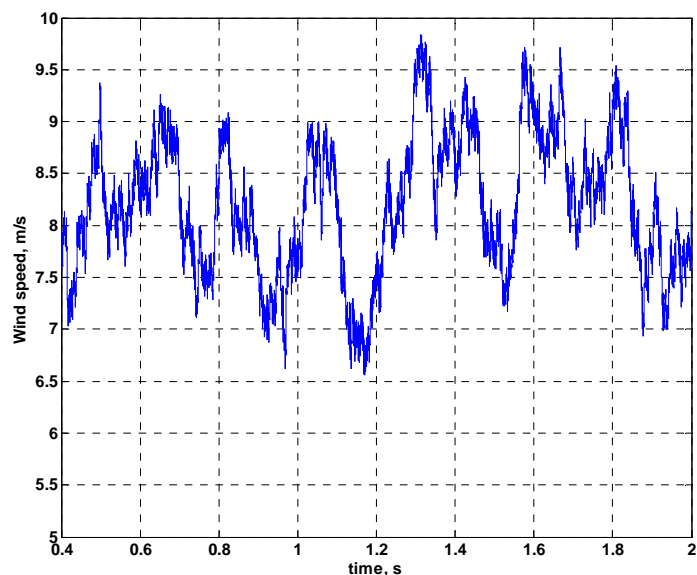


Фиг.4. Реализиран модел в средата на Matlab/Simulink



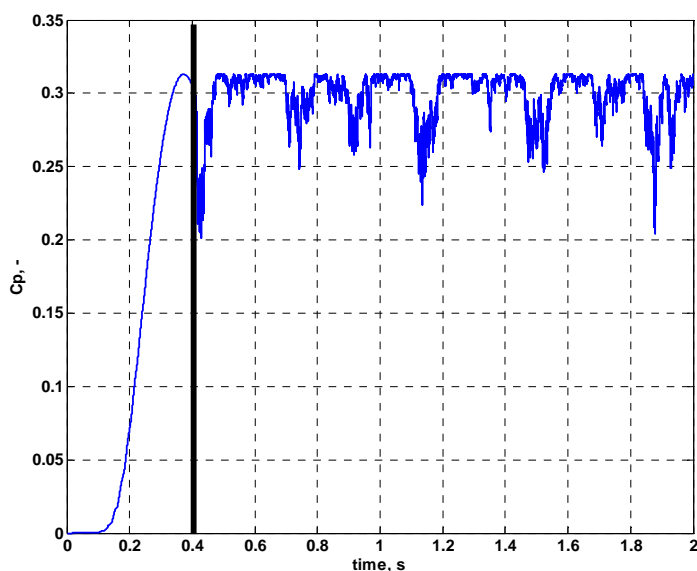
Фиг.5. Изменение на c_p при различни скорости на вятъра и на въртене

Симулацията протича на два етапа. В първия етап се предполага изменение на c_p от нула, през максимума до стойност, по-малка от максималната. Това се случва за периода между 0 и 0.4 s. След това вятърната турбина е подложена на скорост на вятъра, която се изменя стохастично и е показана на фиг.6.



Фиг.6 Изменение на скоростта на вятъра

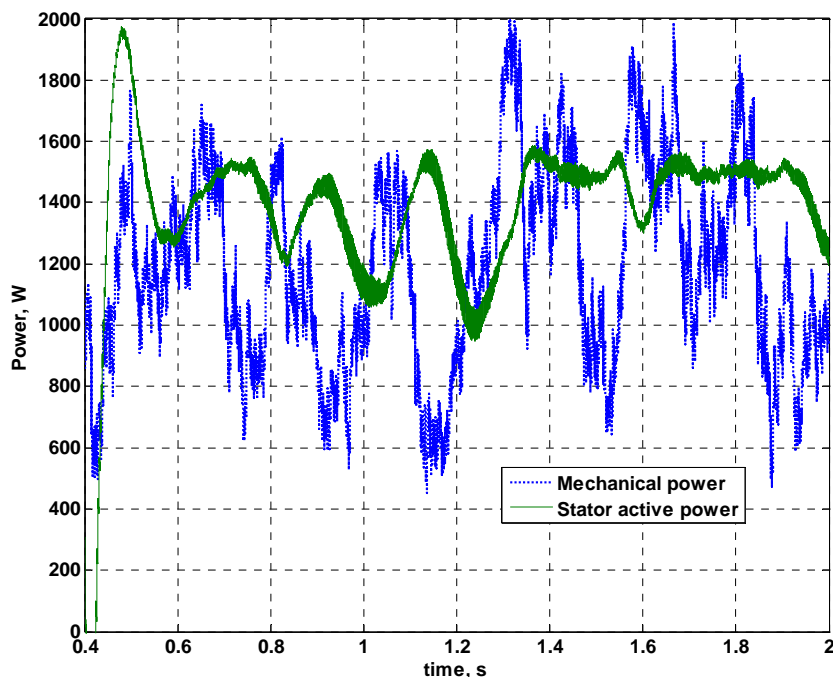
Изменението на коефициента на мощността по време на симулацията е представено на фиг.7. В голяма част от времето се наблюдава работа на турбината с максимална стойност на c_p . Моментите, в които коефициентът на мощността няма максимална стойност, се дължат на ограничението, наложено на турбината над 9 m/s, както и на инерцията на машината и управляващите системи на електронните преобразуватели. Първоначалният спад в стойността на c_p се дължи на голямата скорост на въртене на вала, която се предполага за преминаване на коефициента на мощността над максималната му стойност.



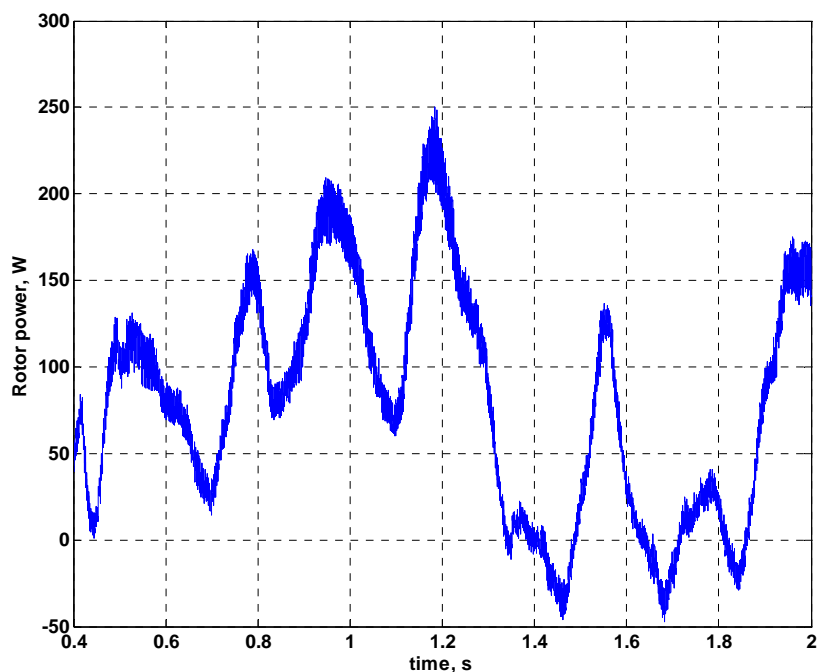
Фиг.7. Изменение на c_p при различни режими на работа на ВЕПС

Изменението на входящата механична мощност и статорната мощност е показано на фиг.8, а това на роторната мощност - на фиг.9. През по-голямата част от времето статорната мощност е по-голяма от механичната и асинхронният генератор консумира от мрежата мощност през ротора (положителна стойност на

роторната мощност), тъй като управляващата система налага подсинхронна скорост на въртене на ротора. В случаите на силен вятър управляващата система увеличава скоростта на въртене до надсинхронна, намалявайки по този начин консумираната през ротора мощност и дори отдавайки мощност през ротора в мрежата ($t=1.5s$ и $t=1.7s$). Може да се отбележат големите промени в стойностите на електрическите мощности при изменението на входящата механична мощност. Това явление е неблагоприятно за електрическата мрежа, към която ветрогенераторът е присъединен, което налага търсене на технологични решения за преодоляване на този недостатък.



Фиг.8. Изменение механичната и статорната мощности



Фиг.9. Изменение роторната мощност

6. Заключение

В статията е представен пълен модел на ветроенергийна преобразувателна система, използваща двойно захранен асинхронен генератор. Описани са управляващите системи, свързани с изследваната конфигурация. Синтезирана е крива на заданието на статорната активна мощност във функция на скоростта на въртене на ротора, позволяваща работата на ВЕПС при максимална мощност, което от своя страна би осигурило по-бърза възвращаемост на инвестираните средства. Проведената симулация показва коректната работа на създадения модел и на управляващите системи. За това се съди по изменението на избрания критерий, а именно коефициента на мощността, който трябва да бъде на максималната си стойност, за да се получи максимална механична мощност от вятъра. Системата за управление поддържа успешно c_p на максималната му стойност при разнообразни промени на входящата скорост на вятъра, което гарантира добрата ѝ работа в реални условия.

Благодарности

Тази работа е по програмата на Договор за Университетски Научноизследователски Комплекс - ДУНК-01/3 и авторите благодарят за подкрепата на Фонд „Научни изследвания”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lazarov, V., G. Notton, L. Stoyanov, Z. Zarkov, Modeling of Doubly Fed Induction Generator with Rotor-side Converter for Wind Energy Conversion Application, Proceedings of the Technical University – Sofia, vol. 60, book 1, pp. 289-298, 2010.
- [2] Cuniere, A., Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation. Application aux éoliennes, La Revue 3EI, vol. 38, pp. 36-44, 2004.
- [3] Lazarov, V., D. Roye, D. Spirov, Z. Zarkov, New Control Strategy for Variable Speed Wind Turbine with DC-DC converters, Proceedings. of International Conference EPE-PEMC 2010, pp. T12-120–T12-124, Macedonia.
- [4] Lubosny, Z., Wind Turbine Operation in Electric Power Systems, Springer, 2003
- [5] Grassmann, H., F. Bet, M. Ceschia, M.L. Ganis, On the physics of partially static turbines, Renewable Energy, vol. 29, issue 4, pp. 491-499, 2004.
- [6] El-Sattar, A.A., N.H.Saad, M.Z.S. El-Dein, Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault. Electric Power Systems Research, vol. 78, n. 7, pp. 1240-1246, 2008.
- [7] Ninov, Y., sous la direction de prof. A. Mpanda, Modélisation et Contrôle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour l'application dans l'énergie éolienne, Projet de fin d'études dans UT – Sofia et ESIEE – Amiens, 2009

Автори: Владимир Лазаров, доц. д-р инж., катедра “Електрически машини” към Електротехнически факултет, ТУ-София, E-mail address: vl_lazarov@tu-sofia.bg; Захари Зарков, доц. д-р инж., катедра “Електрически машини” към Електротехнически факултет, ТУ-София, E-mail address: zzza@tu-sofia.bg; ас. маг. инж. Людмил Стоянов, асистент, катедра “Електрически машини” към Електротехнически факултет, ТУ-София, E-mail address: ludiss@tu-sofia.bg; маг. инж. Димитър Спиров, докторант в катедра “Електрически машини” към Електротехнически факултет, ТУ-София, E-mail address: dspirov@tu-sofia.bg

Постъпила на 28.07.2011

Рецензент проф. д-р Е. Николов

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СУПЕРКОНДЕНЗАТОРИ И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ ИМ

**Владимир Лазаров, Захари Зарков,
Людмил Стоянов, Християн Кънчев**

Резюме: В доклада е представено експериментално изследване на суперкондензатор с цел извеждане на еквивалентна заместваща схема и определяне на параметрите ѝ. Разгледани са тестовите процедури, които се използват за определяне на параметрите на суперкондензаторите. Разработена е опитна постановка за изследване на суперкондензатори. Представени са резултатите от експериментите. На базата на измерените и регистрирани величини са изчислени капацитетът на кондензатора, последователното и паралелното съпротивление на заместващата схема.

Ключови думи: Суперкондензатор, параметри, експериментално, определяне

EXPERIMENTAL TESTING OF SUPRECAPACITORS AND EVALUATION OF THEIR PARAMETERS

**Vladimir Lazarov, Zahari Zarkov,
Ludmil Stoyanov, Hristiyan Kanchev**

Abstract: This paper presents an experimental research on a supercapacitor with the aims to deduce its equivalent circuit and determine its parameters. The test procedures used for determination of the equivalent circuit parameters are studied. The experimental test bench created for this purpose and the experimental results are presented. Based on the measurements, the capacitance and the equivalent circuit series and parallel resistance are calculated.

Keywords: Supercapacitor, parameters, experimental, evaluation, testing

1. Въведение

Електрохимическите двуслойни кондензатори (Electrochemical Double Layer Capacitors - EDLC) се наричат суперкондензатори. Техният принцип на действие е подобен на добре познатите ни електростатични кондензатори, но въпреки това съществуват известни разлики между двата, което позволява на електрохимическите кондензатори да постигнат много по-голям капацитет. Електродите на суперкондензатора са от порьозно вещество, във вътрешността има разтвор на електролит и йонно непроницаема мембрана. Когато се приложи напрежение между електродите, върху положителния електрод се натрупват отрицателно заредени йони, а върху отрицателния електрод - положително заредени

йони, формирайки два слоя. От този процес произлиза названието "Електрохимически двуслойни кондензатори" [1], [2]. Капацитетът на такъв двуслоен кондензатор е от порядъка на $10\text{-}50 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, но поради голямата повърхност на електродите $1000\text{-}2000 \text{ m}^2/\text{g}$ капацитетът на някои прототипи суперкондензатори достига до 10 хиляди фарада. Въпреки това, поради високата им производствена цена, типичният капацитет на предлаганите на пазара продукти е от няколко десетки до 3 хиляди фарада [3], [4].

Основните предимства на суперкондензаторите в сравнение с конвенционалните кондензатори и акумулаторните батерии са: висока специфична мощност и дълъг експлоатационен живот ($\sim 10^6$ цикъла) [5].

По специфична енергия и специфична мощност суперкондензаторите се намират между акумулаторните батерии и кондензаторите. Друго предимство на суперкондензаторите спрямо акумулаторните батерии е високата ефективност на цикъла заряд-разряд: около 98% спрямо акумулаторните батерии: около 80% [6], [7].

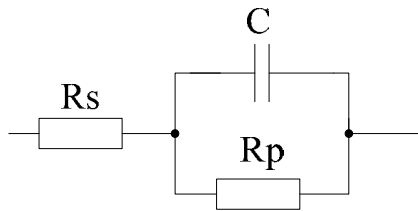
Познаването на параметрите на всеки конкретен кондензатор е важно от гледна точка на създаването на симулационни модели, проектирането на системите за управление и познаването на състоянието на кондензатора във времето.

Целта на представената работа е да се направи експериментално изследване и определяне на параметрите на заместваща схема на суперкондензатор. За целта е необходимо да бъде разработена и създадена и опитна постановка за тестването на суперкондензатора.

2. Еквивалентна заместваща схема на суперкондензатор с отчитане на саморазряда

Представената на фиг.1 заместваща схема е най-широко използваната заместваща схема на електрохимически кондензатор. Тя се състои от капацитет със свързани към него последователно и паралелно съпротивление. Тя описва поведението на суперкондензатор с определено приближение [8]. Чрез последователното съпротивление се моделират съпротивленията на контактите, електродите и електролита. То отразява загубите в активните съпротивления и загубите, свързани с електрохимическите процеси протичащи в кондензатора. Тези загуби се предизвикват от тока на заряд/разряд и водят до вътрешно загряване на кондензатора.

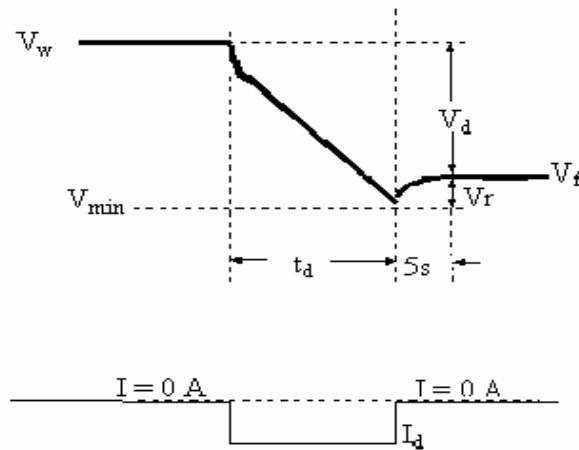
Чрез паралелното съпротивление се моделират загубите от саморазряд. Еквивалентното паралелно съпротивление има голяма стойност (от порядъка на няколко $\text{k}\Omega$) и поради това може да се счита, че е безкрайно в случай, когато циклите на заряд/разряд на кондензатора са в интервали, по-малки от секунда. За подобни приложения еквивалентната схема може да бъде опростена, като се премахне еквивалентното паралелно съпротивление [9].



Фиг.1. Заместваща схема на суперкондензатор с отчитане на утечката

3. Определяне параметрите на еквивалентната заместваща схема

Капацитетът на кондензатора е най-важният параметър. Той може да бъде определен при разряд с константен ток. Зареденият кондензатор се разрежда с константен ток до $\frac{1}{2}$ от номиналното напрежение. Формите на тока и напрежението имат вида, показан на фиг.2.



Фиг.2. Форми на напрежението и тока при разряд на суперкондензатор

Капацитетът се изчислява по следната формула:

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{V_w - V_f} \quad (1)$$

където V_w е напрежението преди началото на разреждането, V_f – напрежението на кондензатора 5s след прекратяване на разряда (нулиране на тока), I_d – токът на разряда.

Разбира се този опит може да бъде проведен и при заряд, както и при други стойности на напрежението на кондензатора.

Първият метод за определяне на еквивалентното последователно съпротивление при постоянен ток е чрез разряд с константен ток по начина, описан по-горе и показан на фиг.2.

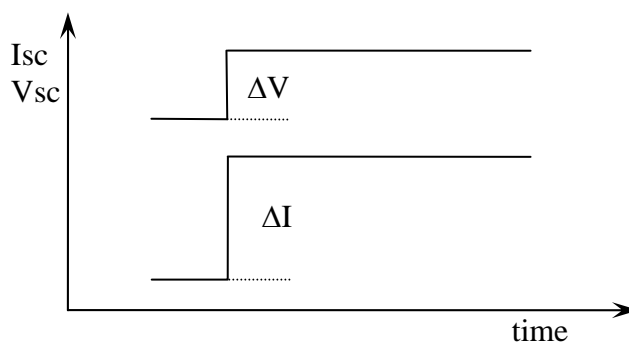
В този случай R_s се определя от формулата

$$R_s = (V_f - V_{min})/I_d \quad (2)$$

където V_{min} е минималното напрежение, измерено при разряда, V_f – напрежението на кондензатора 5s след прекратяване на разряда, I_d – токът на разряда. Основавайки се на заместващата схема от фиг.1, последователното съпротивление R_s може да се намери при рязка промяна на тока през кондензатора (фиг.3) [10]. От уравнението на веригата може да се изведе изразът за R_s при безкрайно бърза промяна на тока през кондензатора

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (3)$$

където ΔV е промяната на напрежението, а ΔI – промяната на тока.



Фиг.3. Форми на напрежението и тока при промяна на тока през кондензатора

Съществува и трети начин за определяне на R_s : динамичен заряд/разряд. При него суперкондензаторът се зарежда/разрежда с константен ток за определено време и след това веригата се прекъсва и токът става нула. Този цикъл се повтаря с определена честота, като R_s се намира от израза (3) при заряд и при разряд. След това се взема средната стойност от всички измервания. По този начин може да се определи последователното съпротивление при протичане на ток с определена честота. Нормалното поведение на супрекондензаторите показва намаляване на стойността на R_s при увеличаване на честотата над 10Hz, но това е свързано и с намаляване на капацитета на кондензатора.

За определяне на еквивалентното паралелно съпротивление с достатъчно голяма точност може да се използва методът, описан в [8]. Методът се състои в зареждането на кондензатора до определено напрежение (може това да бъде и номиналното напрежение) и след най-малко 60 минути напрежението на кондензатора се измерва отново. Поради саморазряда измереното напрежение е по-малко от първоначалното. Тъй като саморазрядът протича по експоненциален закон, паралелното съпротивление се пресмята по формулата

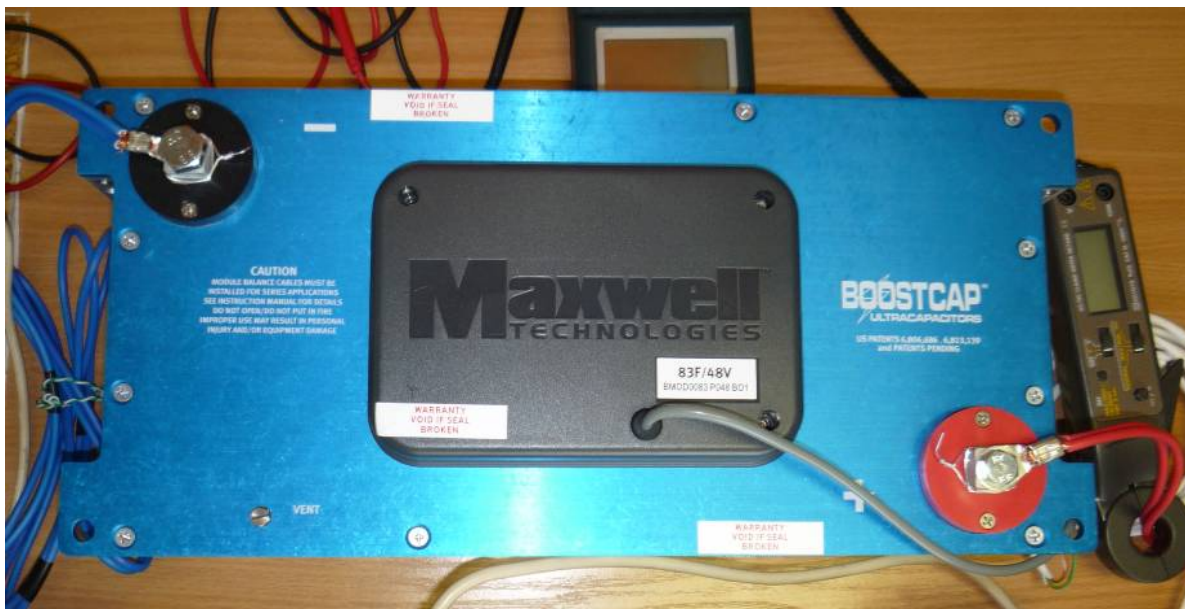
$$R_{pr} = \frac{t}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \cdot C} \quad (4)$$

където t е времето между двете измервания на напрежението, V_1 - първоначалната стойност на напрежението, V_2 - измерената стойност след време t , а C - капацитетът на кондензатора.

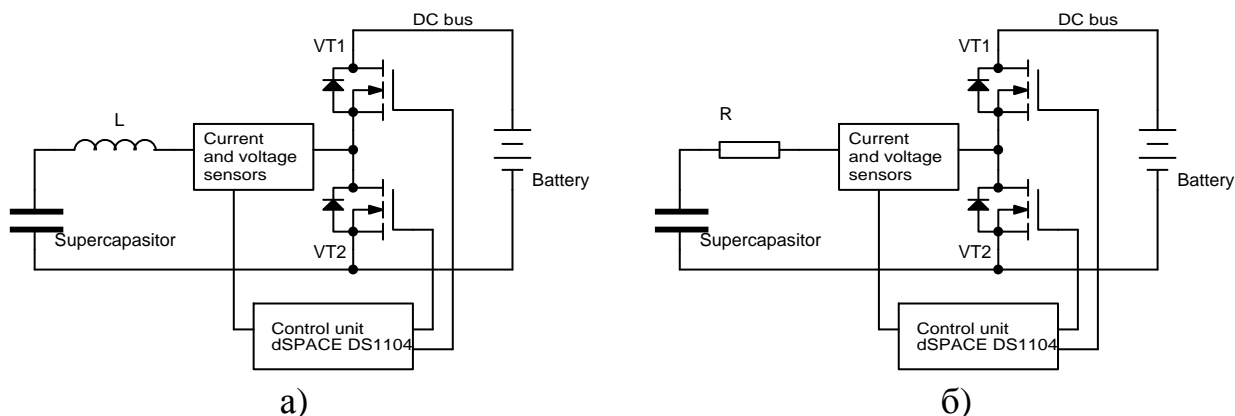
4. Експериментални резултати

За определяне на параметрите на кондензатора е създадена опитна постановка, която се състои от 4 последователно свързани акумулаторни батерии, суперкондензаторен модул Maxwell Boostcap BMOD0083P048 с капацитет 83F и номинално напрежение 48V (фиг.4), импулсен транзисторен преобразувател, сензори и система за управление. Принципната схема на опитната постановка е представена на фиг.5.

Схемата позволява заряд и разряд на кондензатора с константен ток, както и осъществяване на цикли с различна честота.



Фиг.4. Външен вид на изследвания суперкондензатор



Фиг.5. Схеми за определяне на характеристиките на суперкондензатор:
а) за зареждане/разреждане с константен ток; б) за динамичен заряд/разряд.

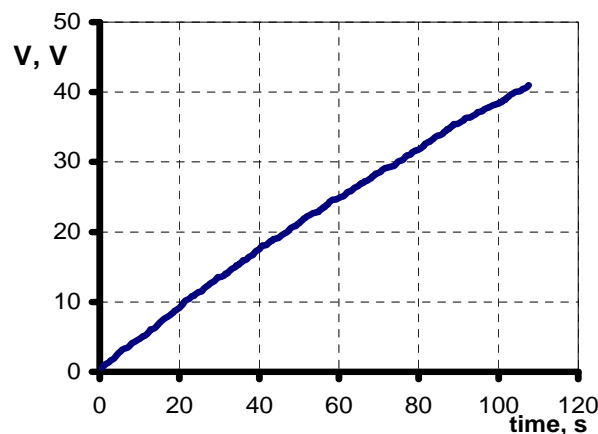
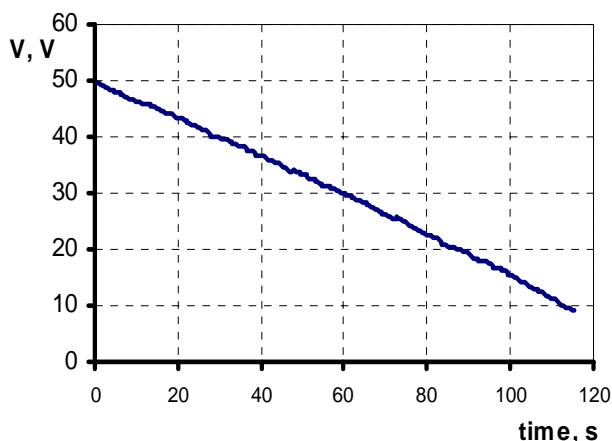
4.1. Определяне на капацитета

Беше проведен опит за разреждане и зареждане с константен ток. При опита суперкондензаторът беше зареден до номиналното напрежение 49,8V и след това разреждан с ток 30A. Формата на напрежението е показана на фиг.6.a - разряд и фиг.6.б - заряд. Капацитетът на кондензатора, изчислен по формула (1), е представен в табл.1. Средната стойност на капацитета е 89,25 F, което се доближава до даденото от производителя 89,9 F.

Допълнително е изчислен капацитетът в долния край на кривата на напрежението (под 25V) и стойността му е 75F. Това потвърждава факта, че капацитетът на суперкондензаторите не е постоянен и зависи от напрежението, като с понижаването на напрежението капацитетът намалява. На това се дължи и нелинейността на кривата на заряд/разряд, както се вижда от фиг.6.

Табл.1

Заряд				Разряд			
V_1, V	V_2, V	$\Delta t, s$	C, F	V_1, V	V_2, V	$\Delta t, s$	C, F
25	41	47,2	88,5	48,8	25	74,4	90,0
0,6	25	60,4	74,3	25	9	40,8	76,5



Фиг.6. Експериментална форма на напрежението на суперкондензатора при разряд (ляво) и заряд (дясно) с константен ток $I=30A$

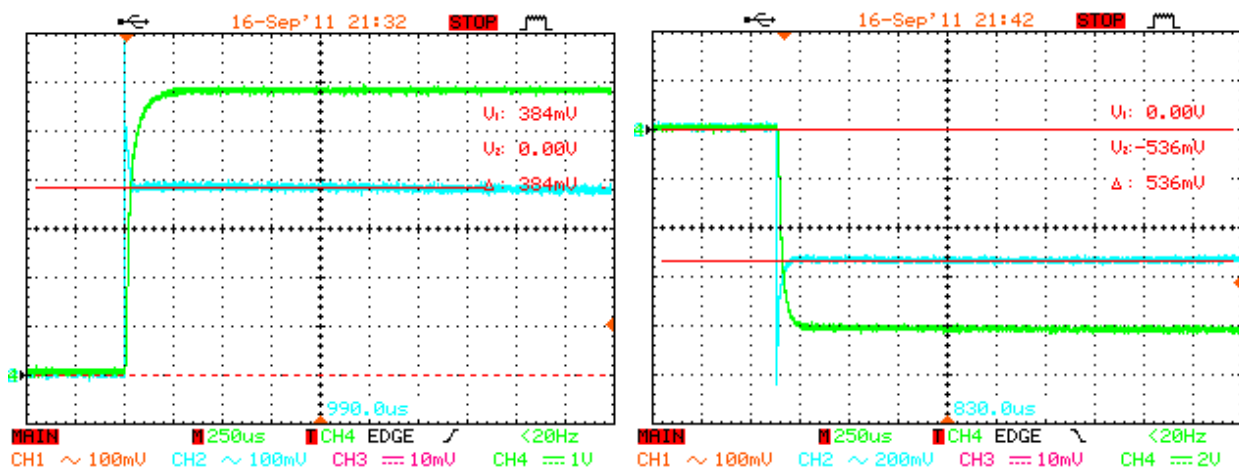
4.2. Определяне на еквивалентното последователно съпротивление

Беше проведен и опит за определяне на последователното съпротивление при разреждане с постоянен ток 30A по процедурата, описана по-горе и илюстрирана с фиг.2. Експериментът беше повторен два пъти. В табл.2 са представени резултатите от измерванията и изчислената по формула (3) стойност на R_s . Получената стойност 10,22 mΩ е по-голяма от дадената от производителя 7,03 mΩ, но разликата може да се дължи и на неточност при измерването.

Табл. 2

V_f, V	V_{min}, V	$\Delta V, V$	$R_{sdc}, m\Omega$
25,827	25,497	0,33	11,00
25,127	24,844	0,283	9,43
Средна стойност			10,22

Бяха проведени и експерименти за определяне на R_s при рязка промяна на тока през кондензатора съгласно фиг.3. За експеримента е използвана схемата от фиг.5.б. Токът и напрежението на кондензатора се регистрират с осцилоскоп. На фиг.7 са показани осцилограми на тока и напрежението при внезапна промяна на тока. В табл.3 са представени резултатите от измерванията и изчислената по формула (3) стойността на R_s при заряд и при разряд на кондензатора.



а) напр. - CH2 0,1V/div; ток - CH4 10A/div

б) напр. - CH2 0,2V/div; ток - CH4 20A/div

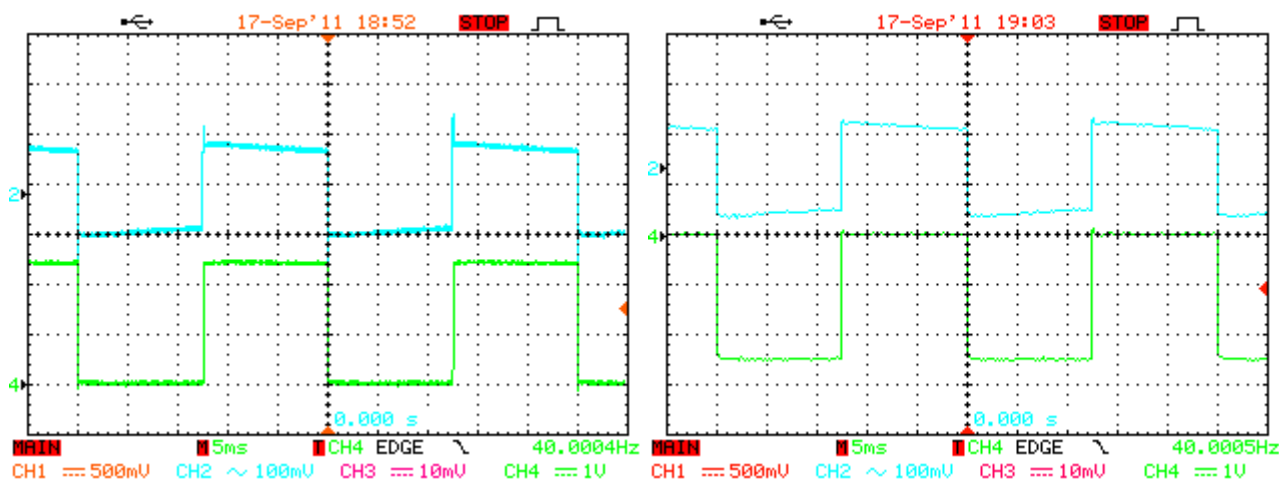
Фиг.7. Осцилограми на напрежението и тока при внезапна промяна на тока: заряд (а) и разряд (б).

Табл.3

Заряд			Разряд		
ΔV , mV	ΔI , A	R_s , m Ω	ΔV , mV	ΔI , A	R_s , m Ω
304	48,4	6,3	336	46,8	7,2
320	48	6,7	312	45,6	6,8
600	86,4	6,9	200	30	6,7
Средна стойност:		6,77			

Бяха проведени и опити за определяне на R_s с динамичен заряд и разряд на суперкондензатора, като беше използвана схемата от фиг.6б. Кондензаторът предварително е зареден до определено напрежение и след това само единият транзистор се включва и изключва, като другият е само изключен. При това токът през кондензатора има само една полярност, а през паузите е нула.

Проведени са опити с различни стойности на тока и при различни честоти. На фиг.8.а и фиг.8.б са показани формите на тока и напрежението при динамичен заряд и разряд с честота 40Hz.



а) напр. - CH2 0,1V/div; ток - CH4 10A/div б) напр. - CH2 0,1V/div; ток - CH4 10A/div

Фиг.8. Осцилограми на напрежението и тока при динамичен заряд (а) и разряд (б) на суперкондензатор с 40Hz.

Измерените стойности на напрежението и тока, както и изчислената по формула (3) стойност на R_s са представени в табл. 4. Получената стойност почти същата както при внезапната промяна на тока, но е по-ниска от стойността за постоянен ток. Това потвърждава факта, че при честоти над 10Hz еквивалентното последователно съпротивление намалява.

Табл.4

Заряд			Разряд		
ΔV , mV	ΔI , A	R_s , m Ω	ΔV , mV	ΔI , A	R_s , m Ω
228	34	6,7	536	81,6	6,57
383	58,4	6,56	320	47,6	6,72
240	36	6,66	192	28,4	6,76
Средна стойност:		6,66			

4.3. Определяне на еквивалентното паралелно съпротивление

При опита суперкондензаторът беше зареден до номиналното напрежение 49,3V. След 18 часа напрежението между клемите на кондензатора беше измерено: 42V. Капацитетът на кондензатора е $C=89,25F$. По формула (2) е изчислено $R_p= 4,53 k\Omega$. При второто измерване се получи $R_p= 4,72 k\Omega$. Средната стойност е 4,63 k Ω .

3. Заключение

Работата представя резултатите от експериментално изследване на суперкондензатор. Основната цел е на базата на измерванията да се определят параметрите на заместващата схема на кондензатора. Разгледани са основните тестови процедури, които се използват за определяне на параметрите суперкондензаторите. Разработена е опитна постановка за изследване на суперкондензатори.

Представени са резултати от експериментите. На базата на измерените и регистрирани величини са изчислени капацитетът на кондензатора, еквивалентното последователно и еквивалентното паралелно съпротивление на заместващата схема.

Потвърдено е наличието на зависимост на капацитета на суперкондензаторите от напрежението, както и фактът, че еквивалентното серийно съпротивление за постоянен ток е по-малко от това за променлив ток.

Не се наблюдава зависимост на серийното съпротивление от тока или напрежението на кондензатора.

Резултатите от работата са полезни с това, че е създадена опитна постановка за тестване на суперкондензатори и са потвърдени тестовите процедури. Параметрите на суперкондензатора ще се използват за създаването на симулационни модели, проектирането на системите за управление и предвиждане на състоянието на кондензатора във времето.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Schneuwly A., R. Gallay, Properties and applications of supercapacitors from state of the art to future trends, Proceedings PCIM 2000, 2000.
- [2] Burke A., Ultracapacitor: why, how, and where is the technology, Journal of Power Sources, vol.91, 2000, pp. 37–50.
- [3] Namisnyk A., A survey of electrochemical supercapacitor technology, Project for the degree of bachelor of engineering, University of Technology, Sydney, Faculty of engineering, 2003.
- [4] Yao Y., D. Xu, A study of supercapacitor parameters and characteristics, International conference on power system technology, 2006.
- [5] Belyakov A., D. Sojref, High power supercapacitor's solutions for reliable power supply, Powereng 2009, Lisbon, Portugal, 2009.
- [6] Zhong Y., J. Zhang, G. Li, A. Lui, Research on energy efficiency of supercapacitor energy storage system, International conference on power system technology, 2006.
- [7] Cultura A., Z. Salameh, Performance evaluation of a supercapacitor module for energy storage applications, IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
- [8] Spyker R.L., R.M.Nelms, Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 36, 2000, pp. 829-836.
- [9] Qi X., Z. Qi, H. Li, Asymmetric hybrid supercapacitor (AHS)'s modeling based on physical reasoning, Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2008), 6-9 april 2008, pp. 2682 – 2685.
- [10] Grama A., D.Petreus, P.Borza, L.Grama, Experimental determination of Equivalent Series Resistance of a supercapacitor, International Spring Seminar on Electronics ISSE 2009, Brno, Czech Republic, 13-17 May 2009.

Благодарности

Авторите изказват благодарност на Техническия университет – София за финансовата подкрепа по договор 102ни225-1.

Автори: Владимир Лазаров, доц. д-р, катедра “Електрически машини”, Електротехнически факултет на ТУ-София, E-mail address: vl_lazarov@tu-sofia.bg; Захари Зарков, доц. д-р, катедра "Електрически машини", Електротехнически факултет на ТУ-София, E-mail address: zzza@tu-sofia.bg ; Людмил Стоянов, маг. инж. асистент, катедра "Електрически машини", Електротехнически факултет на ТУ-София, E-mail address: ludiss@tu-sofia.bg; Християн Кънчев, маг. инж., докторант, катедра "Електрически машини" и ФФОЕ, ТУ-София и Лаборатория по електротехника и силова електроника - L2EP, Ecole Centrale de Lille (Франция), E-mail address: hkanchev@tu-sofia.bg, hkanchev@ec-lille.fr

Постъпила на 10.11.2011

Рецензент проф. д-тн Е. Николов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА КОМПЕНСИРАНЕ НА ФЛУКТУАЦИИТЕ НА МОЩНОСТТА НА ВЕТРОГЕНЕРАТОР СЪС СУПЕРКОНДЕНЗАТОРИ

Владимир Лазаров, Захари Зарков,
Людмил Стоянов, Християн Кънчев

Резюме: В доклада са разгледани възможностите за компенсиране чрез суперкондензатор на флукутациите в мощността от ВЕИ. Описани са възможните структури на хибридна система от вятърен генератор и енергозапасяващи средства. Създаден е модел на суперкондензатор с DC-DC преобразувател в среда Matlab/Simulink. Създадена е също и опитна постанова с цел потвърждаване на симулационните резултати. Експерименталните изследвания показват, че чрез използване на суперкондензатор може да се постигне кратковременно компенсиране на изменения до 100% от номиналната мощност на вятърната турбина и по този начин хибридната система отдава константна мощност на товарите.

Ключови думи: Флукутации, мощност, ветрогенератор, компенсиране

STUDY ON POSSIBILITIES OF COMPENSATING WIND GENERATOR POWER FLUCTUATIONS WITH SUPERCAPACITORS

Vladimir Lazarov, Zahari Zarkov,
Ludmil Stoyanov, Hristiyan Kanchev

Abstract: The current paper presents a study on possibilities of compensating the fluctuations of the power delivered from renewable energy-based generators (REBG) by the use of supercapacitors. The possible structures of a hybrid system with REBG and energy storage devices are presented. A Matlab/Simulink model of supercapacitor with a DC-DC converter is created. An experimental test bench is also created in order to prove the simulation results. Results demonstrate that in the studied system by using a supercapacitor it is possible to compensate the REBG power fluctuations at 100% of its rated power. By using this approach, the hybrid system is able to deliver a constant power for supplying the loads.

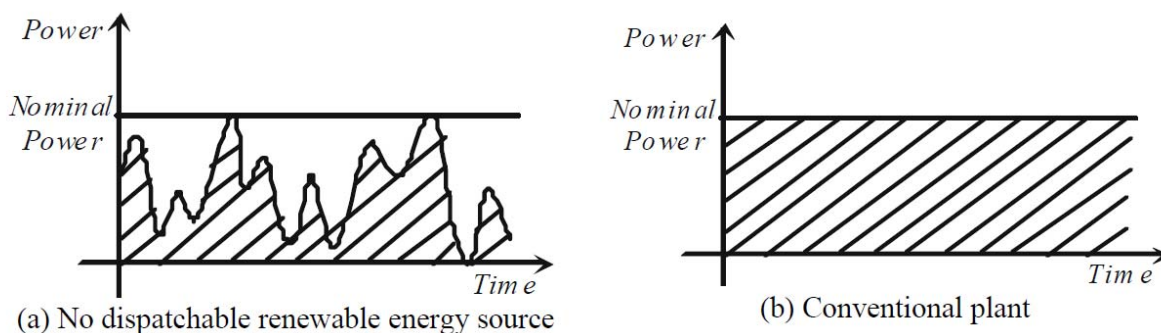
Keywords: Fluctuations, power, wind turbine, compensation, supercapacitor

1. Въведение

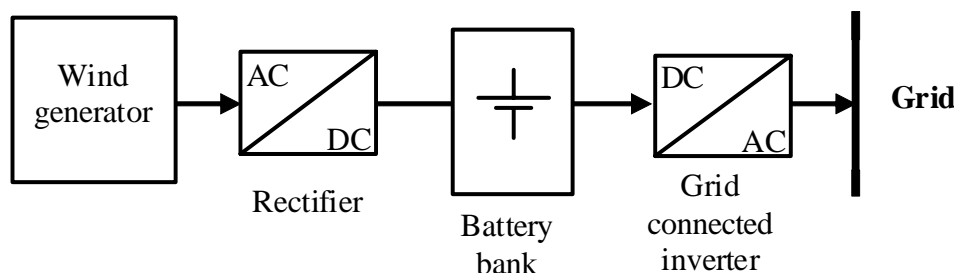
Вследствие на бурното развитие на възобновяемите източници на енергия (ВИЕ) в последните години съществува тенденция за по-широкото използване на т.нар „децентрализирано производство на електроенергия”. При него елект-

роенергията се произвежда както в големите електроцентрали, така и в локални малки инсталации, намиращи се близо до консуматорите. Въпреки това, поради стохастичния характер на първичния източник повечето генератори, базирани на ВИЕ, нямат възможност да отдават константна във времето мощност, така както конвенционалните генератори, което създава пречки пред употребата им като автономен източник на електроенергия (фиг.1).

Един от начините да се преодолее тази трудност е създаването на хибридни генератори или т.нар. „активни генератори”. При тях към генератора на електричество от ВИЕ са свързани енергозапасяващи средства, които осигуряват енергиен буфер при промени в мощността на първичния източник [1], [2]. Блокова схема на т.нар. „каскаден тип” хибриден генератор е представена на фиг.2. След фотоволтаичната инсталация чрез електронен преобразувател е свързана акумулаторна батерия, а връзката с мрежата се осъществява посредством DC/AC преобразувател (инвертор).



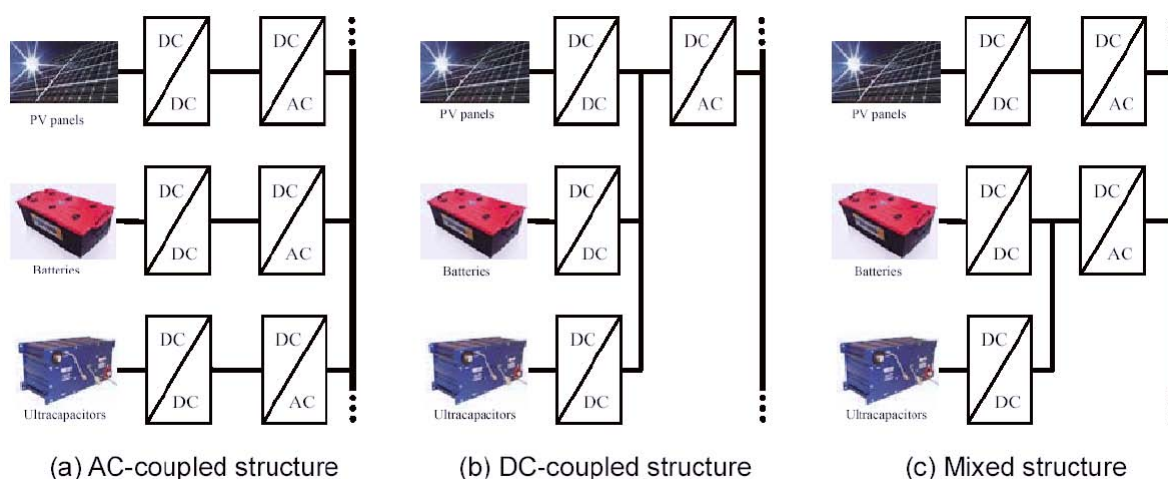
Фиг.1. Изменение на мощността на генератор с ВИЕ (а) и на конвенционален генератор (б)



Фиг.2. Каскаден тип активен генератор

Един от основните недостатъци на схемата от фиг.2 е, че при промяна на енергията, генерирана от първичния източник, батерията се зарежда или разрежда с много голям ток, което води до съкращаване на нейния експлоатационен живот. Това налага да се търсят други конфигурации на системата. На фиг.3 са представени 3 различни варианта за архитектура на хибридна система [2], [3].

Във всичките е включен суперкондензатор, който има възможност да покрие бързите флуктуации на мощността, като осигурява на акумулатора възможност да работи с токове с по-малка амплитуда и честота.



Фиг.3. Архитектури на хибридна система

Най-удобна за реализация и управление е структурата б). Поради това за целите на представеното изследване авторите са избрали тази архитектура на хибридна система.

Целта на представената работа е да се изследват възможностите за компенсиране на колебанията на мощността на вятърни генератори с помощта на суперкондензатор. За целта е необходимо да бъдат разработени компютърни симулационни модели и опитна постановка за експериментална проверка на разработените модели.

2. Компенсиране на флукуациите на мощността в хибридна система

На фиг.4 е показана по-подробно структурата на изследвания хибриден електрически генератор с ветрогенератор. Той се състои от ветрогенератор, акумулатор и суперкондензатор, които са свързани на обща постояннотокова линия посредством електронни преобразуватели. Връзката към електрическата мрежа се осъществява с инвертор. Цялата система се управлява от контролер, който следи заданието за мощността, която трябва да се отдава в мрежата и разпределя потоците на мощностите между отделните елементи [4], [5].

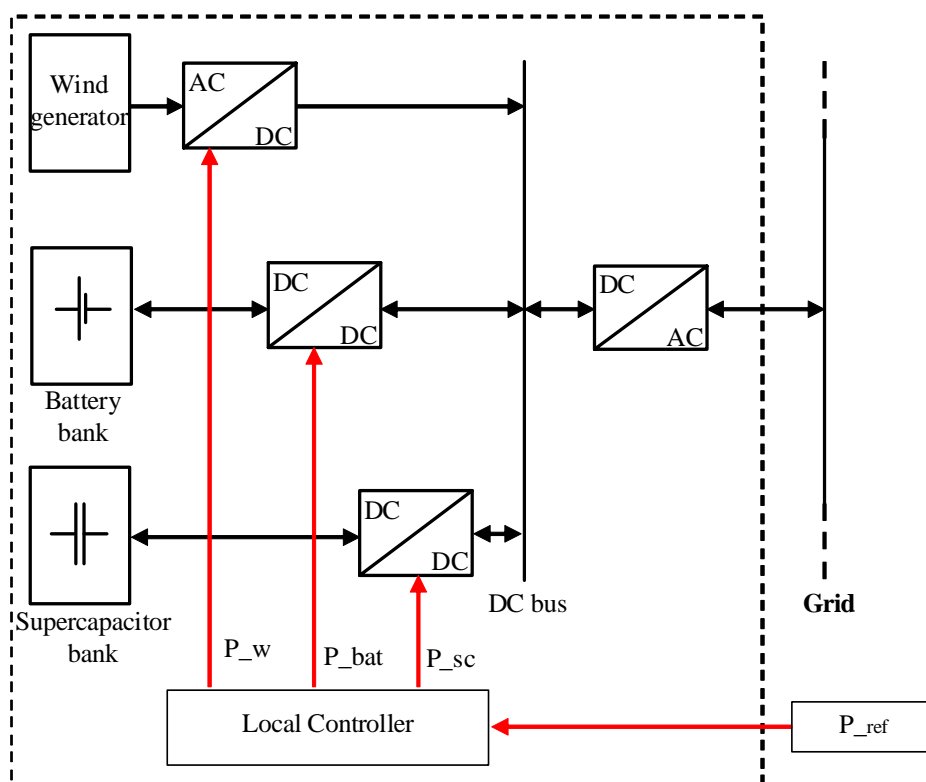
На фиг.5 схематично са показани мощностите в разглежданата хибридна система. Мощността, която се отдава в мрежата P_{HG} е алгебрична сума от мощностите на ветрогенератора P_W и на запасяващите устройства P_{stor}

$$P_{HG} = P_W + P_{stor}. \quad (1)$$

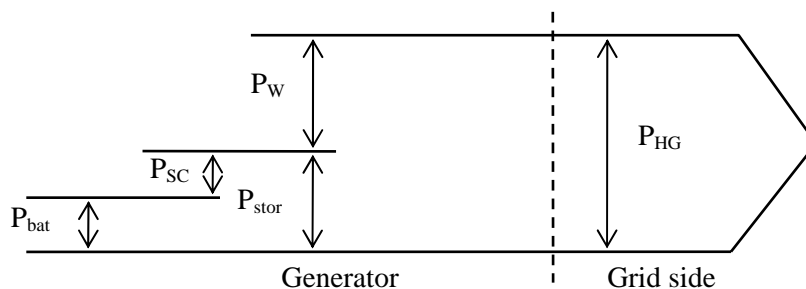
Един от основните проблеми, които трябва да се решат, е създаването на адекватен алгоритъм за разпределяне на мощността между трите елемента на системата.

Обикновено ветрогенераторът работи с максималната възможна мощност, която зависи от вятъра, а на изхода мощността трябва да е постоянна, защото така се изисква от системния оператор (диспечер на енергийната система). При това положение едно възможно решение за разпределение на мощностите е след-

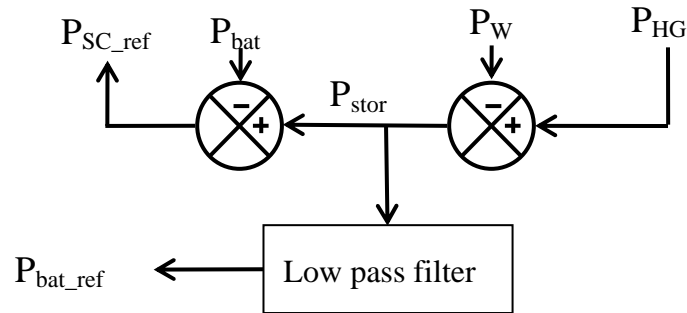
ното: от заданието за изходна мощност на хибридният генератор P_{HG} се изважда мощността на ветрогенератора и се получава мощността, която трябва да се покрие от запасяващите устройства. Тя може да бъде положителна или отрицателна, т.е. да е необходимо да се отдава мощност или съответно – да се приема (запасява). Тъй като кондензаторът има за цел да поеме бързите изменения на мощността, а акумулаторът – бавните, заданието P_{stor} се филтрира през нискочестотен филтър и се получава заданието за мощността на акумулатора P_{bat_ref} . Това задание се използва за управление на преобразувателя на акумулатора. Измерената мощност на акумулатора P_{bat} се изважда от P_{stor} и се получава заданието за мощност на суперкондензатора P_{SC_ref} , което пък се използва за управление на неговия преобразувател. Структурата на този алгоритъм е представена на фиг.6.



Фиг.4. Хибриден електрически генератор с ветрогенератор.

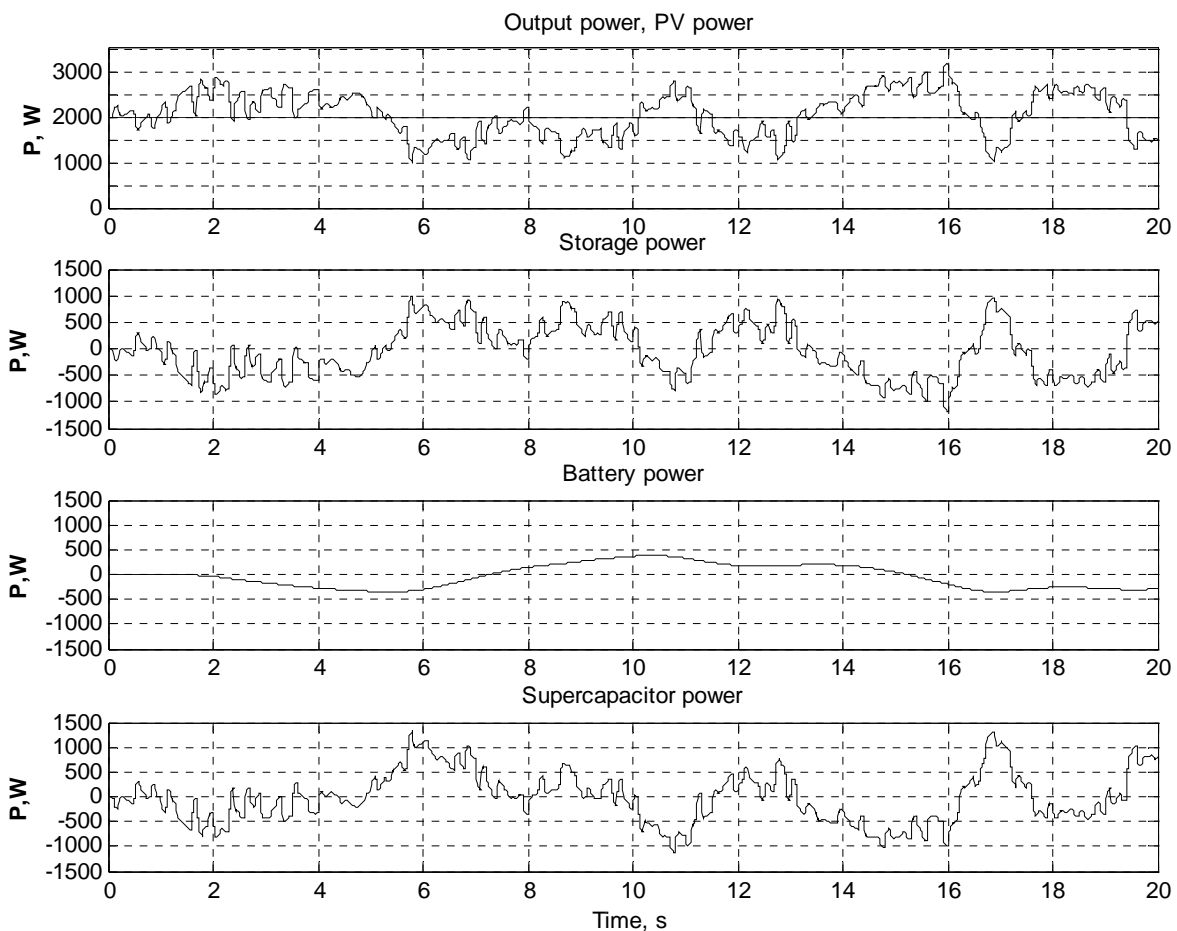


Фиг.5. Потоци на мощността в хибридният генератор



Фиг.6. Алгоритъм за изчисляване на заданията за мощност на суперкондензатора и акумулаторната батерия

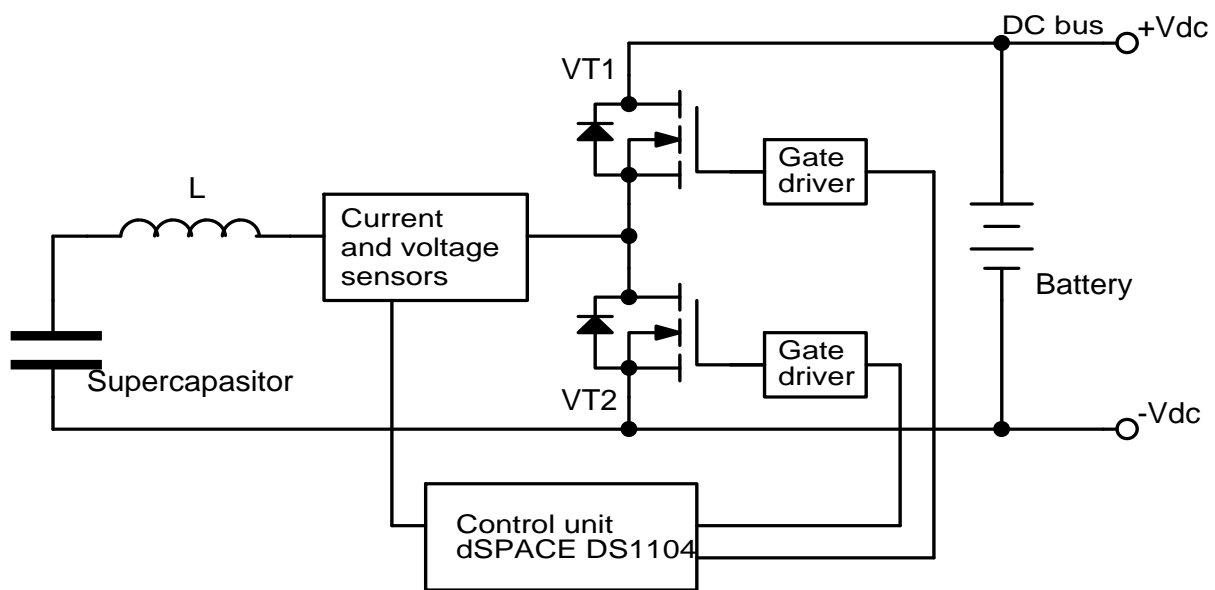
За целите на изследването е реализиран модел на описания алгоритъм и са генерирани заданията за мощност на акумулатора и суперкондензатора при случайно изменение на мощността, генерирана от ветрогенератора. Полученият резултат е показан на фиг.7.



Фиг.7. Отгоре надолу: зададена мощност на хибридният генератор и мощност на ветрогенератора, мощност, която трябва да се покрие от акумулатора и суперкондензатора, мощност на акумулатора и мощност на суперкондензатора за период от 20s

3. Електронен преобразувател

За целта на изследването е разработен електронен преобразувател за свързване на суперкондензатора към постояннотоковата линия. Изискванията към този преобразувател са: да осигурява двупосочен обмен на енергията и да може да се управлява по ток. Една от най-подходящите схеми за целта е т.нар. „повишаващо-понижаващ” преобразувател с два транзистора. Този преобразувател е двуквадрантен и позволява двупосочно протичане на тока от и към суперкондензатора. Схемата на преобразувателя с управлението е показана на фиг.8. Тук акумулаторът е използван, за да се имитира постояннотоковата линия. Преобразувателят се управлява с ШИМ и обратна връзка по ток.

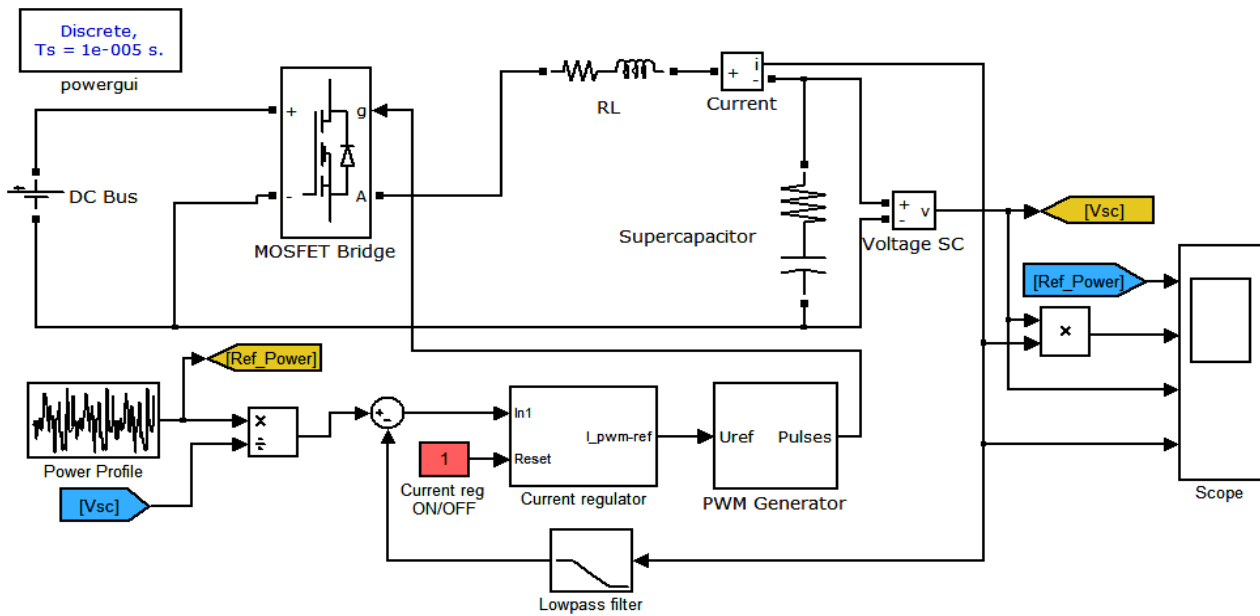


Фиг.8. Схема на електронния преобразувател

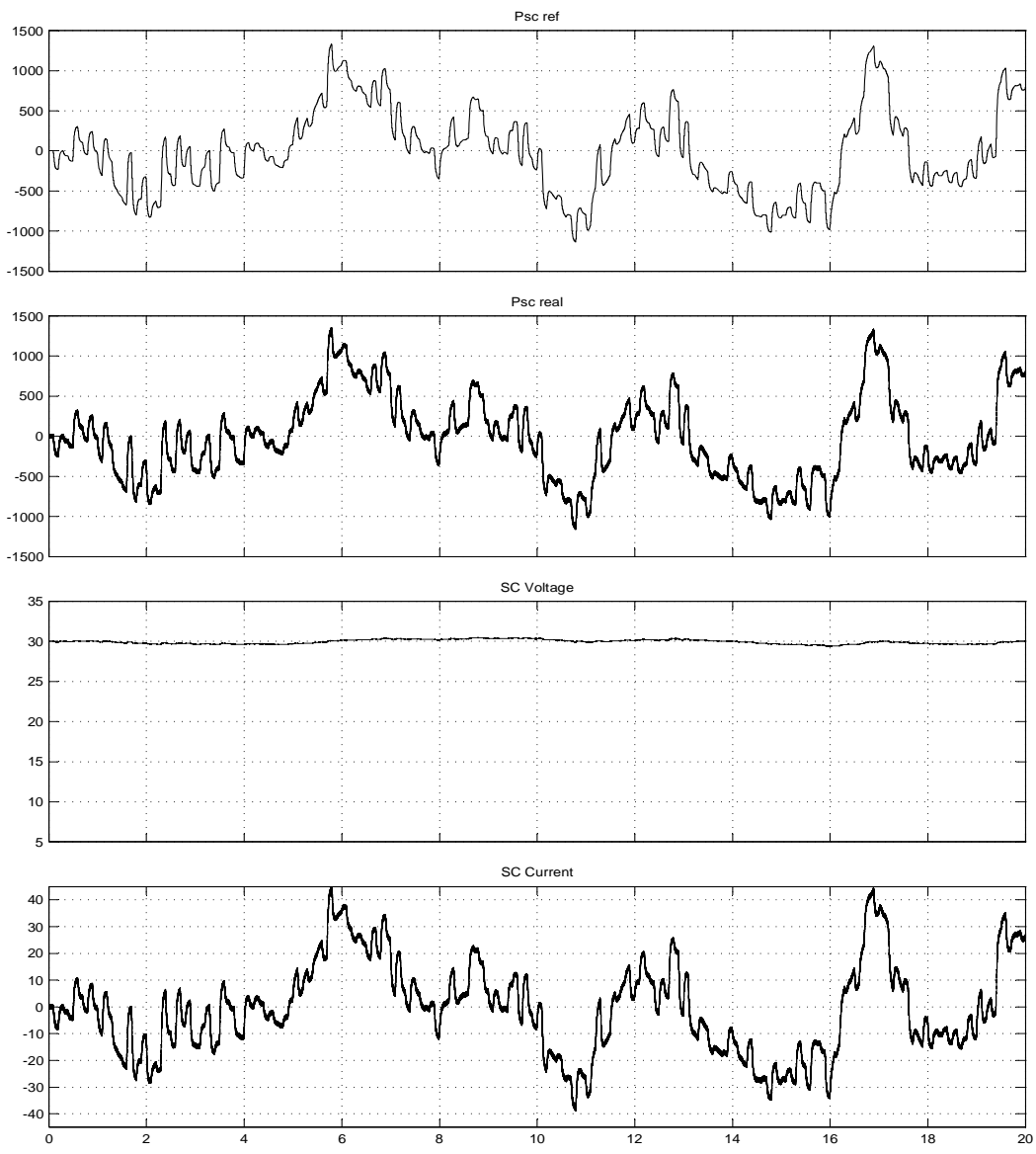
4. Модел в Matlab/Simulink

За изследване на работата на представения електронен преобразувател е създаден модел в средата на Matlab/Simulink. Структурата на модела е показана на фиг.9. На входа на регулатора на тока се подава задание, което се изчислява от заданието за мощност на суперкондензатора, разделено на напрежението на суперкондензатора. Профилът на заданието за мощността е генерираният по-горе и показан на фиг.7.

Резултатите от симулацията са показани на фиг.10. Напрежението на кондензатора в началото е 30V, което съответства на 40% от максималната енергия, която може да се запаси в него. Вижда се, че заданието за мощността се следва точно. Напрежението на суперкондензатора се променя в много малки граници и това е причина формата на тока да следва точно заданието за мощността.



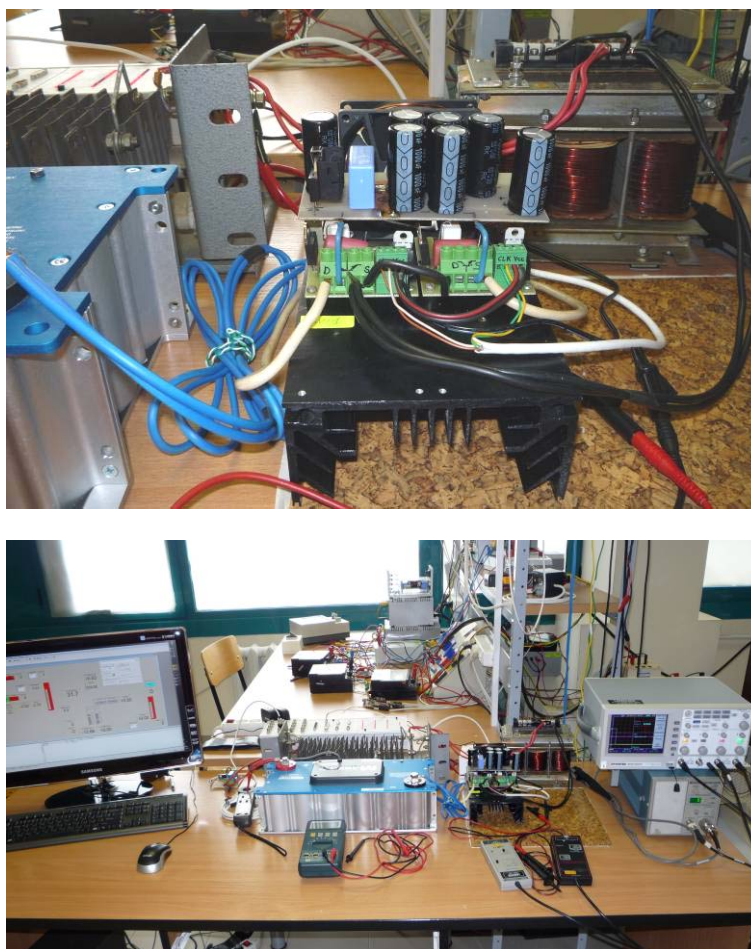
Фиг.9. Модел в Matlab/Simulink



Фиг.10. Резултати от симулацията с Matlab/Simulink

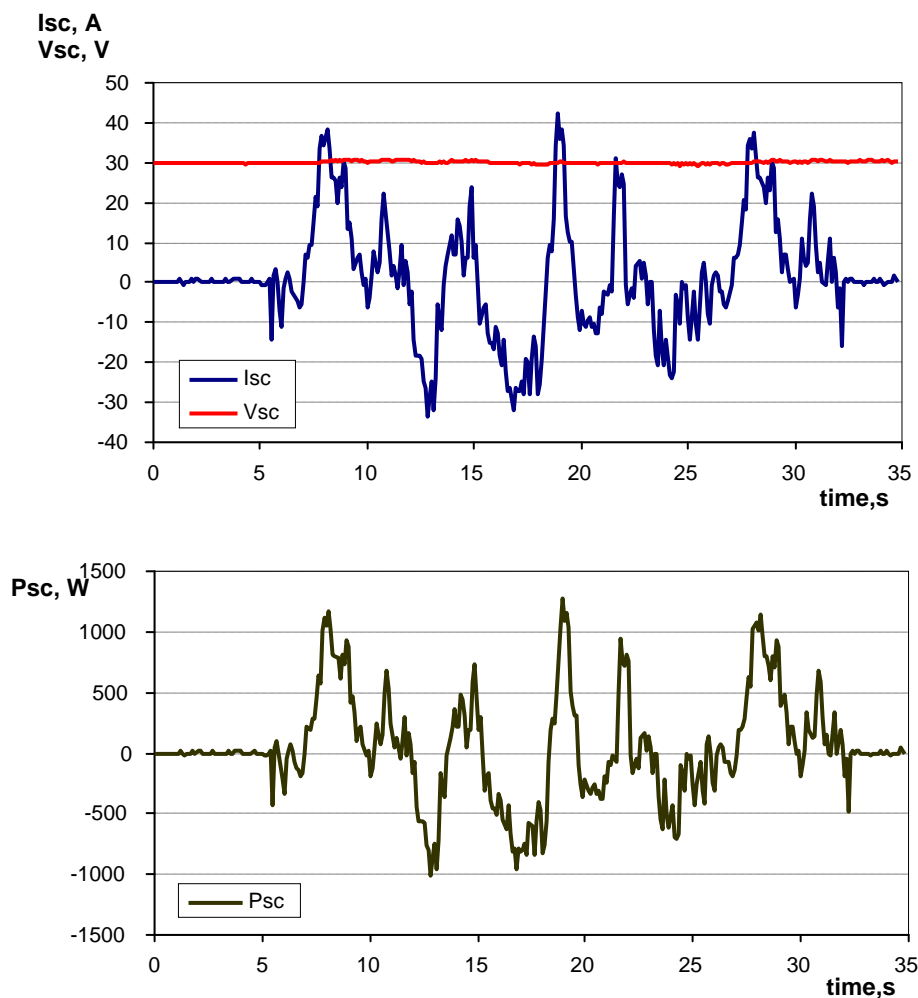
5. Експериментални резултати

За експериментална проверка на възможностите за компенсирание на флуктуациите на мощността със суперкондензатор е създадена опитна постановка която включва елементите, показани на фиг.8. Суперкондензаторният модул е Maxwell Boostcap BMOD0083P048 с капацитет 83F и номинално напрежение 48V. Преобразувателят е реализиран с MOSFET транзистори, дроселът L е с индуктивност 1,2mH, сензорът за ток е LEM, а за напрежение е с измервателен оптрон. За реализиране на управлението е използвана система dSPACE DS1104. Външният вид на електронния преобразувател и на опитната постановка са показани на фиг.11.



Фиг.11. Външен вид на електронния преобразувател и на опитната постановка

За проверка на работата при променлива мощност в контролера е въведен същият профил на мощността, който беше генериран по-горе (фиг.7). Напрежението на суперкондензатора в началото на опита е 30V. Изменението на тока и напрежението на кондензатора са регистрирани с цифров осцилоскоп. На фиг.12 са показани резултатите за целия период от време 20s. Мощността е изчислена като произведение от тока и напрежението. Може да се заключи, че заданието за мощност се следва коректно от преобразувателя.



Фиг.12. Експериментални форми на тока и напрежението на суперкондензатора (горе) и на мощността (долу)

6. Заключение

В работата са представени изследвания на възможностите за покриване на бързите флукуации на мощността на вятърен генератор с помощта на суперкондензатор и акумулатор.

Разработен е алгоритъм за разпределяне на мощностите в хибридна система с ветрогенератор, акумулатор и суперкондензатор и е генерирано задание за мощността на суперкондензатора.

Създаден е компютърен модел, с който са извършени симулации, които потвърждават работоспособността и адекватното поведение на комбинацията от суперкондензатор – електронен преобразувател – управление.

Разработена и реализирана е опитна постановка, с която са проведени експериментални изследвания. Резултатите доказват напълно възможностите за компенсиране на бързи и кратковременни флукуации на мощността на вятърните генератори. При това системата позволява да се компенсират изменения до 100% от номиналната мощност на инсталацията, благодарение на възможността на суперкондензатора и електронния преобразувател да работят за кратко време с максимална мощност.

Литература

- [1] Schneuwly A., R. Gally, Properties and applications of supercapacitors from state of the art to future trends, Proceedings PCIM 2000, 2000.
- [2] Delille, G., "Contribution of storage in advanced control of electrical systems. Organisational and technico-economical approaches in distribution networks", PhD thesis, Ecole Centrale de Lille - L2EP, 2010
- [3] Lu, D., Concept and control of an active PV generator with integrated storage. Application in the aggregation of consumer-producers in the frame of an urban smart grid", PhD thesis, Ecole Centrale de Lille - L2EP, 2010
- [4] P. Li, P. Degobert, B. François and B. Robyns, "Multi-Level Representation for the Control Design of a Super Capacitor Storage System for a Microgrid Connected Application", ICREPQ'08, Santander (Spain), March 2008.
- [5] A. Tsikalakis, N. Hatziaargyriou, "Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation", IEEE

Благодарности

Авторите изказват благодарности на Технически университет – София за финансовата подкрепа по договор 102ни225-1.

Автори: Владимир Лазаров, доц. д-р, катедра "Електрически машини", Електротехнически факултет на ТУ-София, E-mail address: vl_lazarov@tu-sofia.bg; Захари Зарков, доц. д-р, катедра "Електрически машини", Електротехнически факултет на ТУ-София, E-mail address: zzza@tu-sofia.bg ; Людмил Стоянов, маг. инж. асистент, катедра "Електрически машини", Електротехнически факултет на ТУ-София, E-mail address: ludiss@tu-sofia.bg; Християн Кънчев, маг. инж., докторант, катедра "Електрически машини" и ФФОЕ, ТУ-София и Лаборатория по електротехника и силова електроника - L2EP, Ecole Centrale de Lille (Франция), E-mail address: hkanchev@tu-sofia.bg, hkanchev@ec-lille.fr

Постъпила на 10.11.2011

Рецензент проф. д-р Е. Николов

ТЕРМИЧНА ДЪЛГОТРАЙНОСТ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ИЗОЛАЦИЯ ПРИ ОТРИЦАТЕЛНИ ТЕМПЕРАТУРИ

Ганчо Божилов, Антоанета Тодорова

Резюме: Предмет на настоящата работа е метод за определяне на термичната дълготрайност на изолационната система на електрически машини, трансформатори, кабели и други електротехнически съоръжения, както при положителни, така и при отрицателни температури. Методът се базира на математичен модел и методика, разработени от авторите и на известни зависимости, доразвити от тях с цел да се използват за симулация и прогнозиране на стареенето на изолацията в зависимост от нейната температура. Предложена е хипотеза, според която максималният ресурс е при оптималната температура в допустимия температурен интервал за съответния топлинен клас на изолацията, а минималният – при екстремните температури в двата края на този интервал.

Ключови думи: електрическа изолация, термична дълготрайност, отрицателни температури, електрически машини, трансформатори, кабели

THERMAL DURABILITY OF ELECTRIC INSULATION BY NEGATIVE TEMPERATURE

Gantcho Bojilov and Antoaneta Todorova

Abstract: A Method for thermal durability determining of electric insulation of electrical machines, transformers, cables and other electric devices by positive and negative temperature is proposed. The method is based on a mathematical model and a methodology developed in previous authors' publications, as well the functions developed by him and used for simulation and prediction the ageing of the insulation. A hypothesis that the maximum durability by the optimum temperature of the temperature interval for insulation class is, but the minimum durability is by the extreme temperatures on the bout ends for this interval.

Keywords: electric insulation, thermal durability, negative temperature, electrical machines, transformers, cables

1. Увод

Надеждността на електрическите машини и апарати, трансформаторите, кабелите, електроинструментите, домакинските електроуреди и другите електротехнически устройства в значителна степен се определя от състоянието на тяхната изолация. В процеса на експлоатация (в работни условия), а така също и по време на съхранението и транспортирането, изолацията е подложена на различни

въздействия, водещи с течение на времето до влошаване на нейните качества. Стареенето и деградацията на изолацията произтичат в резултат на нагриване, охлаждане, механични и електромагнитни сили, влияние на влага, агресивни среди и други фактори на околната среда [1,2,3,4,5,6]. Във високоволтовите машини, трансформаторите, кабелите и другите изолирани проводници съществено значение има и въздействието на електрическото поле.

Известно е също, че дълготрайността (ресурса или продължителността на живота) на една електрическа машина, апарат, трансформатор или кабел намалява не само при стационарните процеси, но и в преходните, като включване и изключване, пускане, спиране, реверсиране или късо съединение, както и при промяна на товара, във връзка със загряването и охлаждането на проводниците. Прогнозирането на дълготрайността на изолационната система в работни условия при тези случаи е от особена важност за живота на съоръжението, но е много трудно да се прецени в количествено отношение.

2. Същност на проблема

Една от известните зависимости за ресурса (дълготрайността или живота) L на електрическата изолация от работната температура е [6,8]:

$$L = a \cdot \exp(-\theta/b), \quad (1)$$

където θ [$^{\circ}\text{C}$] е температурата на изолационния материал, a и b са коефициенти, зависещи от съответния клас на топлоустойчивост на изолационната система на съоръжението, усреднените стойности на които могат да се определят от таблици табл. 1 и 2, съставени по графики за дълготрайността на изолационни материали от различни класове, взети от различни литературни източници [3,6,10].

Таблица 1

Клас	A	E	B	F	H
θ_{\max} [$^{\circ}\text{C}$]	105	120	130	155	180
$a \cdot 10^3$ [год]	11,3	28,7	42	119	312,5
b [$^{\circ}\text{C}$]	14,8	15,1	15,5	16,4	17,3
$b' = b \cdot \ln 2$ [$^{\circ}\text{C}$]	10,3	10,5	10,7	11,3	12
$L_{\min} \cdot 10^3$ [ч]	93,7	88,7	83,6	82,6	82,4
L_{\min} [год]	10,7	10,13	9,54	9,43	9,41

Таблица 2

Клас	A	E	B	F	C
θ_{\max} [$^{\circ}\text{C}$]	105	120	130	155	(225)
$a \cdot 10^3$ [год]	0,98	4,12	10,32	40,35	5175
b [$^{\circ}\text{C}$]	16,3	15,4	15	14,8	14,7
$b' = b \cdot \ln 2$ [$^{\circ}\text{C}$]	11,3	10,7	10,4	10,3	10,2
$L_{\min} \cdot 10^3$ [ч]	13,59	14,9	15,85	10	10
L_{\min} [год]	1,55	1,7	1,81	1,14	1,14

Коефициентът $b' = b \cdot \ln 2$ в таблиците изразява известното правило на Монтзингер – Бюсинг за двойното скъсяване на живота на изолацията при всяко пови-

шаване на температурата ѝ с b' градуса. Както се вижда от таблиците, поради непрекъснатото подобряване на качеството на изолационните материали, популярното в миналото правило на «8–те градуса» вече се е превърнало в правило на $10 \div 12$ –те градуса.

Екстремните стойности на дълготрайността на изолацията в горната зависимост са: максимален условен живот $L_0 = a$ при 0°C и минимален живот L_{\min} при максимално допустимата за съответния топлинен клас температура θ_{\max} . Зависимостта (1) произтича от закона на Вант Хофф - Арениус за топлинното стареене на материалите във функция от работната температура [1,4,5]

$$L = \exp(B/T - G) = A \cdot \exp(B/T), \quad (2)$$

където A , B и G са константи – табл. 3, T [$^\circ\text{K}$] е абсолютната температура.

Таблица 3

Клас	A	E	B	F	H
T_{\max} [$^\circ\text{K}$]	378	393	403	428	453
$B \cdot 10^3$ [$^\circ\text{K}$]	9,5	9,85	10,2	12,7	15,5
G [-]	15,3	15,1	15,51	19,7	24,2
$A = e^{-G} \cdot 10^{-8}$ [ч]	22,7	27,7	18,6	0,28	0,003
b' [$^\circ\text{C}$]	10,7	11,2	11,3	10,2	9,4
$L_{\min} \cdot 10^3$ [ч]	18,57	21,2	18,22	21,46	22,39
L_{\min} [год]	2,12	2,42	2,08	2,45	2,55

Последният ред стойности за минималния ресурс е в съответствие със стандартите за ускорено изпитване на стареене и топлинна оценка на изолационни системи [11,12], където за електроизолационни материали той се регламентира за най-високите допустими температури на 20000 ч. (2,28 год.), а за електрически машини и трансформатори – на 10000 ч. (1,14 год.). Но това не трябва да се смесва с прогнозирането на живота на изолацията при нормална експлоатация на съоръженията в работни условия, тъй като изрично е упоменато в стандартите, че «животът по време на стареене няма пряка връзка с полезния живот на една машина по време на работа».

В горните зависимости обаче се крие един парадокс. Според формули (1) и (2), дълготрайността нараства при отрицателни температури (в студ) и е толкова по-голяма, колкото на по-ниски температури е подложена изолацията. Това формално съответства на констатациите в някои литературни материали, но ако в тези формули се замести температурата на абсолютната нула -273°C , животът на материала нараства до абсурдната стойност от хиляди трилиони години. Това се потвърждава и от графиките в литературните източници, където ако линиите (в полулогаритмичен мащаб) се продължат в областта на отрицателните температури, те ще се пресекат при -273°C . Следователно зависимостта е приложима само за положителни температури на загряване (над 0°C).

Електрическите съоръжения обаче могат да работят, да се транспортират или да се съхраняват и при условия, характеризирани се с ниски или дори много ниски отрицателни температури, например на открито, в полярни области, на големи

височини или в открития космос. Известно е също, че освен с топлоустойчивост, изолационните материали се характеризират и със студоустойчивост, която е свързана с деградацията на материала от механичен характер като стареене, крехкост, напукване, чупливост и др., която също предизвиква влошаване на работните им свойства. Всичко това налага да се създаде подход за определяне на дълготрайността на изолациите, който да е валиден и за областта на отрицателните температури.

3. Математичен модел и описание на метода

Методът се базира на математичен модел и методика, разработени от авторите, както и на известни от литературата аналитични зависимости, които са доразвити с цел да се използват за симулация и прогнозиране на топлинното стареене на изолацията. Логично е да се предположи, че както има минимален ресурс, съответстващ на максимално допустимата за топлинния клас температура θ_{\max} , така би трябвало да съществува минимален ресурс и за най-ниската отрицателна температура θ_{\min} . В тази връзка би трябвало да има и оптимална температура θ_m , при която ресурсът е максимален.

Основните параметри на предлаганата хипотеза са:

Изчислителен ресурс (дълготрайност) на изолационната система, който представлява средният, респ. гама-процентният ресурс (при $\gamma=90-95\%$) до момента на вероятен отказ. При постоянен температурен режим той се определя по алгоритъм, базиран на числено интегриране (натрупване) на степента на остаряване на изолацията във функция от отработените от съоръжението “топлинни” часове, както следва:

а) В температурния интервал от θ_m до θ_{\max}

$$L_i = a \cdot \exp(-\theta_i / b) \quad (3a)$$

б) В температурния интервал от θ_m до θ_{\min}

$$L_i = a \cdot \exp[(\theta_i - 2\theta_m) / b], \quad (3b)$$

където θ_m е оптималната (от изолационни и механични съображения) температура за предписания температурен интервал на изолационната система; θ_{\max} е пределно допустимата (най-високата положителна) температура за съответния топлинен клас на системата; θ_{\min} е най-ниската допустима температура; θ_i е текущата температура на изолационния материал на електрическата машина, апарат, трансформатор или кабел, която при нестационарно загряване трябва да бъде измервана и осреднявана за всеки i -ти интервал на отчитане (при ширина на времеинтервалите Δt).

Във връзка с гореизложеното и в светлината на горната хипотеза, максималният и минималният ресурси ще се изразят със зависимостите

$$L_{\max} = a \cdot \exp(-\theta_m / b) \quad (4a)$$

$$L_{\min} = a \cdot \exp(-\theta_{\max} / b) = a \cdot \exp[(\theta_{\min} - 2\theta_m) / b], \quad (4b)$$

т.е. максималният ресурс ще бъде при оптималната за допустимия интервал температура θ_m , а минималният – при температурите в двата края на интервала θ_{\max} и $\theta_{\min} - 2\theta_m$.

При променлив температурен режим текущото стареене се определя по следния алгоритъм.

Изчислителна степен на остаряване (деградация) на изолацията в съответния i -ти интервал от време $D_i = \frac{\Delta t}{L_i}$

Текуща (резултантна) степен на остаряване на изолацията (стареене с натрупване в последователните интервали) $D_{ki} = \sum_i D_i$.

Текуща (резултантанта) степен на годност на изолацията $C_{ki} = 1 - D_{ki} = 1 - \sum_i D_i$.

Резултантен ресурс на изолационната система на съоръжението

$$L_{ki} = \frac{t_i}{D_{ki}} = \frac{i \cdot \Delta t}{\sum_i D_i}. \quad (5)$$

Остатъчен ресурс, т.е. времето от текущия момент $t_i = i \cdot \Delta t$ на измерване на температурата до момента на вероятен отказ (топлинен пробив на изолацията).

$$L_{oi} = L_{ki} - t_i = \frac{1 - D_{ki}}{D_{ki}} t_i = \frac{C_{ki}}{D_{ki}} t_i \quad (6)$$

Пълното изчерпване на ресурса ще се получи тогава, когато степента на остаряване стане $D_{ki} = \sum_i D_i = 1$, а степента на годност стане $C_{ki} = 1 - \sum_i D_i = 0$, от където

може да се определи времето, представляващо продължителността на живота (работоспособността и срока на служба, т.е. дълготрайността) на изолацията.

Трябва да се поясни, че с развитие на времето и при различните температури, на които е подложена изолацията, степента ѝ на остаряване е непрекъснато нарастваща функция, клоняща към единица, докато степента ѝ на годност е непрекъснато намаляваща функция, клоняща към нула. Скоростта на изменение на тези функции е различна в различните интервали от време като зависи както от положителните, така и от отрицателните температури и в някои интервали може да е по-силна, а в други – значително по слаба, например при престой, транспорт или съхранение на съоръжението.

За сведение в табл.4 са показани класовете на топлоустойчивост и температурните интервали на някои електроизолационни материали.

Таблица 4

А) Синтетични полимери:

Полистирол, стирофлекс, полиамид - кл. У (-50° ÷ +70°); $\theta_m \approx +10^\circ\text{C}$

Полиетилен - кл. У (-70° ÷ +70°); $\theta_m \approx 0^\circ\text{C}$

Поливинилхлорид, полиуретан - кл. А (-45° ÷ +105°); $\theta_m \approx +20^\circ\text{C}$

Полиимид (тефлон) - кл. С (-190° ÷ +250°); $\theta_m \approx 0^\circ\text{C}$

Б) Лакове

Глифталов - кл. Е (-70° ÷ +120°); $\theta_m \approx +10^\circ\text{C}$

В) Каучуци

Силиконов - кл. Н (-60° ÷ +180°); $\theta_m \approx +20^\circ\text{C}$

Г) Смоли, лепила, компаунди

Епоксидна - кл. Е (-70° ÷ +120°); $\theta_m \approx +10^\circ\text{C}$

Д) Слоести пластмаси

Стъклотъкан, стъклотекстолит – кл. F(-45° ÷ +155°); $\theta_m \approx +20^\circ\text{C}$

Гетинакс – кл. А (-65° ÷ +105°); $\theta_m \approx +20^\circ\text{C}$

Е) Полиестери

Хостафан, полифол, лавсан – кл. Е (-50° ÷ +120°); $\theta_m \approx +20^\circ\text{C}$

4. Заключение

Тази работа не претендира да даде универсален алгоритъм за определяне на дълготрайността на изолационните системи при всякакви температурни условия, а по-скоро да обърне внимание на необходимостта да се има пред вид, че материалите могат да работят и в условия на студ, където оценяването на живота на изолацията е също така важно, както и при загряване.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколов, Е. Надеждност на електрическите машини, С, Техника, 1985.
- [2] Соколов, Е. Изследване и изпитване на електрически машини, С. Техника, 1977.
- [3] Петров, Г. Електрическите машини, ч. 1. М, Энергия, 1974.
- [4] Ермолин, Н., И. Жерихин. Надежность электрических машин, Л., Энергия, 1976.
- [5] Котеленец, Н., Н. Кузнецов. Испытания и надежность электрических машин. М., Высшая школа, 1988.
- [6] Ключев, В. Теория на електрораздвижването, С., Техника, 1989.
- [7] Болотин, В. Ресурс машин и конструкций, М., Машиностроение, 1990.
- [8] Божилов, Г., Т. Илиев, В. Димитров. Микропроцесорна система за мониторинг и определяне на ресурса на електрически машини и съоръжения. Енергиен форум, Варна, 2005.
- [9] Iliev, T., V. Dimitrov. Modelling of heat processes in induction motor and determination of thermal life of stator winding insulation by Matlab 6.5. 11-th Int. conf. of electrical machines, drives and power systems "ELMA 2005", Sofia, 2005.
- [10] Божилов, Г., Т. Илиев. Метод и микропроцесорна система за определяне на ресурса на електрически машини и трансформатори в реално време. Е+Е, No 3-4, 2006.
- [11] БДС EN 60034-18-1/21/31 2003. Въртящи се електрически машини. Част 18: Функционална оценка на изолационни системи.
- [12] БДС 6301-84. Материали изолационни. Общи изисквания към метода за изпитване на топлоустойчивост.

Автори: Ганчо Й. Божилов, проф. дтн, тел. 02-965-2135; E-mail address: gjboj@tu-sofia.bg; Антоанета К. Тодорова, доц. д-р, Технически Университет – София, тел. 02-965-2443 E-mail address: a.todorova@tu-sofia.bg

Постъпила на 12.12.2011

Рецензент проф. дтн Е. Николов

КОМПЮТЪРНИ ЗАДАЧИ В ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ МАШИНИ

Ганчо Божилов

Резюме: В настоящата работа авторът прокламира съвременния подход на инженерите към изследването и изчислението на електрическите машини, който се състои в широко използване на високопроизводителните и бързи съвременни компютри. За целта се използват числени методи и достъпни софтуерни продукти, без да се налага да се програмират аналитични формули и математически алгоритми. С това отпадат повечето класически формули, коефициенти и понятия, както и приблизителните графични и графоаналитични методи, опростявания, линеаризации, кръгови диаграми, номограми и др. Малко се използват и методите от висшата математика и теоретичната електротехника за интегриране и диференциране, за разлагане в хармоничен или степенен ред, за решаване на електрически и магнитни вериги, системи диференциални уравнения, оптимизиране, подобие и др.

Ключови думи: електрически машини, компютърни проблеми, числени методи

KOMPUTER PROBLEMS IN THE ELECTRICAL MACHINES

Gantcho Bojilov

Abstract: In this paper the author a contemporary approach of the engineers to the investigation and computing of the electrical machines is proclaimed, who consist in the wide using the rapid contemporary computers. For this purpose the numerical methods and commercial software is used, without to force programming analytic formula and mathematic algorithms. Thereby more classical formula, coefficients and notions, as well the graphical and analytic methods, simplifications, linearity, nomographs and circular geometrical diagrams dying out. As well the analytic methods known to the higher mathematics and electrical engineering for the integrating and differentiate, decomposition in the harmonic and infinite series, the methods for solution of the electric and magnetic circuits, for solution of the differential equations and optimization, of the similarity and other dying out.

Keywords: electrical machines, computer problems, numerical methods

1. Увод

Голямата производителност на съвременните компютри, изразяваща се в памет и бързодействие, вече е наложила нов съвременен подход на инженерите към изследването и изчислението на електрическите машини, състоящ се в следното.

Все по-малко се използват класическите аналитични методи и формули, познати от висшата математика и теоретичната електротехника, като формулите за интегриране и диференциране на функции, за разлагане в хармоничен или степенен ред, методите за решаване на електрически и магнитни вериги, методите за решаване на системи диференциални уравнения, за оптимизация и апроксимация, методите на подобие и др. Отпадат и приблизителните графични и графоаналитични методи, опростявания, линеаризации, кръгови диаграми, номограми и др., които са имали място в класическата теория на електрическите машини и са били върхово интелектуално постижение за времето си. Вместо тях за изследване, изчисление и моделиране се използват числени методи, итерационни процедури и комплексна алгебра от достъпни софтуерни продукти, в алгоритмите на които разбира се, са залегнали същите тези методи. Очевидно е, че това е един прагматичен и елементарен подход, лишен от онази елегантност и интелектуалност, присъща на класическите методи. Но също така е очевидно, че това е един ефективен и работещ подход, разчитащ напълно на голямата скорост и памет на компютрите.

Например за търсене на производна и интеграл на сложна функция е за предпочитане да се разбие съответната интервална област на извънредно голям брой тесни подинтервали и изчислението да се извърши не по формулите от висшата математика, а със сканиране на съответната зависимост, следвайки първичната дефиниция за производна и интеграл $f' = \Delta y / \Delta x$ и $\int = \sum y(x) \cdot \Delta x$. Така могат се извършват и хармоничният анализ, апроксимациите, определянето на токовете, мощностите и загубите при нелинейните модели, също и оптимизацията, както и решаването на полевите задачи (чрез фундаменталните уравнения на Максвел) – с извънредно голям брой пресмятания, поверени на високоскоростния компютър. С това се преодолява „хипнозата“ от класическите аналитични методи като отпада и концепцията за икономия на машинно време, тъй като този въпрос вече не стои при обикновените едномерни и двумерни задачи, освен при някои тримерни или оптимизационни. А за другите по-малко сложни задачи просто се използват инструментите от готови компютърни продукти като например FEMM, COSMOSM, ANSYS, SIGMAPLOT, MATLAB, MATHCAD, EXCEL и др.

Веднага може да се забележи, че този подход е едно възвръщане към първичното и фундаменталното, но при него се губи физическата същност на процесите и общността на резултатите, защото крайните резултати са за конкретна машина и се получават директно в табличен и/или графичен вид без да се използват такива традиционни понятия от електрическите машини като магнитодвижещи напрежения, коефициенти на намотките, различни спомагателни коефициенти, реакция на котвата, периодични и аperiodични съставки, активни и реактивни съставки, стационарни, преходни и свръхпреходни реактанси и съответните им времеконстанти, висши пространствени и времеви хармоници на полето и др. Но всичко това се компенсира от огромната мощ на съвременните компютри, които непрекъснато и с невероятни темпове се усвършенстват.

2. Примерни компютърни задачи, свързани с изследване и изчисление на електрически машини

- Определяне на формата, ефективната стойност и хармоничния състав на намагнитващия ток на еднофазни и трифазни трансформатори;- на ударния ток на включване на еднофазни и трифазни трансформатори;- на формата и ефективната стойност на тока на еднофазни колекторни двигатели с последователно възбуждане;- на ъгъла на физическата неутрална линия и необходимия ъгъл на изместване на четките на колекторни машини;
- Изследване на формата и разпределението на магнитната индукция в магнитната система на колекторни машини;- на формата и разпределението на магнитната индукция в магнитната система на синхронни и асинхронни машини;
- Определяне на загубите в стоманата на различни типове машини;- на инерционния момент на ротора на въртящи се електрически машини;- на разпределението на тока и потока в каналите на асинхронни двигатели;- на разпределението на токовете в кафезния ротор на асинхронни двигатели при несиметрия в пръчките;- на електромагнитния момент на синхронни и постояннотокови машини с и без възбуждане;- на индуктивностите и реактансите на намотките на различни видове електрически машини и трансформатори;
- Изчисляване на характеристиките на синхронни, асинхронни и колекторни машини;
- Замяна на графичните построения на характеристиките на постояннотокови и синхронни машини с аналитично изчисление;
- Експериментално-аналитично изследване на механичните и вентилационните загуби във въртящи се електрически машини;
- Аналитично изследване на различни преходни процеси в електрически машини и трансформатори с отчитане на нелинейната характеристика на магнитната система;
- Приложение на обобщената теория на електрическите машини с отчитане на нелинейната характеристика на магнитната система на синхронни и асинхронни машини;
- Нелинейни динамични модели на електрически машини.

3. Илюстративни числени примери от разработки и авторски публикации с използване на числени методи и математически модели от достъпни компютърни продукти

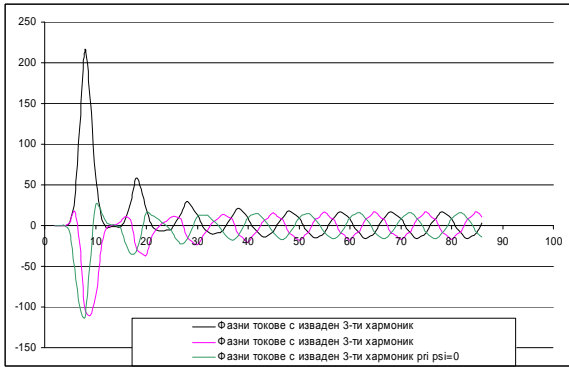
3.1. Определяне на формата на ударния ток на включване на трифазен трансформатор на празен ход (нелинеен модел) – фиг. 1, фиг. 2

Изхожда се от основните зависимости за нелинеен трансформатор като се задават дискретни стойности на времето. Уравнението се решава с помощта на програмния продукт Excel.

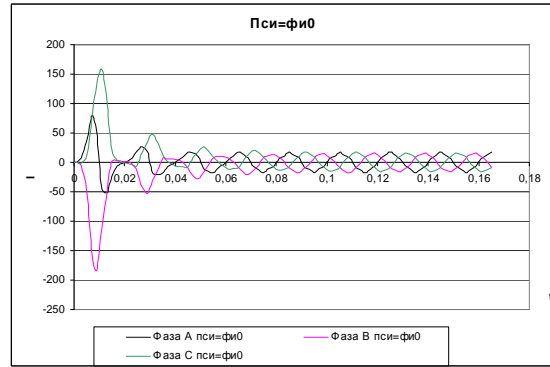
$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \psi - \varphi_0) - \Phi_m \sin(\psi - \varphi_0) e^{-t/T_0} \quad (1)$$

Използва се апроксимация на магнитната характеристика на трансформатора с функцията

$$i = a\Phi + b\Phi^5 \quad (2)$$



Фиг. 1



Фиг. 2

3.2. Определяне на формата и ефективната стойност на тока на еднофазен колекторен двигател с последователно възбуждане (нелинеен модел) – фиг. 3

Използва се апроксимация на магнитната характеристика с функцията

$$\Phi = ai^b; \quad i = \left(\frac{\Phi}{a}\right)^{1/b}, \quad \Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (3)$$

където токът в дигитализиран вид е

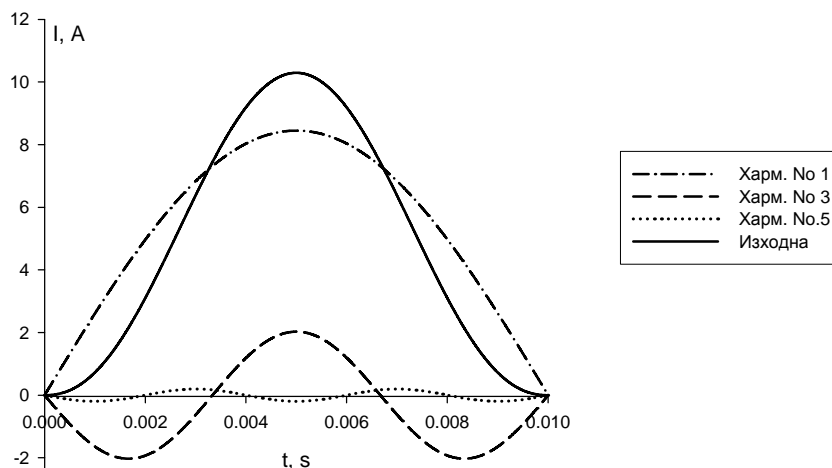
$$i_k = I_m \sin \omega t = I_m \left[\sin\left(\frac{k}{N} \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right]^{1/b} \quad (4)$$

За целта разделяме периода на променливия ток на N подинтервала, броят на които за по-голяма точност трябва да бъде достатъчно голям за да се използва формулата на правоъгълниците. Поради симетрията на кривата използваме $1/4$ от периода, т.е. $\pi/2$. Тогава ефективната стойност на тока ще бъде

$$I = I_m \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (\sin \omega t)^{2/b} d\omega t} = I_m \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\sin\left(\frac{k}{N} \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right]^{2/b}} \quad (5)$$

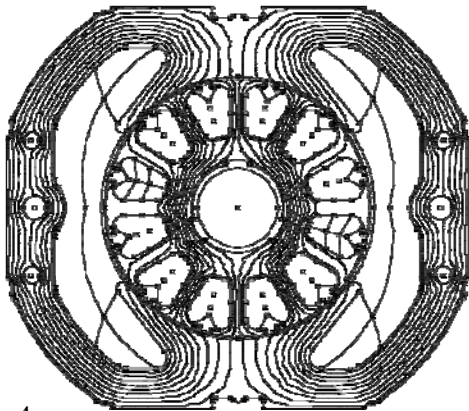
Ефективните стойности на v -те висши хармоници на тока, определени чрез числено интегриране по формулите на Фурие, ще се получат от зависимостта

$$I_v = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} (\sin \omega t)^{1/b} \cdot \sin v\omega t d\omega t = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \left[\sin\left(\frac{k}{N} \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right]^{1/b} \cdot \sin\left(v \frac{k}{N} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (6)$$

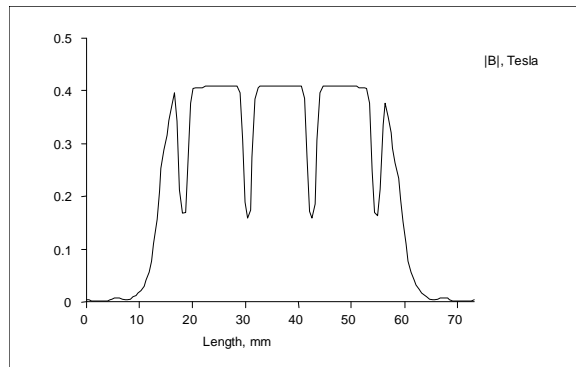


Фиг.3

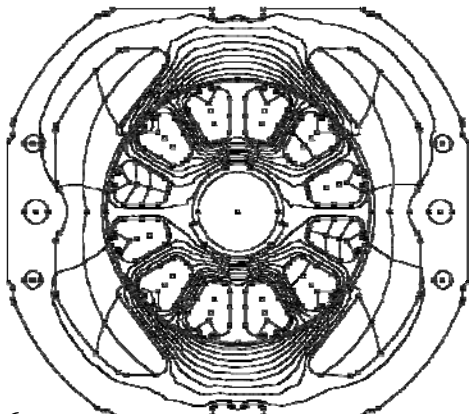
3.3. Изследване на формата и разпределението на магнитната индукция в магнитната система на постояннотокови машини с използване на програмния продукт FEMM - фиг. 4 ÷ фиг. 9



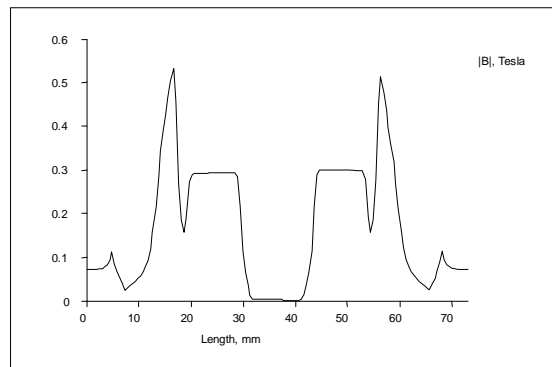
Фиг. 4



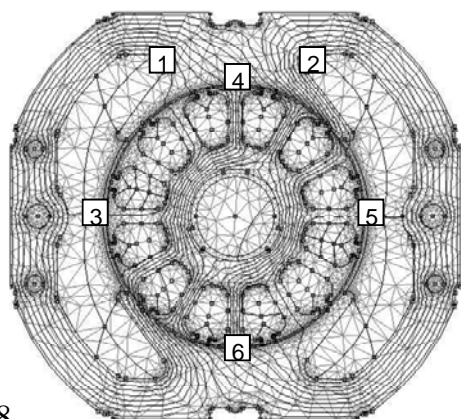
Фиг. 5



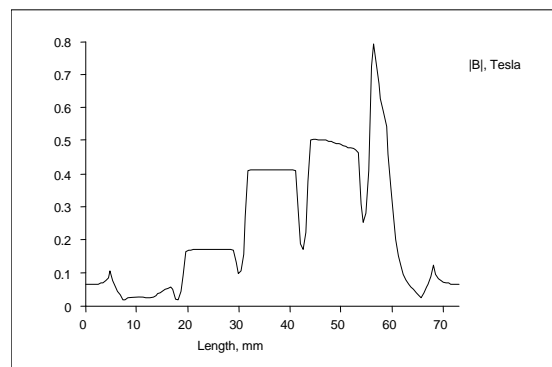
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



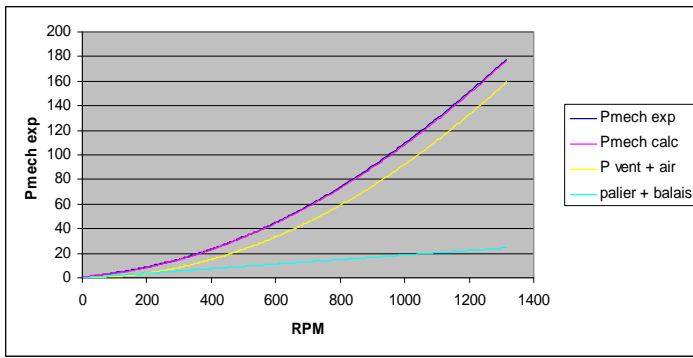
Фиг. 9

3.4. Експериментално-аналитично изследване на механичните и вентилационните загуби на еднофазен колекторен двигател за ръчен електроинструмент

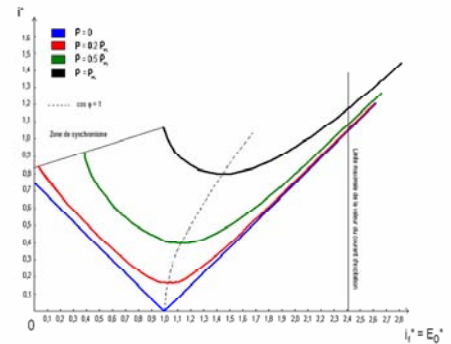
Тези загуби се определят от зависимостта (фиг.10)

$$P_{заг} = i^2 J \omega \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$

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), ω - ъгловата скорост на ротора във функция от времето.



Фиг. 10



Фиг. 13

3.5. Изследване на преходния процес при пускане на еднофазен колекторен двигател с използване на програмния продукт Mathcad (нелинеен модел) - фиг. 11, фиг. 12

С помощта на програмния продукт SigmaPlot нелинейната магнитна характеристика на магнитопровода се апроксимира с интерполяционен полином от трета степен или с дробна функция с два или три параметъра, както следва

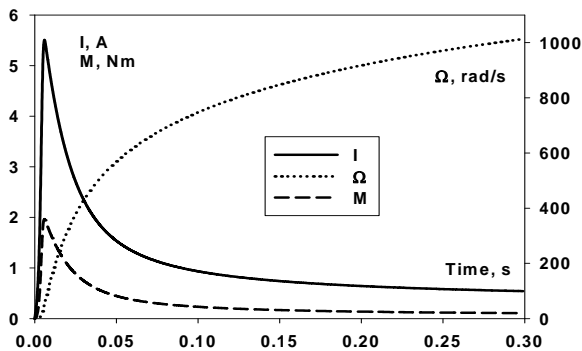
$$\Phi_{\delta} = \frac{a_1 i}{b_1 + i}; \quad \Phi_f = \frac{a_2 i}{b_2 + i}, \quad \Phi_a = \frac{a_3 i}{b_3 + i} + c_3 i \quad (8)$$

Числено решение на системата нелинейни диференциални уравнения

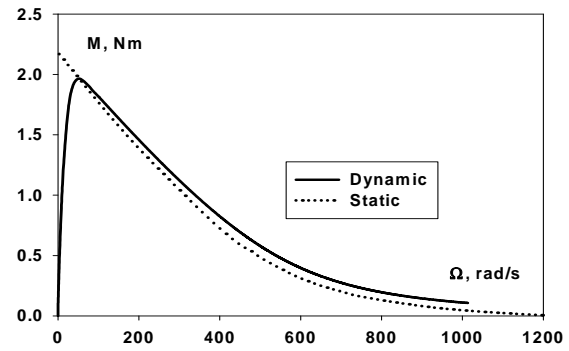
$$\left(\frac{d\Psi_f}{di} + \frac{d\Psi_a}{di} \right) \frac{di}{dt} + (R_f + R_a)i + k\omega\Phi_{\delta} = U \quad ; \quad J \frac{d\omega}{dt} + g\omega^m = k i \Phi_{\delta}, \quad (9)$$

За целта системата се представя във форма на Коши

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - (R_f + R_a)i - k\omega \frac{a_1 i}{b_1 + i}}{w_f \frac{a_2 b_2}{(b_2 + i)^2} + w_a \left[\frac{a_3 b_3}{(b_3 + i)^2} + c_3 \right]} \quad ; \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{ki \frac{a_1 i}{b_1 + i} - g\omega^m}{J} \quad (10)$$



Фиг. 11



Фиг. 12

3.6. Изчисляване на характеристиките на синхронна машина – фиг. 13

Решава се основното уравнение за равновесие на напреженията в комплексна форма

$$\dot{E}_0 = \pm \dot{U} + (r_a + jx_{\sigma})\dot{I} + jx_{aq}\dot{I}_q + jx_{ad}\dot{I}_d \quad (11)$$

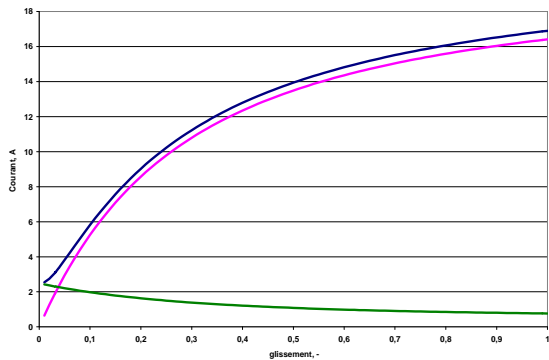
3.7. Изчисляване на характеристиките на асинхронен двигател (нелинеен модел) - фиг. 14, фиг. 15

Характеристиките на двигателя се изчисляват по пълната T-образна заместваща схема с отчитане на нелинейните зависимости на параметрите от хлъзгането без никакви опростявания, при изменение на хлъзгането s в диапазона от 0 до s_m (за работните характеристики) и в диапазона от s_m до 1 (за пусковите характеристики). Характеристиките се изчисляват точка по точка като се използват известни формули за токовете в комплексна форма и с помощта на различни програмни продукти като MatLab, MatCad или Excel, които имат комплексна

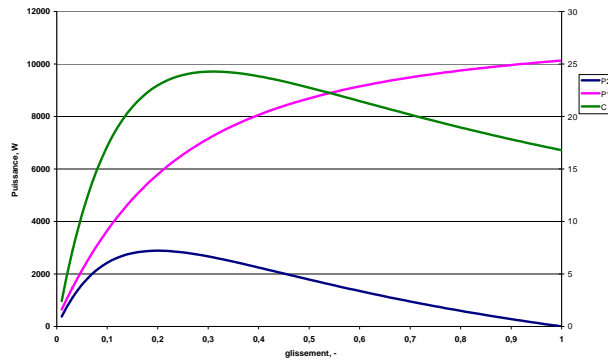
алгебра. За целта се задават редица дискретни стойности на хлъзгането с достатъчно малка стъпка, при което трябва да са известни нелинейните зависимости на някои съпротивления от хлъзгането – напр. $R_2', X_1, X_2', X_m = f(s)$. Параметрите на празен ход се получават при стойност на хлъзгането, при която полезната мощност $P_2 = 0$, номиналните параметри са при хлъзгането, при което $P_2 = P_n$, а пусковите - при $s = 1$.

Решава се (в Excel) основното уравнение за равновесие на напреженията в комплексна форма, базирано на T-образната заместваща схема на двигателя

$$\dot{U}_1 = Z_1 I_1 - E_1 = Z_1 I_1 + Z_{eq} I_1'; \quad -E_1 = Z_m I_m = Z_{eq} I_2'; \quad Z_{eq} = \frac{Z_m Z_r'}{Z_m + Z_r'} \quad (12)$$



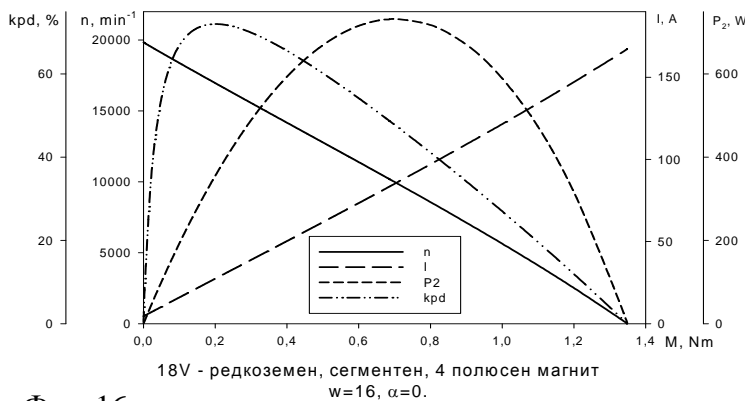
Фиг. 14



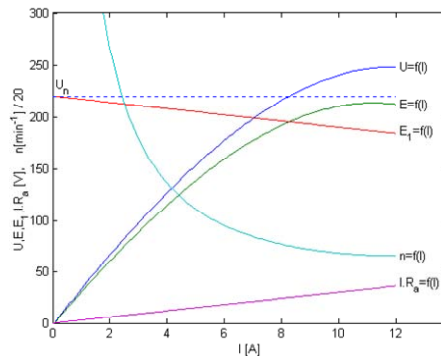
Фиг. 15

3.9. Изчисляване на характеристиките на постоянноотокъв двигател с възбуждане от постоянни магнити (нелинеен модел) – фиг. 16

В случая водеща величина е котвеният ток I , на който се задават редица дискретни стойности от I_{min} до I_{max} . За всяка зададена стойност на тока се определят съответните стойности на резултантния магнитен поток Φ_δ с отчитане на размагнитващото действие на реакцията на котвата. Определят се стойностите на е.д.н. в котвената намотка, скоростта на въртене на ротора, електромагнитният момент, моментът на вала, мощността и к.п.д., откъдето се построяват работните и механичните характеристики на двигателя. Параметрите на празен ход се получават при стойност на тока, при която полезната мощност $P_2 = 0$, номиналните параметри са при ток, при който $P_2 = P_n$, а пусковите – при скорост на ротора $n = 0$.



Фиг. 16



Фиг. 17

3.10. Замяна на графичните построения на характеристиките на постоянноотокъви двигатели с аналитично изчисление. Аналитично получаване на скоростната характеристика на двигател с последователно възбуждане - фиг. 17

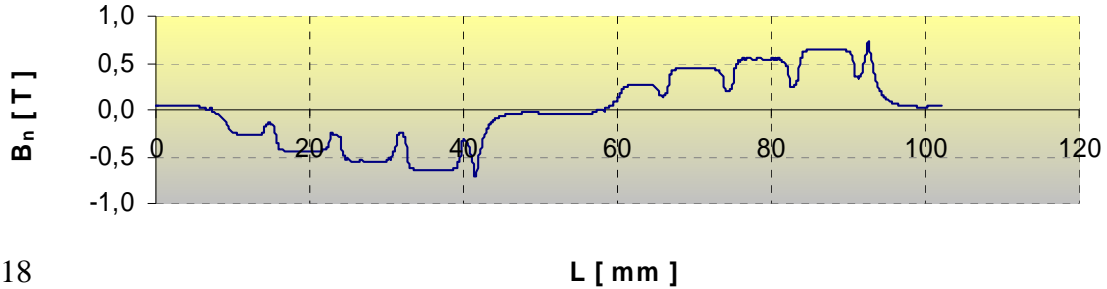
Построението се извършва като се използват вътрешната характеристиката $E = f(I)$ и зависимостта $E_1 = f(I)$ при $U = U_n$. Втората характеристика се получава като от номиналното напрежение за различни токове I се извадят съответните падове на напрежение съгласно основното уравнение за равновесие на напреженията

$$E_1(I) = U_n - I(R_a + R_f + 2R_c) \quad (14)$$

Оттук за поредица от стойности на тока I през определена стъпка се изчислява съответната поредица стойности за скоростта на ротора n . Тогава така полученото множество точки $\{I_i, n_i\}$ представлява скоростната характеристика на двигателя.

3.11. Определяне на ъгъла на физическата неутрална линия при изместване на четките на колекторни машини - фиг. 18

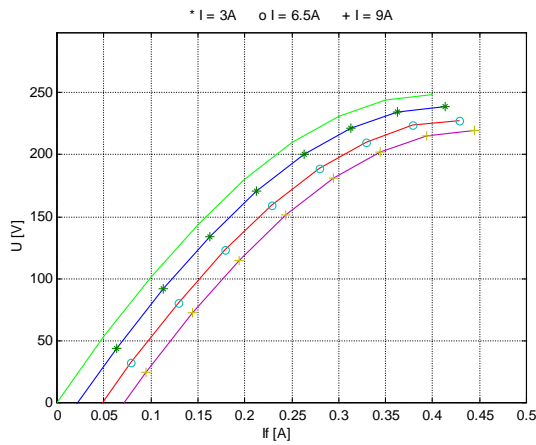
С използване на програмния продукт FEMM се определя формата и разпределението на магнитната индукция в магнитната система на машината. Мястото на физическата неутрална линия е там, където стойността на нормалната компонента на магнитната индукция във въздушната междина при натоварване е равна на нула.



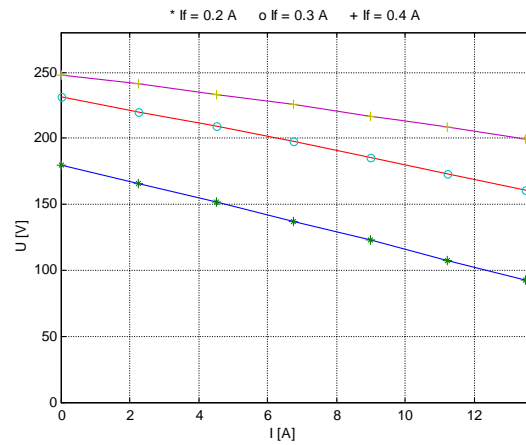
Фиг. 18

3.12. Замяна на графичните построения на характеристиките на постояннотокови генератори с аналитично изчисление. Аналитично получаване на външната, товарната и регулационната характеристики на генератор с независимо и с паралелно възбуждане - (фиг. 19 ÷ 22)

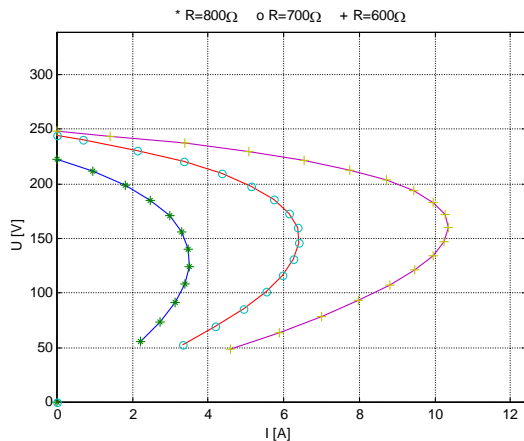
Необходимото в случая “плъзгане” на триъгълника на късо съединение (т.к.с.) при различните построения се свежда до изчисляване на координатите на върха му C за различните положения на върха A при съответните стойности на котвения ток, като същевременно се удовлетвори изискването катетите AB и BC да се запазят успоредни съответно на абсцисата и ординатата. Следователно за всяка точка A_i от х.п.х. с координати (x_{Ai}, y_{Ai}) се изчисляват координатите на съответния връх C_i от съвместното решение на уравнението на окръжност с център точката A_i и радиус r , равен на хипотенузата на т.к.с. AC , и уравнението на правата с ъглов коефициент k , върху която лежи тази хипотенуза.



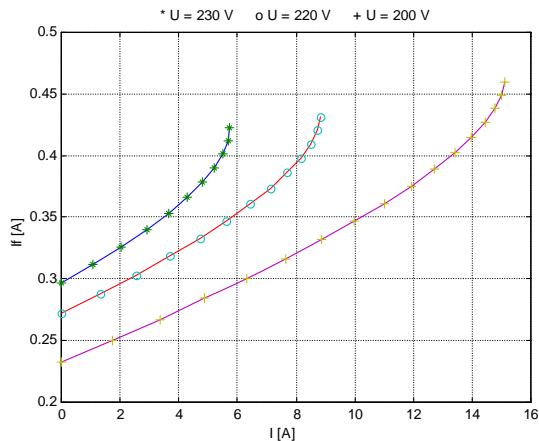
Фиг. 19



Фиг. 20



Фиг. 21



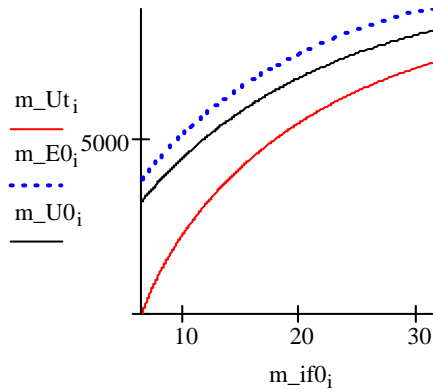
Фиг. 22

3.13. Изчисляване на характеристиките на синхронни машини и замяна на графичното построение на диаграмата на Потие с аналитично изчисление - (фиг. 23 ÷ фиг. 25)

Аналитичното определяне на векторите, участващи в диаграмата на Потие за определяне на резултантното е.д.н. E_{δ} , се свежда до решаване на комплексното уравнение

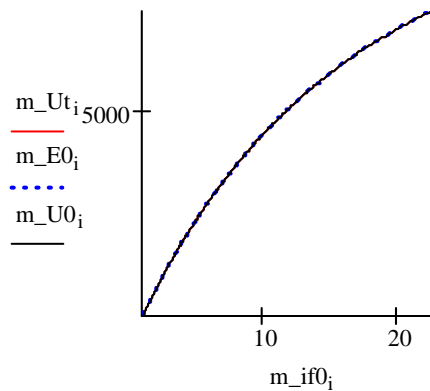
$$\dot{E}_{\delta} = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_{\sigma a}, \quad \varphi_{E_{\delta}} = \arctg \frac{\text{Im}[\dot{E}_{\delta}]}{\text{Re}[\dot{E}_{\delta}]} \quad (15)$$

Фиг. 23

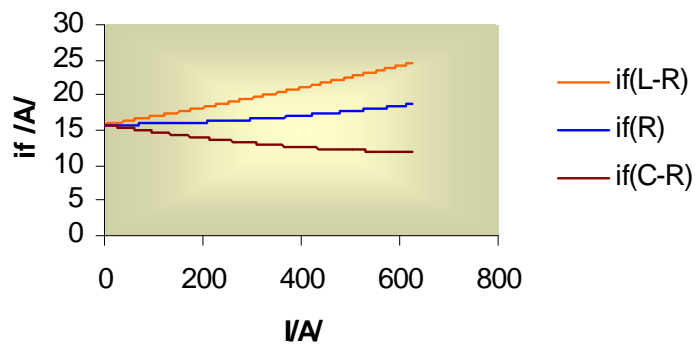


Товарна характеристика
при $I = I_H \cos \varphi = 0,8$ L-R товар

Фиг.26



характеристика
на празен ход



Фиг. 25

Регулировъчни характеристики при реактивен товар
(L-R, C-R) с $\cos \varphi = 0.8$ и при активен товар ($\cos \varphi = 1$)

4. Заключение

С тази концептуална статия авторът се надява да обърне внимание на инженерите и изследователите върху новите реалности и новите тенденции в изследванията и изчисленията на електрическите машини и другите електротехнически устройства и да насочи усилията им към все по-широкото използване на достъпните и мощни софтуерни продукти, които са на разположение на всеки, който има отношение към тези проблеми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандиски, К., И. Ячева. CAD системи в електромагнетизма. С., Сиела, 2002.
2. Ячев, И., И. Маринова. Числени методи и моделиране на вериги и полета. ТУ - София, 2007.
3. Meeker, D. Finite Element Method Magnetics, Ver. 3.3, User's Manual, 2002.
4. SigmaPlot 8.02 Demo, User's Guide, SPSS, Inc. 2003.
5. Matlab - High performance numeric computation and visualization software - reference guide, The Mathworks, 1992.
6. MicroSim Pspice & Basic User's Guide, v. 8.0, microsim Corporation, 1997.
7. Mathcad 2001 - Trial version, Mathsoft Engineering & Education, 2001,
8. Microsoft Office Excel, 2003.
9. Божилов, Г., А. Иванов. Нелинейна заместваща схема на еднофазен колекторен двигател, съчетана с метода на крайните елементи, Е+Е, No 7-8, 2004.
10. Божилов, Г., М. Михов, В. Стипцов. Замяна на графичното построение на характеристиките на постояннотокови двигатели с аналитично изчисление, Год. на ТУ - София, т. 52/2003.
11. Божилов, Г., М. Михов, А. Иванов. Нелинеен математичен модел на електромеханичните преходни процеси в еднофазен колекторен двигател, базиран на метода на крайните елементи, Год. на ТУ - София, т. 52/2003.
12. Божилов, Г., Е. Рац, М. Михов. Симулационен модел на еднофазен колекторен двигател с отчитане на нелинейната магнитна характеристика на магнитопровода, Год. на ТУ - Варна, 2004.
13. Mihov, M, G. Vojilov. Replacement of the standard graphic concept of synchronous machine Potier's diagram, 11th Int. conf. of el. mach. ELMA 2005, Sofia, vol. 2.
14. Божилов, Г., А. Иванов. Към определянето на ефективната стойност на тока на еднофазните колекторни двигатели с наситена магнитна система, Год. на ТУ - София, т. 59/2009, кн. 1.
15. Божилов, Г., Г. Тодоров. Анализ на ударния намагнитващ ток на трифазен трансформатор при различни схеми на свързване. III научна конф. на ТУ - София, Созопол, 2011.

Благодарности: Авторът изказва благодарност на колегите си проф. д-н Емил Рац, доц. д-р Михо Михов, доц. д-р Георги Тодоров, гл. ас. Адриан Иванов и на дипломантите и студентите за използваните материали от съвместните ни изследвания и публикации.

Автор: Ганчо Й. Божилов, проф. д-н, Технически Университет-София, тел. 02-965-2135; E-mail address: gjboj@tu-sofia.bg

Постъпила на 12.12.2011

Рецензент проф. д-н Е. Николов

ТЕЦ С НУЛЕВИ ЕМИСИИ - СЪВМЕСТИМОСТ НА POSTCOMBUSTION – ТЕХНОЛОГИИТЕ¹ ЗА РЕДУЦИРАНЕ НА ВЪГЛЕРОДНИТЕ ЕМИСИИ ОТ ТЕЦ С ДИРЕКТИВА 1996/61 НА ЕВРОПЕЙСКИЯ СЪЮЗ

Милко Йовчев, Димитър Попов, Петьо Гаджанов, Виктория Попова

Резюме: В статията е направена качествена оценка за съвместимостта на Postcombustion – технологиите за редуциране на въглеродните емисии от ТЕЦ с Директива 1996/61/ЕС относно комплексното предотвратяване и контрол на замърсявания. Това не може да се направи понастоящем количествено, тъй като в България няма изградени въглеродочистващи инсталации в топлоелектрическите електроцентрали.

Ключови думи: контрол на замърсяванията, въглеродните емисии, улавяне на CO₂, енергиен блок, сероочистка, емисионен фактор.

ZERO EMISSION POWER PLANTS – A COMPATIBILITY OF THE POSTCOMBUSTION – TECHNOLOGIES FOR THE REDUCTION OF THE CARBON EMISSIONS FROM THERMAL POWER PLANTS WITH DIRECTIVE 1996/61/EC

Milko Iovchev, Dimitar Popov, Petyo Gadjanov, Victoria Popova

Abstract: An assessment of postcombustion- technologies for the reduction of the carbon emissions from thermal power plants with the Directive 1996/61/EC is done. It cannot be done quantitatively as in Bulgarian thermal power plants the carbon capture installations are not built.

Keywords: pollution control, carbon emission, carbon capture, power unit, flue gas desulphurization, emission factor.

1. Въведение

Както е известно, целта на Директива 1996/61/ЕС е въвеждането на система за комплексно предотвратяване и контрол на замърсяванията (КПКЗ) предизвикани от работата на промишлените и енергийните инсталации на страните-членки [1]. В общия случай прилагането на тази система е възможно, както за вече работещи инсталации, така и за такива чието изграждане е предстоящо. Като се има предвид, че в България не са изградени инсталации за редуциране на въглеродните емисии (от ТЕЦ) би следвало предлаганите за тази цел технологии да

¹ Това са технологиите за улавяне и елиминиране на CO₂ след изгарянето на въглищата в конвенционални (прахово горене, изгаряне в кипящ слой) и в неконвенционални горивни устройства (например изгаряне в циркулиращ кипящ слой).

бъдат обсъдени и класирани на базата на методологията за избор на най-добра налична техника (НДНТ) публикувана в [2]. Това от своя страна означава, че трябва да бъде направен критичен анализ на тези технологии като се потърси разумен баланс между ефекта от въздействието на замърсителите върху околната среда и стойността на инвестициите необходими за ограничаването на този ефект.

За съжаление този критичен анализ не може да бъде направен не само за условията на България, но и в световен мащаб. Това е така защото технологиите за редуциране на въглеродните емисии от ТЕЦ все още са на ниво „демонстрационни проекти”, както личи от проучванията публикувани в [3]. С други думи методологията постулирана в Директива 1996/61/ЕС може да бъде приложена частично в конкретния случай като се оцени само качествено кръстосаното влияние на замърсителите на околната среда.

2. Оценка на съвместимостта на postcombustion-технологиите с Директива 1996/61/ЕС

Целта на настоящата статия е да оцени съвместимостта на т.нар. Postcombustion - технологии за редуциране на въглеродните емисии от ТЕЦ с Директива 1996/61 на Европейския Съюз.

В общия случай оценката на тази съвместимост може да стане като се използва препоръчаната в [2] блок–схема, в която е посочена последователността на стъпките (или етапите), които следва да се изпълнят за да се оцени кръстосаното влияние на замърсителите на околната среда, както и ефекта от тяхното въздействие. Тази блок – схема е показана по-долу на фиг. 1.

Във връзка с използването на тази схема в настоящия случай, а именно за да се оцени съвместимостта на Postcombustion – технологиите за редуциране на въглеродните емисии от ТЕЦ с Директива 1996/61/ЕС е необходимо предлаганите технологии да се съпоставят с **един базов модел на енергийна инсталация**, например енергиен блок, в който се изгарят определен тип въглища и в който не са изградени нито сероочистваща, нито въглеродочистваща инсталация на димните газове. За нашата страна като такъв базов модел може да се използва един от блоковете работещи в ТЕЦ „Марица – Изток 2”, а именно блок 210 MWe. В следващия текст този блок се разглежда като източник на замърсители на околната среда с оглед да се оцени кръстосаното влияние на тези замърсители в съответствие с изискванията формулирани в Директива 1996/61/ЕС.

Енергийните блокове 210 MWe, както е известно, използват като гориво Източномаришки въглища. В процеса на своята работа те отделят в околната среда твърди отпадъци (шлака, летяща пепел) и димни газове съдържащи CO₂, SO₂ (SO₃), NO_x и др. (Фиг. 2). По данни от централата разходът на въглища за един блок 210 MWe е 338 t/h, а отделената шлака и летяща пепел са съответно 9.34 t/h (шлака) и 38.2 t/h (летяща пепел).

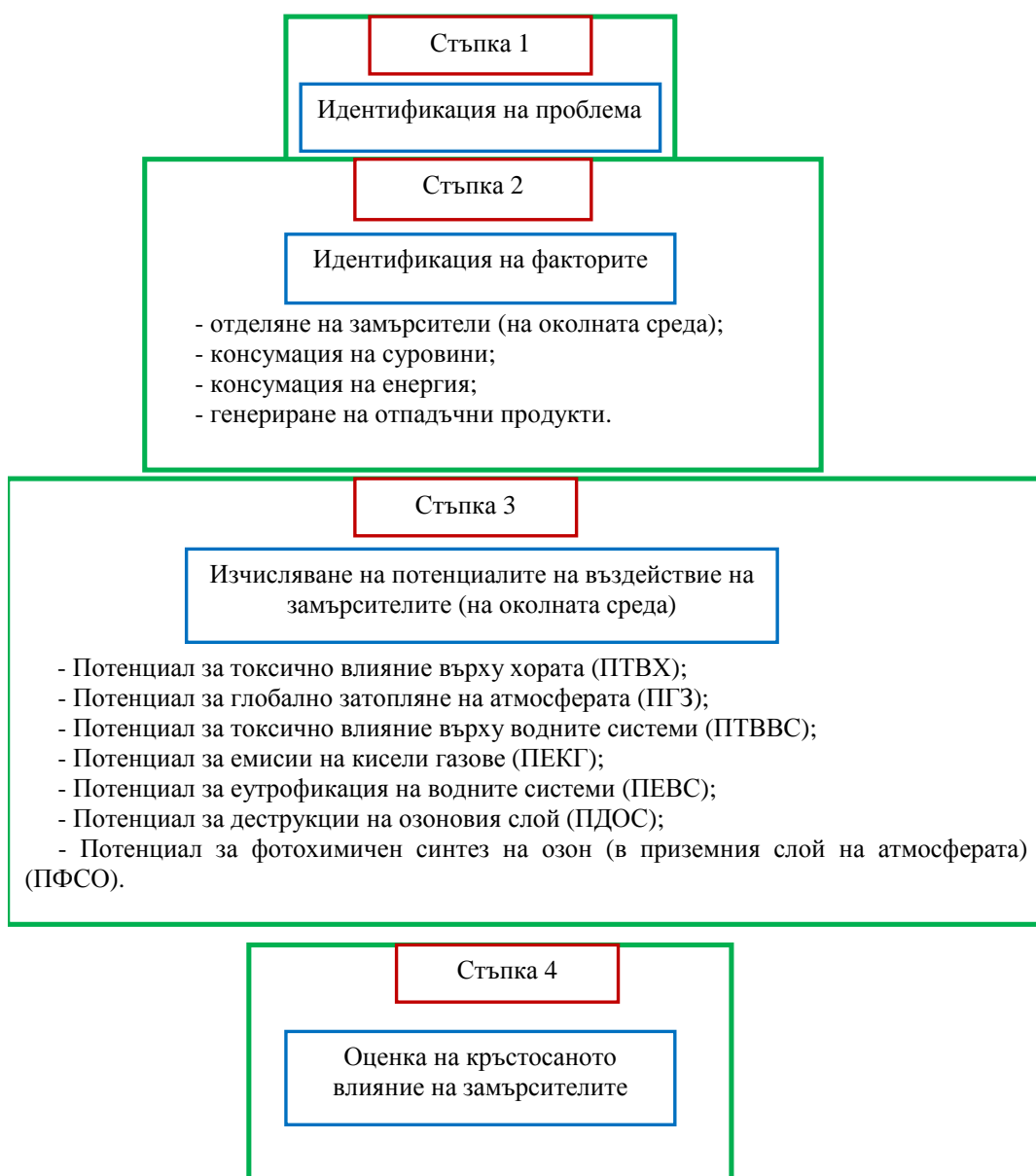
Въглищата, които се изгарят в централата имат долна работна калоричност 6240 kJ/kg и съдържат 14,4% пепел (на работна маса) и 55,1% влага. Елементният им състав (на работна маса) е следният: С = 19,3 %; Н = 1,7 % и S = 2,4 %.

Количеството на отделените емисии от един блок 210 MWe, по данни от централата, е следното:

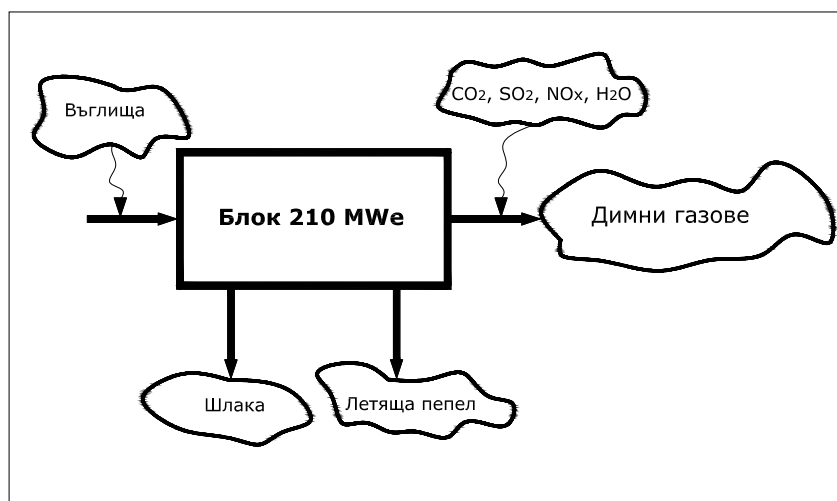
- Количество на димните газове – 1341.3 t/h;
- Количество на CO₂ – 234.4 t/h;
- Количество на SO₂ – 15.74 t/h;
- Количество на NO_x – 0.43 t/h.

От представените данни става ясно, че в съответствие с Директива 1996/61/ЕС емисиите отделяни в околната среда при работа на блокове 210 MWe оказват влияние върху следните елементи определящи екологичната им съвместимост с околната среда (фиг.1):

- глобално затопляне на атмосферата (CO₂);
- отделяне на кисели газове (SO₂, NO_x);
- фотохимичен синтез на озон (NO_x).



Фиг.1. Последователност на стъпките за оценка на влиянието на замърсителите на околната среда в съответствие с Директива 1996/61/ЕС;



Фиг.2 Схема на материалните потоци в блок 210 MWe;

Кръстосаното влияние на тези замърсители може да се оцени, ако се изчислят съответните потенциали на въздействие върху околната среда [4]. Когато обаче се има предвид само един източник на замърсители, е прието да се изчислява т.нар. **емисионен фактор** (emission factor), който представлява средната скорост на отделяне на емисиите на даден замърсител по отношение на дадена специфична дейност (в случая произведена електроенергия g/kWh). Емисионните фактори на блоковете 210 MWe, в които не са изградени сероочистваща и въглеродочистваща инсталации са дадени в табл. 1.

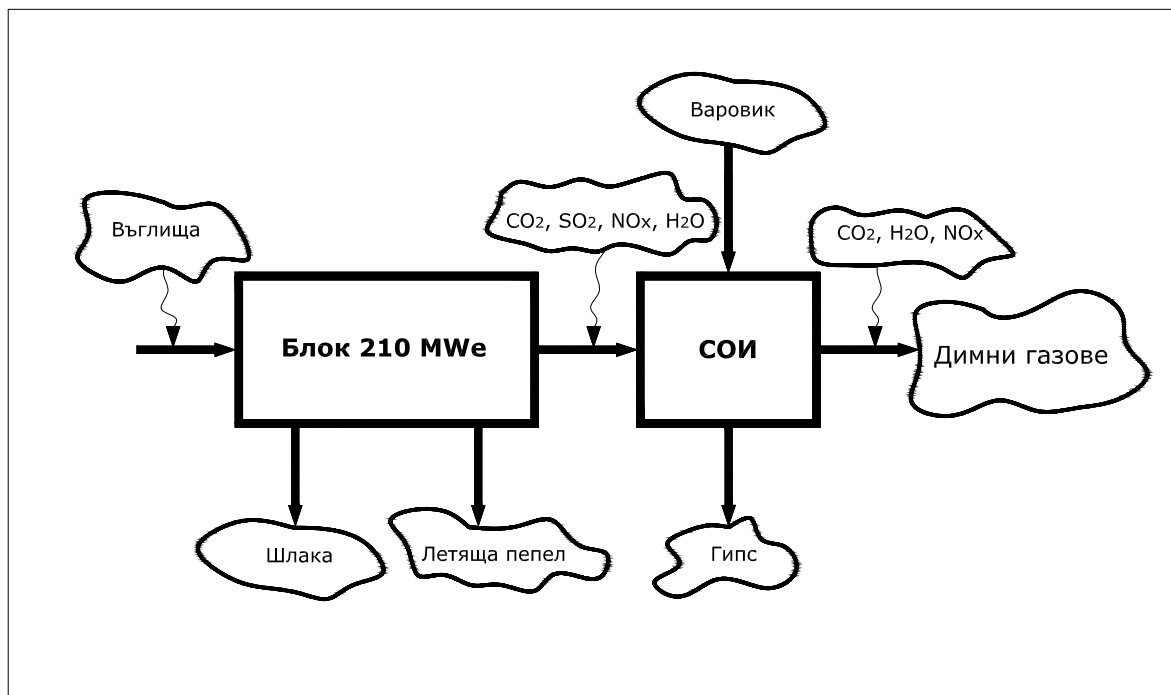
Табл.1. Стойности на емисионните фактори на блокове 210 MWe

№	Емисионни фактори на блок 210 MWe	Дименсия	Стойност
1.	Въглероден диоксид, CO ₂	g/kWh	1116.2
2.	Серен диоксид, SO ₂	g/kWh	75.4
3.	Азотни оксиди, NO _x	g/kWh	2.0
4.	Шлака	g/kWh	44.5
5.	Летяща пепел	g/kWh	182.0

От приведените данни се вижда, че блокове 210 MWe на ТЕЦ „Марица Изток 2” изгарящи Източномаришки въглища имат съществен принос в интегралния процес на увеличаване на потенциала за глобално затопляне на атмосферата (ПГЗ) и на потенциала за емисии на кисели газове (ПЕКГ), докато вероятността за увеличаването на потенциала за фотохимичен синтез на озон (ПФСО) оценена качествено е незначителна (има се предвид ниският емисионен фактор на NO_x). Това именно определя необходимостта от изграждането на сероочистваща и въглеродочистваща инсталации на димните газове с оглед подобряване на съвместимостта на тези блокове с околната среда. В разглеждания случай (ТЕЦ „Марица Изток 2”) това вече е направено по отношение на намаляването на емисионния фактор на SO₂ посредством изграждането на сероочистваща инсталация. За целта към димните газове след електрофилтрите се подава суспензия съдържаща варовик (CaCO₃), при което SO₂ се улавя под форма на гипс

(CaSO₄·2H₂O) (фиг. 3). Това изменя количеството на отделените емисии след сероочистващата инсталация на блока, както следва:

- количество на димните газове - 1425.3 t/h;
- количество на CO₂ - 244.4 t/h;
- количество на SO₂ - 0,8 t/h;
- количество на NO_x - 0.43 t/h;
- добив на гипс - 79.5 t/h.



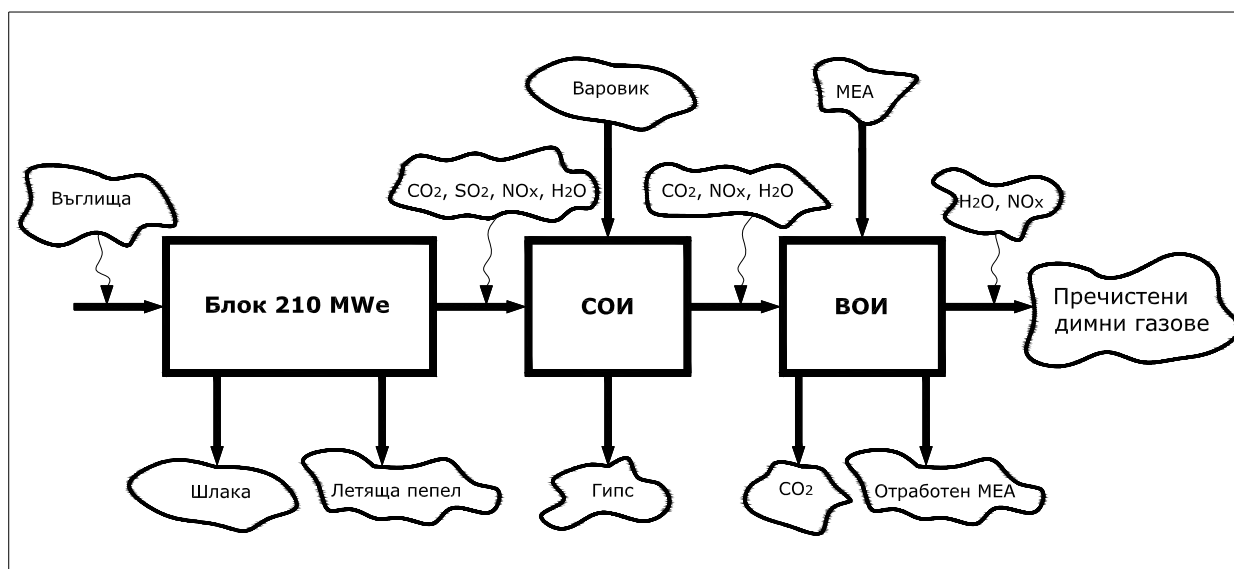
Фиг.3 Схема на материалните потоци в блок 210 MWe при работеща сероочистваща инсталация (СОИ).

Това изменя и емисионните фактори на блока, чийто стойности са приведени по долу в табл.2. Там се вижда, че емисионните фактори на блокове 210 MWe след включването в експлоатация на сероочистващата инсталация се изменят значително, а именно емисионният фактор на SO₂ се намалява, докато този на CO₂ се увеличава; увеличава се и емисията на твърди отпадъци (гипс). Това е така защото за функционирането на СОИ се изразходват 24.58 t/h варовик, който от своя страна увеличава въглеродните емисии на блока (с 10 t/h).

Табл.2. Стойности на емисионните фактори на блокове 210 MWe с работеща сероочистваща инсталация

№	Емисионни фактори на блок 210 MWe след СОИ	Дименсия	Стойност
1.	Въглероден диоксид, CO ₂	g/kWh	1164.0
2.	Серен диоксид, SO ₂	g/kWh	3.81
3.	Азотни оксиди, NO _x	g/kWh	2.0
4.	Шлака	g/kWh	44.5
5.	Летяща пепел	g/kWh	1182.0
6.	Гипс	g/kWh	378.6

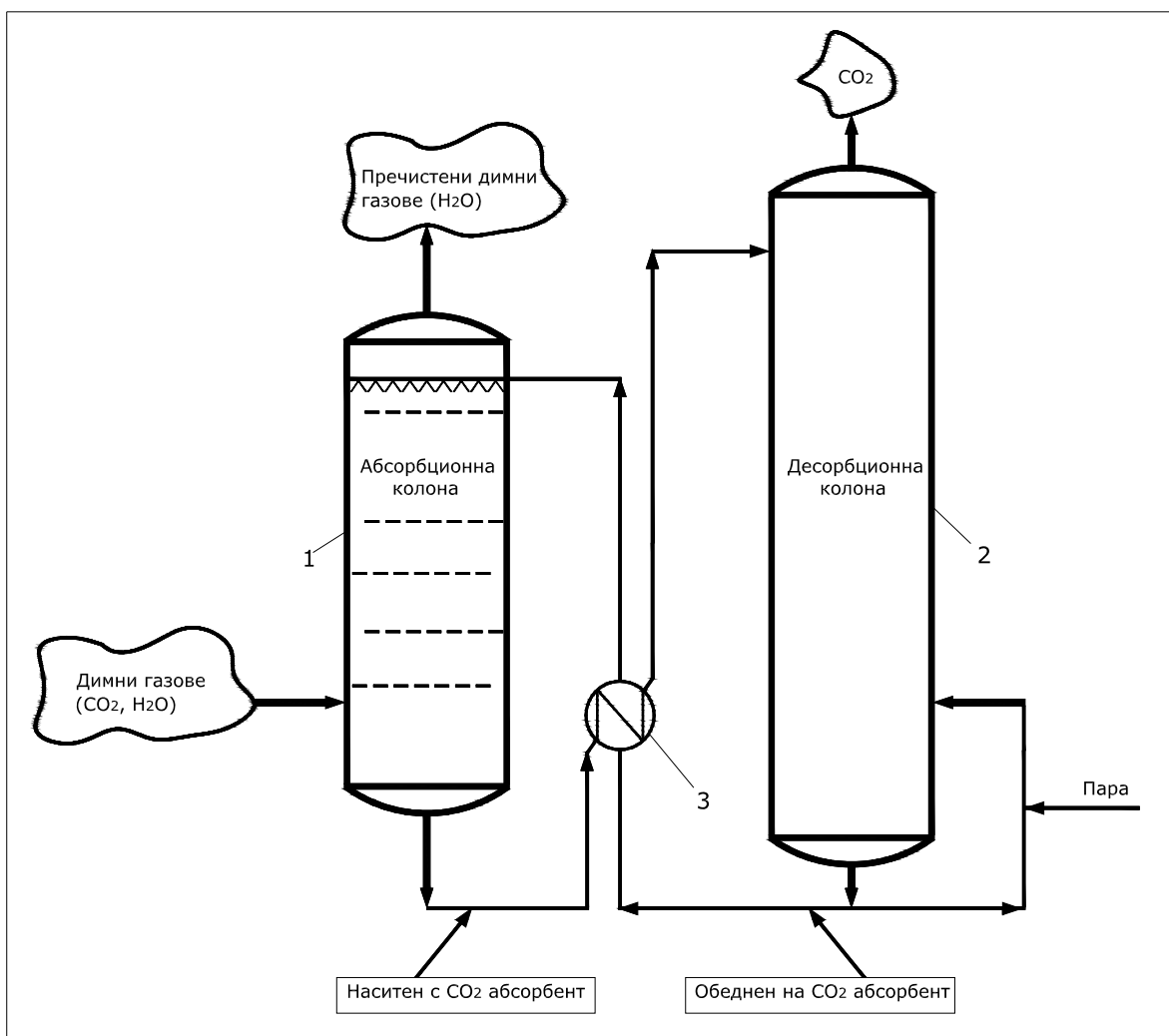
От табл.2 също така става ясно, че за да се приведат блоковете 210 MWe в ТЕЦ „Марица Изток 2” в съответствие с изискванията на Директива 1996/61/ЕС и по-специално - да се намали приноса на тази централа към потенциала за глобално затопляне на атмосферата (ПГЗ) е необходимо да бъде изградена и въглеродо-чистваща инсталация на димните газове (ВОИ). Тази инсталация следва да бъде монтирана след сероочистващата инсталация така както е показано на фиг. 4. Всъщност структурната схема на тази фигура е единствено възможната техно-логична схема в конкретния случай, а именно когато отделеният при изгарянето на въглищата CO_2 трябва да се отстрани при вече работеща горивна инсталация от този тип.



Фиг.4 Схема на материалните потоци в блок 210 MWe при работеща сероочистваща инсталация (СОИ) и проект на въглеродоочистваща инсталация (ВОИ) работеща с абсорбента мочеетаноламин.

За целта димните газове се пречистват във въглеродоочистваща инсталация работеща на принципа „абсорбция – десорбция”, чийто начин на действие може да се проследи от фиг.5. Както личи от фигурата димните газове след СОИ постъпват в абсорбционната колона 1 (или абсорбционен блок състоящ се от няколко колони), където в противоток се подава обеднен на CO_2 абсорбент. В резултат на протичането на абсорбционния процес димните газове се пречистват от CO_2 и напускат абсорбционната колона 1 през горния ѝ край, а наситеният с CO_2 абсорбент се отделя от долния ѝ край. Регенерацията на абсорбента се извършва в десорбционната колона 2 (или десорбционен блок състоящ се от няколко колони) с помощта на пара с определени параметри. Отделеният при десорбционния процес CO_2 се отделя от горния край на десорбционната колона 2, а абсорбентът обеднен на CO_2 се връща отново в абсорбционната колона 1 след като предварително се охлажда в топлообменника 3 за сметка на наситения с CO_2 абсорбент. За да се осигури правилното функциониране на въглеродоочистващата инсталация към циркулиращия разтвор на абсорбента непрекъснато се добавя чист реагент съпроводено от извеждане на част от работната течност. По този начин

работят всички инсталации за пречистване на димните газове от CO_2 като предлаганите на световния пазар фирмени варианти се различават главно по вида на използвания течен абсорбент или по избраната концентрация на този абсорбент в абсорбционния разтвор.



Фиг.5 Структурна схема на въглеродоочистваща инсталация работеща на принципа „абсорбция/десорция”.

Така например фирма „Fluor Daniels” предлага разработена фирмена технология с наименованието „Econamine FGSM”, при която като абсорбент се използва 30 %-ен разтвор на моноетаноламин (MEA) [5], фирма „Mitsubishi Heavy Industries” предлага разработена фирмена технология, в която като абсорбент се използват т.нар. стерично запречнени амини (търговска марка KS [6] и др. Общ недостатък на всички инсталации от този тип т.е. тези, които работят на принципа на „абсорбция/десорция” са: високият разход на пара използвана в десорбционната колона, високият разход на енергия за транспортиране на абсорбента, окисляването на абсорбента и неговата деградация с времето и т.н. В случая обаче тези негативни процеси не би следвало да се вземат под внимание, тъй като от гледна точка на съвместимостта на въглеродоочистващата инсталация с директива 1996/61/ЕС е важен нейния пречистващ ефект спрямо CO_2 . Тогава, ако като пример се разглежда евентуалното прилагане на технологията „Econamine

FGSM, (фирма „Fluor Daniels”) то по литературни данни [5] степанта на почистване на димните газове от CO₂ се движи в границите 85÷95 % в зависимост от вида на използваното гориво в горивната инсталация и на технологията прилагана за отделяне на SO₂ в сероочистващата инсталация. Тогава за блоковете 210 MWe на ТЕЦ „Марица Изток 2” може да се приеме, на базата на експертна оценка, че степента на почистване на димните газове от CO₂ се очаква да бъде 90 %. Това изменя съществено количеството на отделните емисии след въглеродочистващата инсталация на блока, както следва:

- количество на димните газове - 952.0 t/h;
- количество на CO₂ - 24.45 t/h;
- количество на SO₂ - 0 t/h;
- количество на NO_x - 0 t/h;
- количество отработен MEA - 0.15 t/h.

Това изменя и емисионните фактори на блока, чийто стойности са приведени в табл.3.

Табл.3. Емисионните фактори на блок 210 MWe след включване на въглеродочистваща инсталация

№	Емисионни фактори на блок 210 MWe след ВОИ	Дименсия	Стойност
1.	Въглероден диоксид, CO ₂	g/kWh	116.4
2.	Серен диоксид, SO ₂	g/kWh	0
3.	Азотни оксиди, NO _x	g/kWh	0
4.	Шлака	g/kWh	44.5
5.	Летяща пепел	g/kWh	182.0
6.	Гипс	g/kWh	378.6
7.	Отработен разтвор на MEA	g/kWh	0.71

От представените в табл.3 данни се вижда, че ако към блоковете 210 MWe, в които вече има работещи сероочистващи инсталации се изгради и въглеродочистваща инсталация то тези блокове ще отговарят напълно на изискванията на Директива 1996/61/ЕС. Тази оценка обаче е качествена и се отнася за една централа, в която избраната технология за почистване на димните газове от SO₂ предопределя и избора на технологията за почистване на тези газове от CO₂. Това е така защото, изборът на най-добрата налична техника (best available technique) в съответствие с Директива 1996/61/ЕС може да се направи количествено за въглеродочистващата инсталация само при условие, че има разработени няколко технико-икономически варианти и при условие, че има регламентирани държавни норми за допустими емисии (НДЕ) на въглероден диоксид в България. От тук следва, че съвместимостта на технологиите за редуциране на въглеродните емисии от ТЕЦ с изискванията на Директива 1996/61/ЕС може да се оцени само в случаите когато се разглежда проекта на една бъдеща нова централа. Само тогава е възможно да се сравнят различните варианти на т.нар. Postcombustion – технологии от гледна точка на избора на т.нар. най-добра налична техника

(НДНТ), което за България е въпрос на далечно бъдеще. Реалното обаче е изискванията на Директива 1996/61/ЕС да започнат да се прилагат и за вече работещите електроцентрали у нас като тези изисквания се отнасят, както за сероочистващите, така и за въглеродочистващите инсталации. Което, както става ясно от проучванията направени в настоящата статия, е напълно възможно.

3. Заключение

Въз основа на направените проучвания може да се прецени, че т.нар. Postcombustion – технологии за редуциране на въглеродните емисии от ТЕЦ са съвместими с изискванията на Директива 1996/61/ЕС за комплексно предотвратяване и контрол на замърсяването (КПКЗ). Тази оценка е направена качествено, тъй като в България не са изградени въглеродочистващи инсталации в ТЕЦ. Тя може да се направи количествено само тогава когато е възможно да се сравнят технико-икономическите показатели на няколко въглеродочистващи технологии и се избере този от тях, който отговаря на изискванията на Директива 1996/61/ЕС за най-добра налична техника (НДНТ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Directive 1996/96/EC for Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission, 1996
2. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Economics and Cross – Media Effects, European IPCC Bureau, Institute for Prospective Technological Studies, July, 2006
3. Carbon Capture and Storage, Assessing the Economics, Report of Mack Kinsey & Company, 2008
4. М. Йовчев, Д. Попов, П. Гаджанов, Н. Грозев, ТЕЦ с нулеви емисии – съвместимост на технологиите за редуциране на въглеродните емисии от ТЕЦ с Директива 1996/61/ЕС, Архив на НИС при ТУ
5. S. Reddy et al. Fluor's Econamine FG PlusSM Technology – An Enhanced Amine – Based CO₂ Capture Process, Second Conference on Carbon Sequestration, NETL/Department of Energy, Alexandria, VA, May, 5-8, 2003
6. Herzog H. Et al. Advanced Post-Combustion CO₂ Capture, Prepared for the Clean Air Task under a grant from the Doris Duke Foundation, April, 2009

Настоящата статия е представена във връзка с изпълнението на научно-изследователски проект на тема „Анализ и синтез на технологии за редуциране на въглеродните емисии от българските ТЕЦ изгарящи местни високосернисти въглища” финансиран от Фонд „Научни изследвания” на Министерството на образованието, младежта и науката.

Автори: Милко Петров Йовчев, проф. д-р инж.; Димитър Ангелов Попов, доц. д-р инж.; Петьо Георгиев Гаджанов, доц. д-р инж.; Виктория Димитрова Попова маг.-инж., Катедра «Топло и ядрена енергетика», E-mail address: dpopov@tu-sofia.bg

Постъпила на 20.12.2010

Рецензент доц. д-р инж. Никола Станков

ФУНКЦИОНАЛНИ ИЗИСКВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ НА КОМУНИКАЦИОНЕН МОДУЛ В GPS СИСТЕМА

Йордан Марков, Даниела Минковска

Резюме: Статията представя процеса на определяне на функционалните изисквания при проектиране на комуникационен модул в GPS система на служба за пътна помощ. Описани са структурата на GPS системата с нейните основни елементи и са конкретизирани апаратните и програмни функционални изисквания, които трябва да се вземат в предвид при проектирането на комуникационен модул. Правят се заключения за приложението и адаптацията на функционалните елементите и за бъдеща реализация на комуникационния модул.

Ключови думи - GPS, комуникационен модул, пътна помощ, виртуализация, HA клъстер.

FUNCTIONAL REQUIREMENTS FOR DESIGN OF COMMUNICATION MODULE IN A GPS SYSTEM

Jordan Markov, Daniela Minkovska

Abstract: The article presents the process of defining functional requirements for the design of communication module in GPS system for roadside assistance service. In the article are described the structure of the GPS system and its main elements and are specified hardware and software functional requirements that must be taken into account when designing the communication module. Conclusions are made on the application and adaptation of the functional elements for future implementation of the communication module.

Keywords - GPS, communication module, roadside assistance, virtualization, HA cluster.

1. Introduction

In today's rapidly evolving technologies in all forms and phases of the industry, the management and control of the tow vehicles is essential. The establishment of quality management systems and controls on the vehicles that are actually applied in practice is a key element of the constantly developing sector of computerization in the transport industry. This process cannot be effective without the intervention of software and hardware products - GPS and GPRS systems and software solutions for fleet management of roadside assistance. These systems optimize routes, increase performance in customer service and reduce fuel costs, thereby increasing the efficiency of

the service as a whole. Successful development and deployment of such systems requires knowledge and expertise in different fields: programming and information technologies, computer architecture and communication technologies. Big part of the science research and development in that field is directed towards new strategies for communication with the vehicle onboard computers.

2. Structure of a GPS system for management of roadside assistance

The roadside assistance service has a centralized dispatcher department, in which all incoming calls from clients are processed and specialized vehicles for roadside assistance, spread at key places on the territory of Bulgaria. Based on the information received from the customer location and the type of damage to the car decision are made to send the most appropriate tow vehicle. The goal is customer service for a reasonable time, while the resources of the tow vehicle are used optimally. To achieve these objectives it is necessary for the dispatcher center to continuously receive information about the current location of the tow vehicles, which ones are free to execute client requests and the status of currently executing queries. Communication between control center and onboard computers in the tow vehicles is done via the communication module (Fig.1).

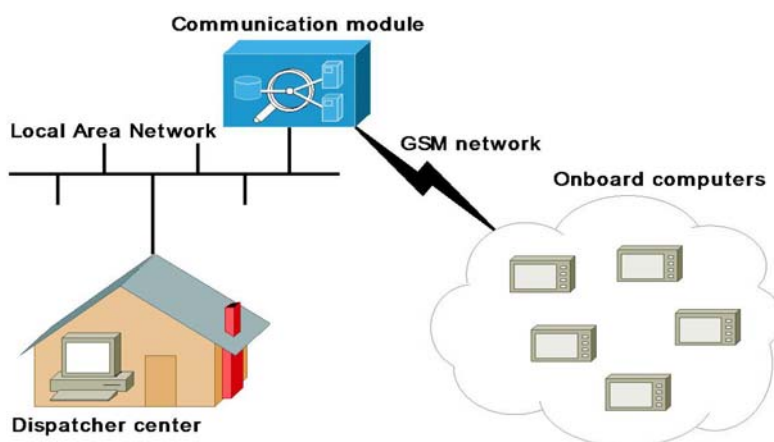


Fig. 1 Aggregate structure of the system for management and control

GPS system for control of roadside assistance services is designed to automate and optimize the transportation of damaged vehicles to customers of roadside assistances. It is a combination of different software and hardware modules that allow monitoring of the status and geographic location of the special tow vehicles in real time, direct communication with the driver, managing the whole process of execution of client requests and display of various reports.

The main elements of the GPS system are:

- *Dispatcher Center* - the place where the supervision, control and monitoring of the movement of tow vehicles is done, and the client requests are received and processed. Part of it is the call center, through which the communication with the tow service clients is done (Fig.2).

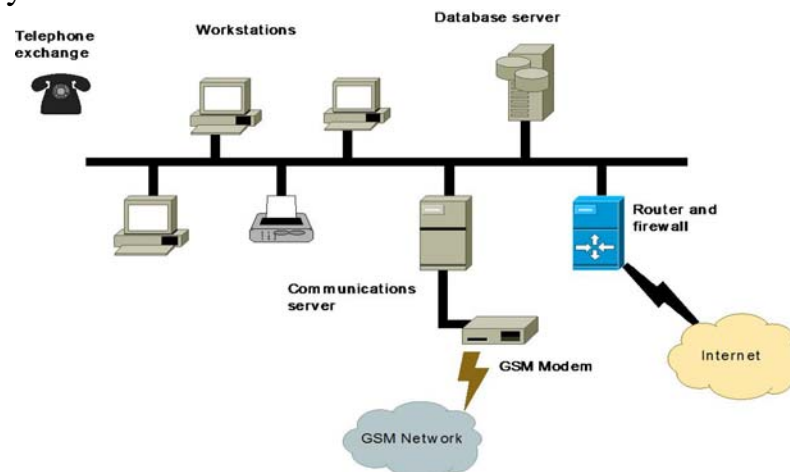


Fig. 2 Structure of dispatcher center and communications equipment

- *Communications software and hardware* - communication equipment is the link between the dispatcher center and onboard computers and performs centralized processing of incoming data. It can be installed as part of the dispatcher center or as a standalone module.

The main components of the communication equipment are:

- *Database Management System (DBMS)* - it uses the relational model for databases with client-server architecture and can be installed on a separate server or on the communication module server. It stores all necessary information to operate the system. It processes the data necessary to display reports on screen of the dispatcher application. The DBMS must have features to protect data from unauthorized access, backup the data and allow easy administration, replication of information to another server and transfer of execution on it without noticeable interruption from the viewpoint of the user. It is important to ensure operation of the system in the event of hardware failure to some degree, according to the requirements of the user and the capabilities of the used hardware;

- *GSM modem* - used for communication between the communication module and the onboard computers using SMS messages and verbal communication with the driver;

- *Communication module* - it is installed on a dedicated server that has direct Internet connection, LAN connection and GSM modem. The communication module handles and submits to the DBMS the messages coming from the onboard computers via SMS messages and GPRS packets. At the same time it maintains continuous connection with the dispatcher application using TCP/IP protocol. Thus it carries two-way communication between the dispatcher application and the peripheral equipment through the GSM network (using SMS messaging), via the Internet (using a GPRS Protocol) and the through verbal connection between the drivers and the dispatcher;

- *Router and firewall* - provides the connection to the Internet and protection from unauthorized access. The communication module must have an Internet connection to be able to communicate with the onboard computers using GPRS protocol. It also allows for remote administration, monitoring and software maintenance of the servers and the user workstations;

- *Onboard computers* - they are installed in the tow vehicle. Through these leaders take orders and receive brief information about the address of the damaged car and the car's current location on a map (Figure 3);

Each onboard computer has three modules:

- *GPS/GSM/GPRS module UI* - specialized device for GPS positioning with integrated capability of transfer data over the GSM network;

- *PDA with Windows Mobile operating system* - small general purpose pocket computer, on which specialized software for navigation and processing of client requests. It implements the interface between the driver and the system;

- *Microphone and loudspeakers* - used for verbal communication between the driver and the dispatcher;

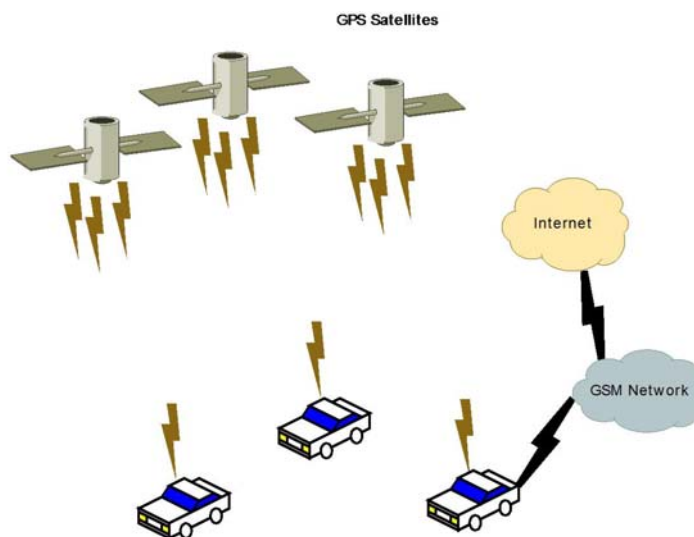


Fig. 3 Vehicles with onboard computers

Because in today's fast developing technologically world the requirements for data transmission and processing are constantly rising the functionality of the communication module have to continuously be improved, depending on the current hardware and software solutions on the market.

3. Functional requirements for the design of the communication module

The communication module is responsible for transmission and processing of the data, received from onboard computers and for processing the actions of the dispatchers in the system. The main requirement is that this module has to operate continuously. This requires the use of specialized hardware and software designed to work with the least possible disruption in the service, even in the case of hardware failure.

3.1. Hardware requirements

The requirement for continuous operation of the system requires the use of HA (High Availability) hardware. The main feature of the HA hardware is the lack of single point of failure, or SPOF. SPOF may be any device or software which will stop all work in the event of failure. Common example of this is a single firewall that controls the access to the Internet (Figure 4). Commonly used high available hardware is the HA cluster (Figure 5). The main idea is to have a server with redundant components. The work can be transferred online to another identical component in the case of hardware failure, avoiding the presence of single point of failure [1].

3.2. System software requirements

The system software must be able to manage the used specialized hardware. Therefore there are requirements for:

- *Virtualization* - platform virtualization software may be used to facilitate the maintenance and future development of the system. Platform virtualization is a kind of system software which creates a virtual computer. The virtual computer is a software representation of a computer. In the virtual environment, a single physical com-

puter is running virtualization software, which manages resources so that they can be distributed among multiple virtual computers (Figure 6). Each virtual computer can execute different operating system and software. In case of software failure or security break the situation does not affect other virtual computers [2];

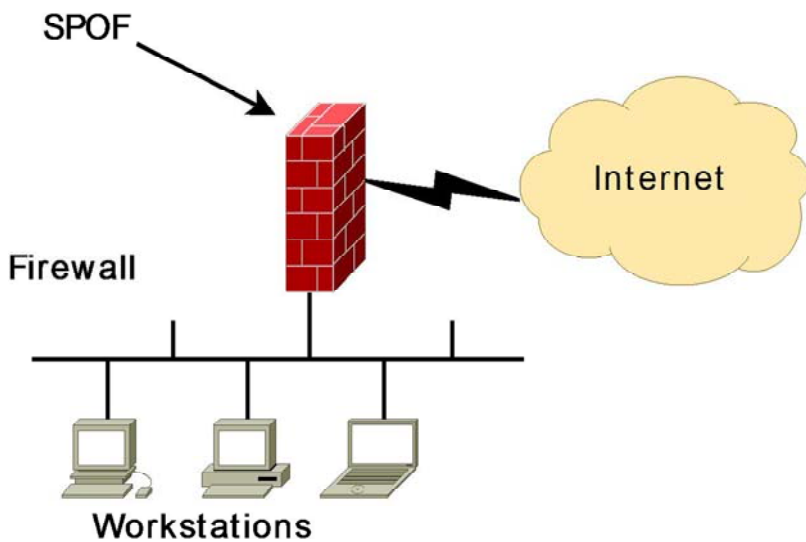


Fig. 4 Single point of failure

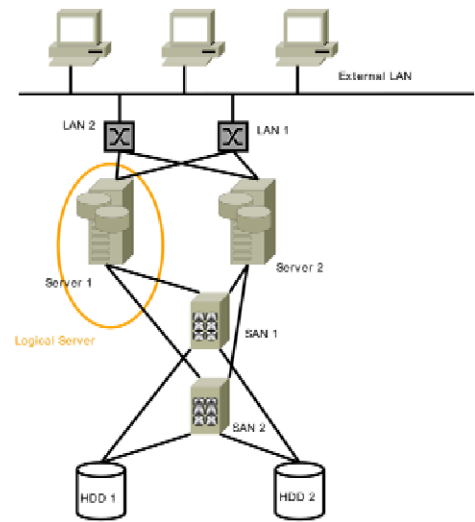


Fig. 5 HA cluster with two nodes

- DBMS** - it must meet the need for storage and management of increasing volumes of information and searching by multiple users simultaneously. The chosen database management system must be able to do load sharing between multiple computers and data replication online. There must be tools for design and management of the databases [3];

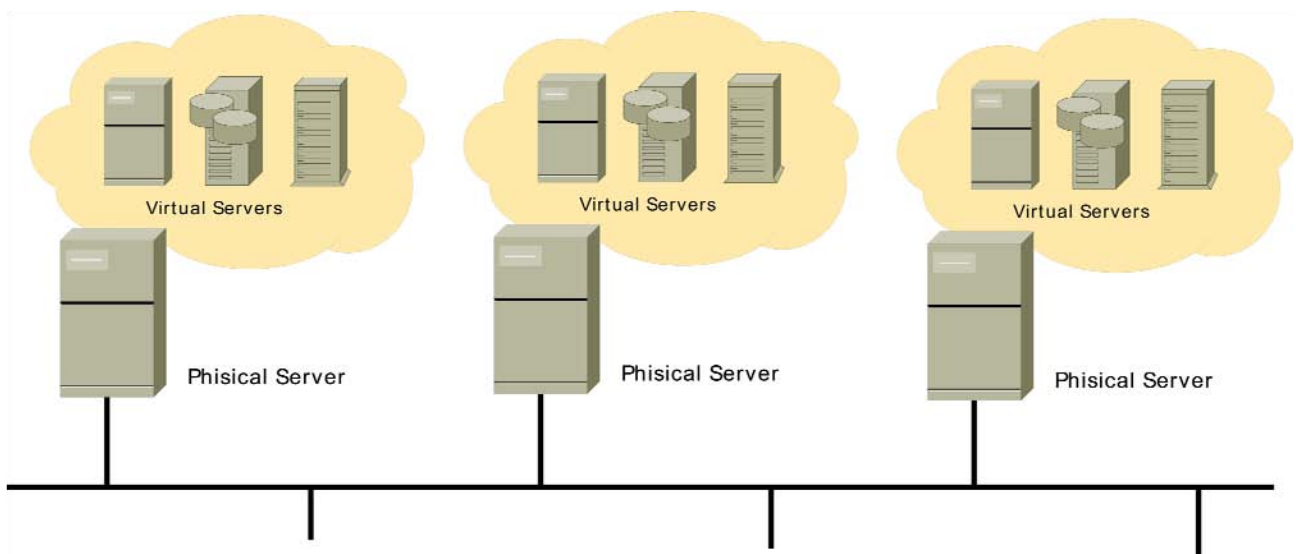


Fig. 6 Virtual server environment

- *Development environment and software framework* - the software environment is an application virtual machine, providing important functions such as security, memory management and exception handling. The development environment supports multiple high level programming languages (C#, VB.NET, C++/CLI, etc.) that are compiled to platform-independent intermediate language [4][5];

- *Operating system* - the choice of operating system (OS) needs to be done both in terms of the chosen (or already available) hardware, the virtualization technology if any and the budget provided by the client. The chosen development environment, software framework and DBMS allow the communications module to run on multiple operating systems, including Windows Server based, most Linux distributions and versions of BSD. The rich options for remote administration and monitoring, and the reduced risk of infection by computer viruses makes UNIX-based operating systems preferred;

3.3. Application software requirements

To allow the software of the communication module of the tow vehicle management system to take advantage of the selected specialized hardware and system software and to “move” seamlessly from one computer to another, it is necessary to keep the current state in non-volatile memory, i.e. the DBMS or the disk subsystem. The main functions of the software are as follows:

- *Management of the digital connection between the dispatcher center and onboard computers* - the communication module and onboard computers contain a set of predefined short messages that can be quickly exchanged. In addition to these message the communication module can send a variety of settings to onboard computers;

- *Management of the verbal communication between driver and dispatcher* - the dispatchers and the drivers use the GSM network for verbal communication. The connections are managed using an appropriate modem. Upon request from the dispatcher the communication module searches for the phone number of the driver in the DBMS, and if possible makes a connection with him;

- *Processing and storage in DBMS of data about the location and state of the car* - in a fixed time interval the onboard computers send data packets containing their location and current state. The communication module receives the packets, decodes them and stores them in a DBMS for subsequent use to generate various reports required for the operation of roadside assistance service;

- *Processing and storage in DBMS of requests for repatriation of damaged cars and the data on the status of their execution, received from onboard computers* - when request for repatriation of customer car is received in the dispatcher center the dispatcher enters the necessary data in the dispatcher's application and send them to the communication module. Data is stored in DBMS. From this moment the communication module monitors the status of the request and sends information for the

execution to the dispatcher application until it is completed or terminated by the dispatcher;

- *Processing of run-time errors* - when an error occurs during execution of the software the .NET platform generates an exception. Everywhere in the code where it is possible to happen, exceptions are catches and processed in an appropriate manner;

- *Maintenance of log with all events and errors occurred, or part of them thereof at the discretion of the administrator of the system* - any exceptions, as well as significant events and information about the program execution is recorded in the log file;

- *Monitoring of the performance of the communication module and promptly notifying the administrator of the system for possible problems* - the software of the communication module includes a separate application that monitors for unusual entries in the log file, lack of regularity of the received packets from the onboard computer, network load, CPU utilization, memory usage, available disk space and others.

4. Conclusions

To ensure effective communication between roadside assistance service and its customers, quick reaction to every customer call, twenty-four hour customer service throughout the territory of Bulgaria and effective control of the drivers for quality service, specific hardware, system and application software is needed.

The described components allow meeting the continuously growing demands on the management and control of the tow vehicle, allowing easy expansion of functionality, increase in the volume of processed and stored data, increase of the number of system users, easy data and configuration backup and self-recovery in many cases of system malfunction.

As future work are the design of the core components of the communication module software and its specific realization.

5. References

1. F. Piedad, M. W. Hawkins, High Availability: Design, Techniques, and Processes, 2000
2. The Greaves Group, Virtualization in education, 2007
3. C. Y. Date, An Introduction to Database Systems, 1987
4. J. Richter, Garbage Collection: Automatic Memory Management in the Microsoft .NET Framework, 2007
5. ECMA, Standard 335: Common Language Infrastructure (CLI), Partitions I to IV, 2001

About the authors: Assist. Prof. PhD Daniela Veleva Minkovska, Department of Programming and Computer Technologies, Technical University of Sofia, Phone: +359 2 9653317, E-mail address: daniela@tu-sofia.bg ; Jordan Nikolov Markov, Master's student, Faculty of Computer Systems and Control, Technical University of Sofia, Phone: +359 878 931011, E-mail address: jmarkov@gmail.com

Постъпила на 10.11.2011

Рецензент Доц. д-р Петко Стоянов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВАРИАНТИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ВИРТУАЛНИ ЧАСТНИ МРЕЖИ

Георги Найденов

Резюме: Статията представя варианти за проектиране на корпоративни виртуални частни мрежи съобразени с актуални стандарти и добри практики, наложени на телекомуникационния пазар към момента. Акцентирано е върху сравнителен анализ, очертаващ предимствата и недостатъците на различните възможни решения. Работоспособността на предложените решения се оценява чрез симулационен модел изграден чрез GNS3.

Ключови думи: виртуална частна мрежа, тунелиране, комуникационни протоколи IPSec и GRE

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALTERNATIVE VIRTUAL PRIVATE NETWORK IMPLEMENTATIONS

Georgi Naydenov

Abstract: This paper presents an exploration for virtual private networks implementations conformable to topical standards and good practices imposed by the telecommunication market from today. In the work particular attention is paid to a comparative analysis of alternative VPN implementations. The examined implementations functionality is evaluated by GNS3 simulation models.

Keywords: virtual private network, tunnelling, communication protocols IPSec and GRE

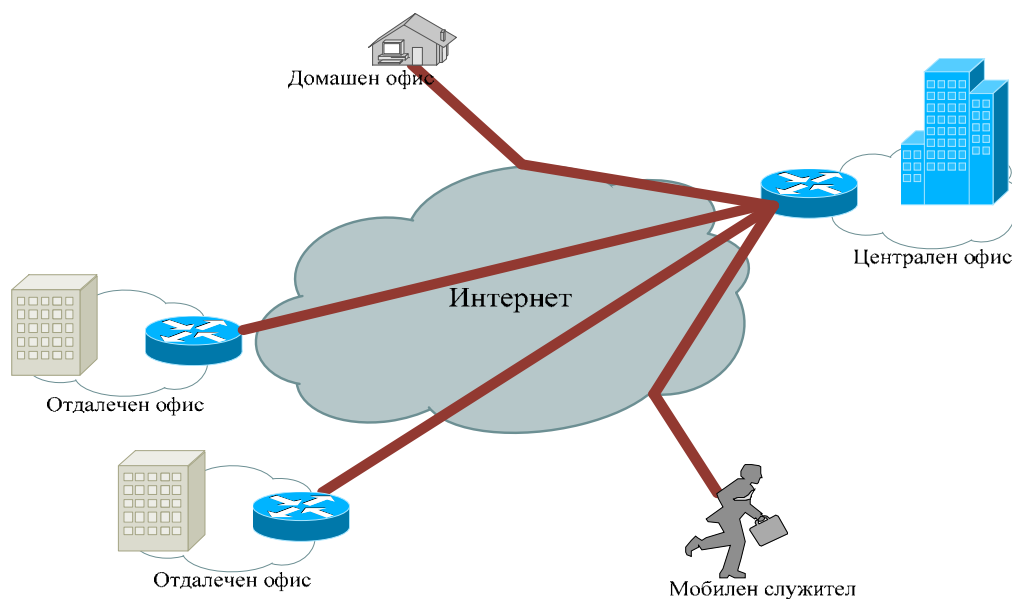
1. Въведение

През последните десетилетия светът на бизнеса се глобализира с бързи темпове. Много компании имат съоръжения и представителства разпръснати на различни места в страната или чужбина, които функционират като едно цяло. Всички те се нуждаят от бързи, сигурни и надеждни комуникации.

До скоро това се реализираше чрез специално наети за целта комуникационни линии, свързващи отделни локални ресурси в цялостна мрежа с широк обхват (Wide Area Network – WAN). Поддръжката на WAN свързаност обаче е доста скъпа и неудобна. Освен това, наетите линии не са приложимо решение за компании, където голяма част от работната сила е мобилна и функционира извън офис пространството.

С нарастването на достъпността на Интернет и развитието на методите за сигурен пренос на данни, виртуалните частни мрежи (Virtual Private Networks – VPN) се превръщат в най-подходящото решение за осъществяване на ефективна свързаност. VPN е комуникационна система, която свързва отдалечени корпоративни ресурси, използвайки като преносна среда общодостъпна публична мрежа. Резултатът е гъвкава, бърза, надеждна и защитена виртуална свързаност между отдалечени компютри, мобилни потребители, офиси и мрежови сегменти. Като краен резултат, VPN технологията предоставя възможност за използване на идентични услуги и вътрешно мрежови ресурси, независимо от отдалечеността на техните потребители.

Типично изпълнение на VPN може да представлява главна локална мрежа (LAN) в корпоративен офис, свързана с локалните мрежи на отдалечени офиси или с индивидуални потребители, които работят отдалечено – фиг.1.



Фиг. 1: Примерна структура на виртуална частна мрежа

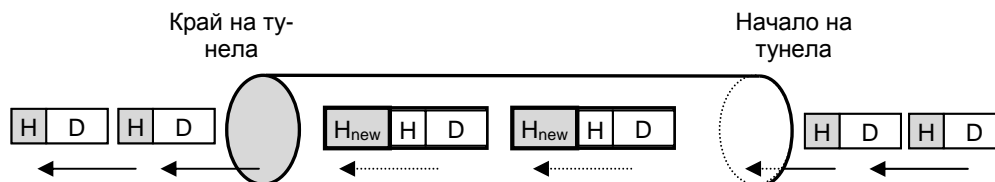
2. Основни функционални аспекти на виртуалните частни мрежи

Съвременните VPN използват глобалната мрежа Интернет като преносна среда за свързване на отделни локални компоненти във виртуална мрежа. Ключова роля при изграждането на тези връзки има сигурността със своите основни аспекти като:

- удостоверяване на системата източник;
- гарантиране на цялостта и последователността на данните в крайния получател;
- осигуряване на поверителност.

Основен метод при реализацията на обмен на данни за една мрежа, чрез използване на инфраструктурата на друга преносна мрежа е тунелирането. Изграждането на логическа връзка между двете крайни точки на преносната мрежа се нарича тунел.

Тунелирането скрива оригиналния пакет във вътрешността на нов пакет, съобразно съответния протокол на преносната мрежа. Процесът се нарича капсулация. Източник и получател на данните в новополучения пакет са съответно началната и крайната точка на тунела. Когато пакетът достигне до зададената крайна точка на тунела, заглавната част на капсулацията се сменя и декапсулираният оригинален пакет може да бъде доставен до крайното местоназначение – фиг.2.



Фиг.2: Тунелиране

Капсулирането само по себе си не предлага сигурност на данните, тъй като оригиналният пакет е видим за всички междинни възли в преносната мрежа. Криптирането е методът, който прави пакетите шифрирани и защитени.

Тунелите най-често биват изградени на две от нивата на еталонния модел за свързване на отворени системи – канално и мрежово.

Тунелирането на канално ниво осигурява прехвърляне на кадри данни. Типични протоколи са:

- PPTP (Point to Point Tunneling Protocol) – създаден от Microsoft като разширение на стандартния протокол PPP (Point to Point Protocol);
- L2F (Layer 2 Forwarding Protocol) – разработка на Cisco с възможност за тунелиране на ATM и Frame Relay протоколи;
- L2TP (Layer 2 Tunneling Protocol) – комбинира възможностите на горните два протокола.

Тунелирането на мрежово ниво осигурява прехвърляне на дейтаграми между двете страни на тунела. Типичен протокол е IPSec, разработен под контрола на IETF (Internet Engineering Task Force) и вграден в IPv6.[1] На практика това не е единствен протокол, а представлява предствалвява фамилия от отворени стандарти, осигуряващи сигурността на обмен във всички свои аспекти:

- AH (Authentication Header) – протокол осигуряващ удостоверяване на източника, гарантиране на цялостта и последователността на данните в крайния получател [2];
- ESP (Encapsulation Security Payload) – протокол осигуряващ допълнително и поверителност [3];
- IKE (Internet Key Exchange) – протокол за уточняване на допустимите за използване средства и политики за сигурност в момента на изграждане на тунела. Използува протоколите за управление на допустимите средства за сигурност и обмен на криптиращи ключове ISAKMP (Internet Security Association and Key Management Protocol) и SKEME.

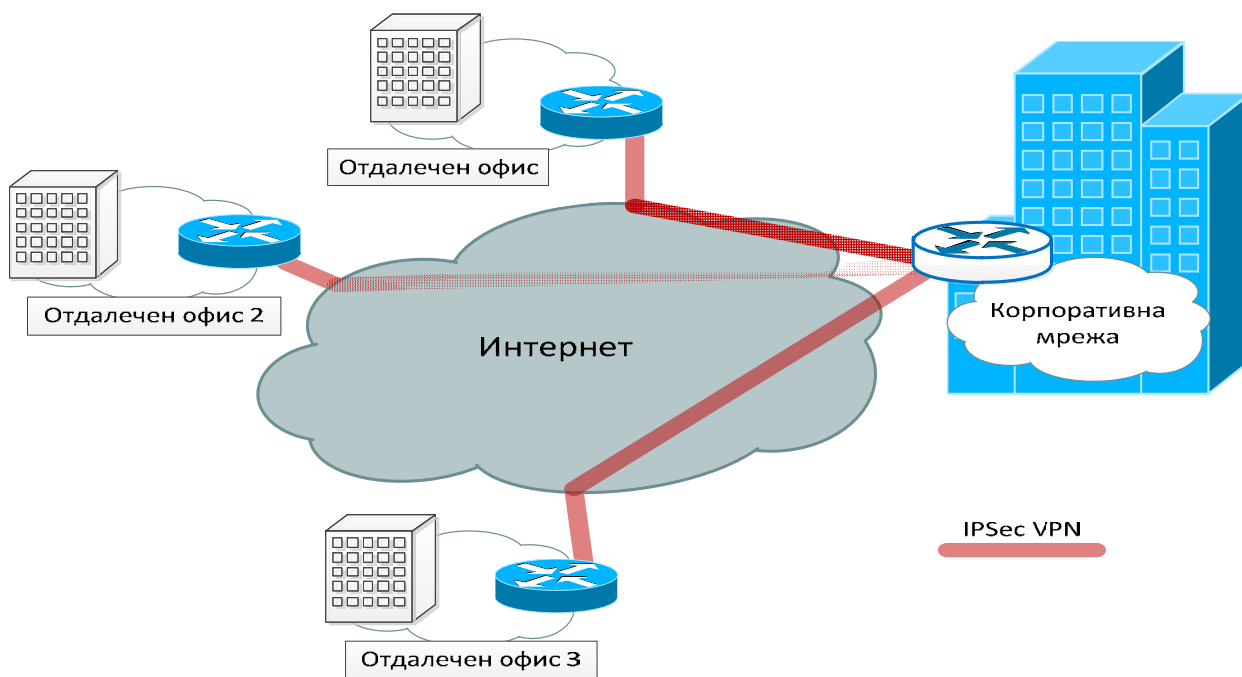
- AES (Advanced Encryption Standard), DES (Data Encryption Standard), 3DES, Diffie-Hellman – алгоритми за криптиране и удостоверяване;
- HMAC (Hash- based Message Authentication Code), MD5 (Message Digest 5), SHA-1 (Secure Hash Algorithm 1) – алгоритми и протоколи за проверка на целостта на данните.

Въпреки безспорните предимства на IPSec, изграждането на VPN тунел, базиран единствено на този протокол се сблъсква с някои проблеми и слабости на технологията. Такива са невъзможността за поддържане на групов (multicast) трафик и най-вече невъзможност за обща работа с маршрутизиращи протоколи. Решаването на тези проблеми може да се постигне чрез интегриране на IPSec с тунелния протокол GRE (Generic Routing Encapsulation), разработен от Cisco. GRE може да капсулира множество протоколи в IP тунели, създавайки възможност за свързване на мултипротоколни подмрежи, чрез еднопротоколна преносна мрежа.

Съвместната употреба на двата протокола IPSec и GRE гарантира от една страна криптиране на трафика, удостоверяване на източника и целостта на данните и от друга страна възможност за пренос на multicast трафик и на динамично маршрутизиране на съставните подмрежи. [4]

3. Варианти за изграждане на виртуални частни мрежи

В настоящата статия е представена VPN от тип мрежа-до-мрежа с hub-and-spoke топология, при която централният офис (hub) е свързан с локалните офиси (spokes) чрез индивидуални комуникационни тунели [3], показана на фиг.3.



Фиг.3: Hub-and-spoke виртуална частна мрежа

Тази топология е най-удачна в случаите, когато основният трафик е между централния офис и всеки от локалните офиси. Характеризира се с централизирано

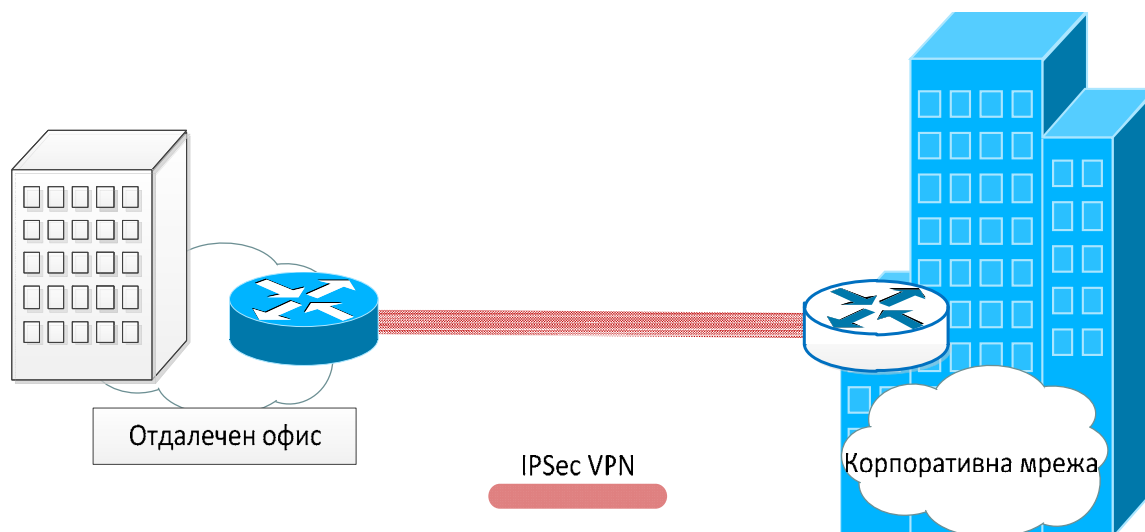
управление на ресурсите, подреденост и разбираемост на мрежовата инфраструктура.

Анализирани са две алтернативни решения – VPN чрез IPSec директна капсулация и VPN чрез GRE тунел защитен с IPSec.

VPN чрез IPSec директна капсулация

Заложени следните функционални характеристики:

- всеки отдалечен шлюз инициализира изграждането на криптиран тунел към шлюза на централния офис съгласно фиг.4, използвайки IPSec в тунелен режим;
- контролът върху маршрутите се осъществява в корпоративната локална мрежа, а отдалечените офиси се конфигурират със статични маршрути;
- използват се криптиращи алгоритми 3DES или AES;
- за повишаване на сигурността са използвани цифрови сертификати вместо споделени тайни ключове.

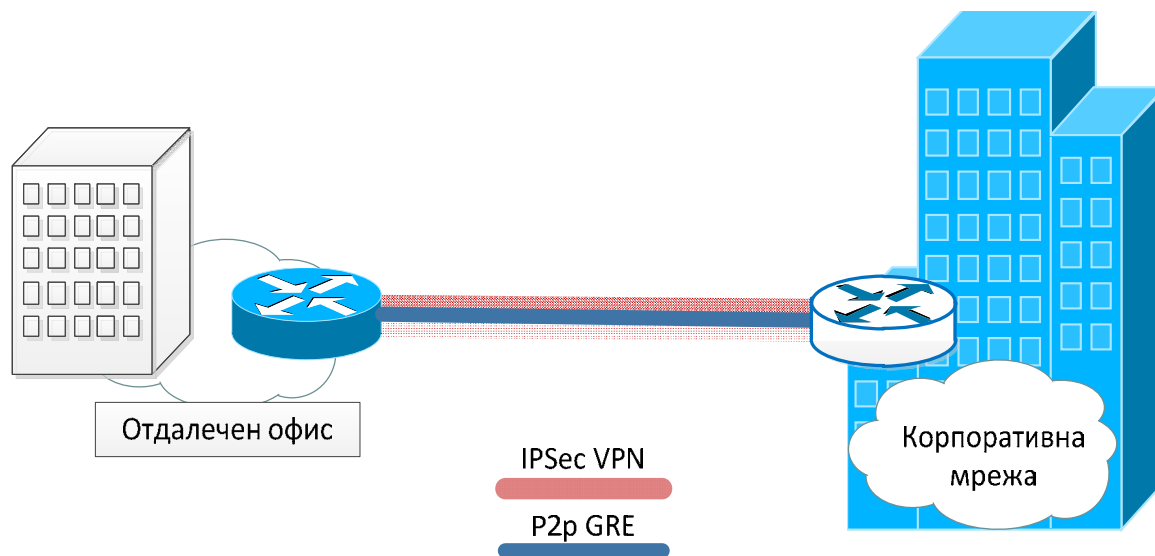


Фиг.4: VPN тунел с директна IPSec капсулация

VPN чрез GRE тунел защитен с IPSec

Заложени следните функционални характеристики:

- изграждани са статични GRE тунели между шлюза на централния офис всеки от отдалечените шлюзове, съгласно фиг.5;
- контролът върху маршрутите се осъществява разпределено;
- криптирането се извършва чрез IPSec, посредством алгоритми 3DES или AES;
- за повишаване на сигурността са използвани цифрови сертификати вместо споделени тайни ключове.



Фиг.5: GRE тунел защитен с IPSec

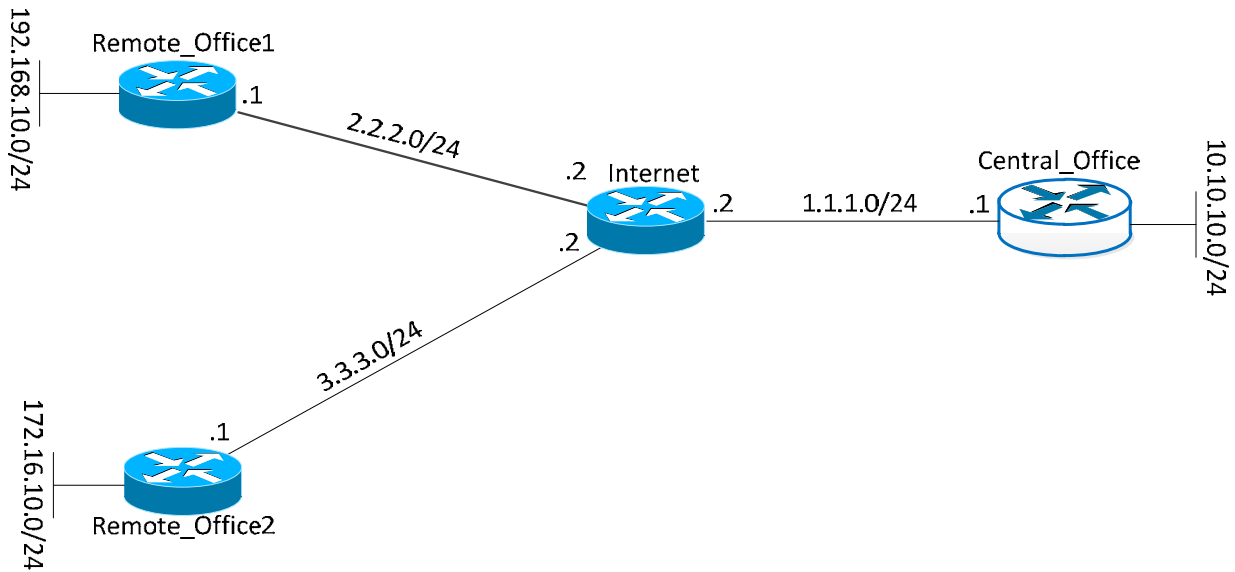
4. Симулационни модели

Проверката на работоспособността на предлаганите решения е извършена чрез симулационно моделиране. Използувана е сумулационна среда GNS3.

Изградени са два симулационни модела. Те обхващат само устройствата, функционално свързани с виртуалните частни мрежи и не засягат локалните мрежи, стоящи зад шлюзовете. Във всеки модел са използвани по четири маршрутизатора от тип CISCO 3640. Три от тях емулират, необходимите за виртуалната частна мрежа шлюзове, а четвъртият емулира свързващата преносна мрежа. Използувана е примерна адресна схема.

Работоспособността на реализираните симулационни модели се установява чрез „show” командите в операционната система на маршрутизаторите, даващи възможност за проверка на параметри и функционалности в CISCO IOS (Internetwork Operating System).

Функционална схема на симулационен модел на VPN чрез IPSec директна капсулация е показана на фиг.6.



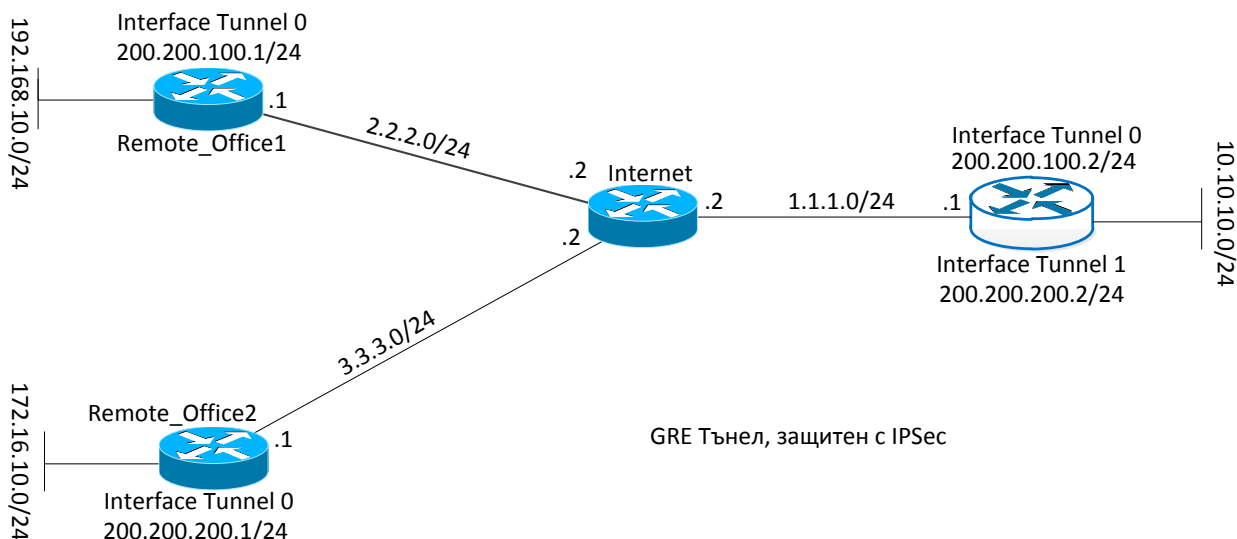
Фиг.6: Симулационен модел на VPN чрез директна IPsec капсулация

В табл.1 са представени извадки от конфигурационните файлове на шлюзовете за централен и локален офис, съдържащи съответните инициализиращи команди.

Табл.1

IPsec директна енкапсулация	
<pre> Central Office crypto isakmp policy 1 encr 3des hash md5 authentication pre-share crypto isakmp key cisco address 2.2.2.1 255.255.255.0 no-xauth crypto isakmp key cisco address 3.3.3.1 255.255.255.0 no-xauth ! ! crypto ipsec transform-set 3DES-SHA esp-3des esp-sha-hmac ! crypto map VPN_TO_REMOTE 10 ipsec-isakmp set peer 2.2.2.1 set transform-set 3DES-SHA match address VPN crypto map VPN_TO_REMOTE 20 ipsec-isakmp set peer 3.3.3.1 set transform-set 3DES-SHA match address VPN2 ! ! ! interface Loopback1 ip address 10.10.10.1 255.255.255.0 ! interface FastEthernet0/0 ip address 1.1.1.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto crypto map VPN_TO_REMOTE ip access-list extended VPN permit ip 10.10.10.0 0.0.0.255 192.168.10.0 0.0.0.255 ip access-list extended VPN2 permit ip 10.10.10.0 0.0.0.255 172.16.10.0 0.0.0.255 End </pre>	<pre> Remote Office crypto isakmp policy 1 encr 3des hash md5 authentication pre-share crypto isakmp key cisco address 1.1.1.1 255.255.255.0 no-xauth ! ! crypto ipsec transform-set 3DES-SHA esp-3des esp-sha-hmac ! crypto map VPN_TO_CENTRAL 10 ipsec-isakmp set peer 1.1.1.1 set transform-set 3DES-SHA match address VPN ! interface Loopback1 ip address 192.168.10.1 255.255.255.0 ! interface FastEthernet0/0 ip address 2.2.2.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto crypto map VPN_TO_CENTRAL ip access-list extended VPN permit ip 192.168.10.0 0.0.0.255 10.10.10.0 0.0.0.255 End </pre>

Функционална схема на симулационен модел на VPN чрез GRE тунел защитен с IPSec е показана на фиг.7. След изграждането на виртуалните тунели през тях е прекаран маршрутизиращ протокол EIGRP.



Фиг.7: Симулационен модел на VPN чрез GRE тунел защитен с IPSec

Извадки от съответните конфигурационните файлове на шлюзовете за централен и локален офис са представени в табл.2.

Табл.1

GRE тунел защитен с IPSec	
<p>Central_Office</p> <pre> crypto isakmp policy 1 encr 3des hash md5 authentication pre-share crypto isakmp key cisco address 2.2.2.1 255.255.255.0 no-xauth crypto isakmp key cisco address 3.3.3.1 255.255.255.0 no-xauth ! crypto ipsec transform-set 3DES-SHA esp-3des esp-sha-hmac ! crypto map VPN_TO_REMOTE 10 ipsec-isakmp set peer 2.2.2.1 set transform-set 3DES-SHA match address VPN_GRE_REMOTE1 crypto map VPN_TO_REMOTE 20 ipsec-isakmp set peer 3.3.3.1 set transform-set 3DES-SHA match address VPN_GRE_REMOTE2 ! interface Loopback1 ip address 10.10.10.1 255.255.255.0 ! interface Tunnel0 ip address 200.200.100.2 255.255.255.0 tunnel source 1.1.1.1 tunnel destination 2.2.2.1 ! interface Tunnel1 ip address 200.200.200.2 255.255.255.0 </pre>	<p>Remote_Office</p> <pre> crypto isakmp policy 1 encr 3des hash md5 authentication pre-share crypto isakmp key cisco address 1.1.1.1 255.255.255.0 no-xauth ! crypto ipsec transform-set 3DES-SHA esp-3des esp-sha-hmac ! crypto map VPN_TO_CENTRAL 10 ipsec-isakmp set peer 1.1.1.1 set transform-set 3DES-SHA match address VPN_GRE ! interface Loopback1 ip address 192.168.10.1 255.255.255.0 ! interface Tunnel0 ip address 200.200.100.1 255.255.255.0 tunnel source 2.2.2.1 tunnel destination 1.1.1.1 ! interface FastEthernet0/0 ip address 2.2.2.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto crypto map VPN_TO_CENTRAL router eigrp 1 </pre>

<pre> tunnel source 1.1.1.1 tunnel destination 3.3.3.1 ! interface FastEthernet0/0 ip address 1.1.1.1 255.255.255.0 duplex auto speed auto crypto map VPN_TO_REMOTE ! interface FastEthernet1/0 no ip address shutdown duplex auto speed auto ! router eigrp 1 network 10.10.10.0 0.0.0.255 network 200.200.100.0 network 200.200.200.0 no auto-summary ip access-list extended VPN_GRE_REMOTE1 permit gre 1.1.1.0 0.0.0.255 2.2.2.0 0.0.0.255 ip access-list extended VPN_GRE_REMOTE2 permit gre 1.1.1.0 0.0.0.255 3.3.3.0 0.0.0.255 End </pre>	<pre> network 192.168.10.0 network 200.200.100.0 auto-summary ip access-list extended VPN_GRE permit gre 2.2.2.0 0.0.0.255 1.1.1.0 0.0.0.255 End </pre>
--	---

10. Заключение

В настоящата статия са предложени варианти на проект за корпоративна VPN. Работоспособността на представените решения е проверена чрез симулационно моделиране.

Сравнителният анализ на получените опитни резултати показва, че и двете решения предлагат надеждна и сигурна комуникационна WAN свързаност при спазване на всички изискванията за конфиденциалност, автентикация и интегритет на информацията. Конфигурациите на шлюзовете се реализират сравнително лесно, като необходимите за тях функционални параметри се поддържат от голям кръг маршрутизатори.

Вариантът на VPN с IPSec директната капсулация е препоръчителен при липсата на IP multicast трафик и на динамични маршрутизиращи протоколи, като например индивидуален отдалечен достъп за мобилен служител.

Вариантът на VPN чрез GRE тунел защитен с IPSec е по-комплексно решение, позволяващо тунелиране на IP multicast трафик и на маршрутизиращи протоколи. Като негов недостатък може да се изтъкне статичното изграждане на всеки тунелен интерфейс, водещо до необходимостта от задължителна намеса на мрежов администратор при неговото конфигуриране.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cisco systems, *IPSec Direct Encapsulation VPN Design Guide*, Copyright © 2006 Cisco Systems, Inc.
- [2] Kent S., Atkinson R., *IP Authentication Header*, RFC 2402, Nov. 1998
- [3] Kent S., Atkinson R., *IP Encapsulating Security Payload (ESP)*, RFC 2406, Nov. 1998
- [4] Cisco systems, *Point-to-Point GRE over IPSec Design Guide*, Copyright © Cisco systems Inc, 2006
- [5] Carmouche J., *IPSec Virtual Private Network Fundamentals*, Cisco Press, 2007
- [6] Deal R., *The Complete Cisco VPN Configuration Guide*, Cisco Press, 2006
- [7] Frankel S., *Demystifying the IPSec Puzzle*, Artec House Publisher, 2001
- [8] Maughan D., Schertler M., Schneider M., Turner J., *Internet Security Association and Key Management Protocol (ISAKMP)*, RFC 2408, Nov. 1998

Автор: Георги Атанасов Найденов, гл. ас. д-р, катедра „Компютърни системи”, Факултет Компютърни Системи и Управление на Технически Университет - София, E-mail address: gnayd@tu-sofia.bg

Постъпила на 25.11.2011

Рецензент доц. д-р Петко Стоянов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЧЕСТОТНОТО АСИНХРОННО ПУСКАНЕ НА СИНХРОННИТЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРИ

Евдокия Димитрова

Резюме: Задачата на статията е да се изследва влиянието на определящите параметри върху процеса на честотното асинхронно пускане (ЧАП) на синхронните турбогенератори (ТГ). Въз основа на практически ориентиран математически апарат ЧАП може да се моделира като се вземе под внимание зависимостта на възбуждането от честотите на въртене и на противодействащия въртящ момент. Моделът е изграден с помощта на програмните продукти FORSIM за решаване на системи диференциални уравнения. Този модел ще е много полезен за експлоатационния персонал в електрическите централи при използване на ЧАП.

Ключови думи: турбогенератор; честотно асинхронно пускане; изследване

INVESTIGATION OF FREQUENCY ASYNCHRONOUS STARTING FOR SYNCHRONOUS TURBOGENERATORS

Evdokiya Dimitrova

Abstract: The task of this paper is to investigate the effect of the definitive parameters on the frequency asynchronous starting (FAS) process of the synchronous turbogenerators (TG). On the basis of the practically oriented mathematical apparatus, FAS could be modeled when taken under attention the dependence on rotation frequency stimulation and resistant rotational moment. The model is worked out with the help of the program products FORSIM for system differential equations solving. This model for use of FAS will be very useful for exploitation staff in the electric power stations.

Key words: turbogenerator; frequency asynchronous starting; investigation/research

1. Въведение

Целта на настоящия доклад е да се изследва взаимното влияние на определящите параметри върху процеса на честотното асинхронно пускане (ЧАП).

Честотното асинхронно пускане е видоизменена форма на известното отдавна и с широко приложение честотно синхронно пускане (ЧСП). И при двата метода пусканата машина се привежда в движение от друг генератор, който се задвижва от собствена турбина [1].

Уравненията за движението на двете машини имат следния вид:

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{1}{2T_1} [M_3 - (M_1 + M_{e1} + M)] \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{1}{2T_2} (M - M_2), \quad (2)$$

където: n_1, n_2 са честотите на въртене на двата генератора;
 T_1, T_2 – инерционните константи;
 M_3 – задвижващият момент на турбината на първия генератор;
 M_1, M_2 – механичните съпротивителни моменти;
 M_{e1} – електрическият спирачен момент вследствие на загубите;
 M – асинхронният момент.

При нормално изпълнение на ЧАП двата генератора не са възбудени. Задвиженият водещ генератор Γ_1 се развърта от собствена турбина и при достигане на предварителна избрана честота ($20 \div 40 \% n_H$) се възбужда. Началната честота на въртене, при която се подава възбуждане n_1 , трябва да бъде така подбрана, че полученото възбуждане да създаде достатъчно големи токове в статорната верига на двата генератора.

Вторият генератор Γ_2 се захранва с напрежение, пропорционално на честотата и се развърта асинхронно, докато първият генератор Γ_1 редуцира ускорението си и намалява честотата на въртенето си до n_2 . При приблизително еднаква честота на въртене на двата генератора, на втория генератор Γ_2 се подава възбудителен ток, равен на $(0,5I_{BH})$.

2. Изследване на ЧАП на синхронните ТГ

Успешното ЧАП се характеризира с минимално време за пускане, ниско възбуждане, незначителна топлинна енергия в ротора и плавно синхронизиране.

Основната задача на изчислителната процедура е определяне на зависимостите $M_1 = f(n)$, $M_2 = \Phi(n)$, $n_1 = f(t)$, $n_2 = f(t)$, $W = \varphi(t)$.

Моделът е изграден с помощта на програмните продукти FORSIM за решаване на системи диференциални уравнения. Той е основен момент в алгоритъма за изследване на ЧАП на синхронните ТГ.

По описания в [2] модел са извършени вариантни изчисления за определяне на продължителността на асинхронния режим (АР) на генератор тип ТВВ-200-2А, развъртян от втори генератор тип ТВВ-165-2 в същата централа. Резултатите са дадени в Таблица 1, при данни за първия генератор: начална честота на въртене $n_{01} = 0,1 \dots 0,5$ о.е., роторен ток $I_{p1} = (1,1 \div 1,5)$ отнесен спрямо възбуждането на празен ход и задвижващ момент $M_3 = 10 \%$. Разгледани са варианти през отворена и затворена верига на възбуждането на втория генератор при кратност на допълнителното съпротивление $K_{rac} = 3$.

Таблица 1

При отворена верига на възбудането			При затворена верига на възбудането ($K_{\text{гас}} = 3$)	
n_{01}	I_{p1}	$t_{\text{ас.}}$	I_{p1}	$t_{\text{ас.}}$
о.е.	о.е.	s	о.е.	s
0,1	1,1	64	1,1	30
0,2	1,2	165	1,2	59
0,3	1,3	271	1,3	107
0,4	1,4	363	1,4	146
0,5	1,5	345	1,5	200

От таблица 1 се вижда, че с голям статорен ток не винаги се получава кратко време на пускане. За да се запази възможно най-малка продължителност на АР на втория генератор, се препоръчва да се избере началната честота на въртене на първия генератор $n_{01} = 0,1-0,2$ о. е., при посочените по-горе съотношения на мощностите на двата генератора (200-165). Това се ограничава от възбудането и от механичните въртящи моменти.

Нормалното гасително съпротивление, което генераторите имат ($K_{\text{гас}} = 3$), създава възможност за ЧАП със сравнително малка продължителност на времето за пускане.

Изменението на функциите на честотите на въртене на двата генератора във времето $n_1 = f(t)$ и $n_2 = f(t)$ е изобразено на фиг. 1 при затворена верига на възбудането на втория генератор при кратност на допълнителното съпротивление $K_{\text{гас}} = 3$ и данни за първия генератор:

- задвижващ момент – 10 %;
- роторен ток и начална честота на въртене, според Таблица 1.

С нарастване на общия реактанс на проводниците, трансформаторите и генератора пускането може да се затрудни и дори да стане невъзможно. Затова генератори с голямо отношение на тока на късо съединение към номиналния ток са особено подходящи за ЧАП. Увеличеното разстояние между машините може да се компенсира чрез голямо възбудане на водещия генератор. За изследване на влиянието на мощността на първия генератор и разстоянието между двата генератора е прието вторият генератор (ТВВ-200-2А) да се пусне от първия генератор с мощност 100 MW (ТВВ-100) от външна електроцентрала, отдалечена на разстояние 15,6 km. Резултатите са дадени в Таблица 2 при същите изходни данни на първия генератор. Разгледани са варианти при затворена и отворена верига на възбудането на втория генератор при кратност на гасителното съпротивление $K_{\text{гас}} = 3$ и $K_{\text{гас}} = 10$.

Таблица 2

При отворена верига на възбудането			При затворена верига на възбудането $K_{гас} = 3$			При затворена верига на възбудането $K_{гас} = 10$	
n_{01}	I_{p1}	$t_{ac.}$	I_{p1}	$t_{ac.}$	I_{p1}	$t_{ac.}$	
о.е.	о.е.	s	о.е.	s	о.е.	s	
0,1	1,1	98	1,1	42	1,1	50	
0,2	1,2	165	1,2	100	1,2	108	
0,3	1,3	198	1,3	168	1,3	170	
0,4	1,4	255	1,4	220	1,4	226	
0,5	1,5	300	1,5	270	1,5	278	

Изменението на функциите $n_1 = f(t)$ и $n_2 = f(t)$ е изобразено на фиг. 2 при данни за първия генератор: задвижващ момент 10 %, роторен ток и начална честота на въртене, съгласно Таблица 2 и при затворена верига на възбудането на втория генератор с кратност на допълнителното съпротивление $K_{гас} = 3$.

При съотношение на мощностите на двата генератора 2:1 (200:100) и отдалеченост помежду им 15,6 km се препоръчва да се избере за първия генератор: начална честота на въртене 0,1-0,2 о. е., роторен ток (1,1 -1,3) отнесен спрямо възбудането на празен ход, задвижващ момент на турбината 10 % - 15 % и затворена верига на възбудането на втория генератор при кратност на гасителното съпротивление $K_{гас} = 3$. Така избрани параметрите осигуряват успешно ЧАП.

На фиг. 3 е изобразен въртящият момент в зависимост от разликата между честотите на въртене на двата генератора, отнесена спрямо критичното плъзгане:

$$M_m = \frac{H_2}{H_1 + H_2} (M_3 - M_{R1}) + \frac{H_1}{H_1 + H_2} M_{R2}, \quad (3)$$

където H_1, H_2 са инерционните константи на двата генератора;

M_{R1}, M_{R2} – моментите на триене на двата генератора.

От задвижващия момент на турбината на първия генератор зависи процесът на ЧАП. Ако моментът на турбината M_3 е прекалено голям не се получава ЧАП, тъй като M_m от уравнение 3 не пресича кривата на електрическия въртящ момент M .

Извършени са вариантни изчисления по описания в [2] метод за определяне на продължителността на АР на втория генератор тип ТВВ-200-2А, развъртан от друг генератор тип ТВФ 60-2 в същата централа. Резултатите са дадени в таблица 3 при данни за първия генератор: начална честота на въртене $n_{01} = 0,1 \dots 0,3$ о.е., роторен ток $I_{p1} = (1,1-1,6)$ отнесен спрямо възбудането на празен ход и задвижващ момент $M_3 = 10 \% \dots 50 \%$. Вариантите са разгледани при затворена верига на възбудането на втория генератор при кратност на гасителното съпротивление $K_{гас} = 3$.

Таблица 3

Задвижващ момент M_3 на турбината на първия генератор												
10%			20%		30%		40%		50%			
n_{01}	I_{p1}	$t_{ac.}$	I_{p1}	$t_{ac.}$	I_{p1}	$t_{ac.}$	I_{p1}	$t_{ac.}$	I_{p1}	$t_{ac.}$	I_{p1}	$t_{ac.}$
о.е.	о.е.	s	о.е.	s	о.е.	s	о.е.	s	о.е.	s	о.е.	s
0,1	1,1	45	1,1	47	1,1	49	1,3	50	1,4	52		
0,2	1,2	50	1,2	55	1,2	58	1,4	61	1,5	64		
0,3	1,3	60	1,3	67	1,3	70	1,5	72	1,5	75		

По-голям задвижващ момент на турбината на първия генератор не може да се получи успешно ЧАП. Водещият генератор, задвижен от турбината, се върти по-бързо от водения генератор, така че разликата в честотите нараства. При по-голямо възбуждане се увеличава магнитната връзка между двете машини. Продължителността на АР на втория генератор нараства. Синхронизирането се получава при по-висока честота на въртене. Честотното асинхронно пускане е успешно. Задвижващият момент не се избира произволно, ако няма на разположение достатъчно възбуждане.

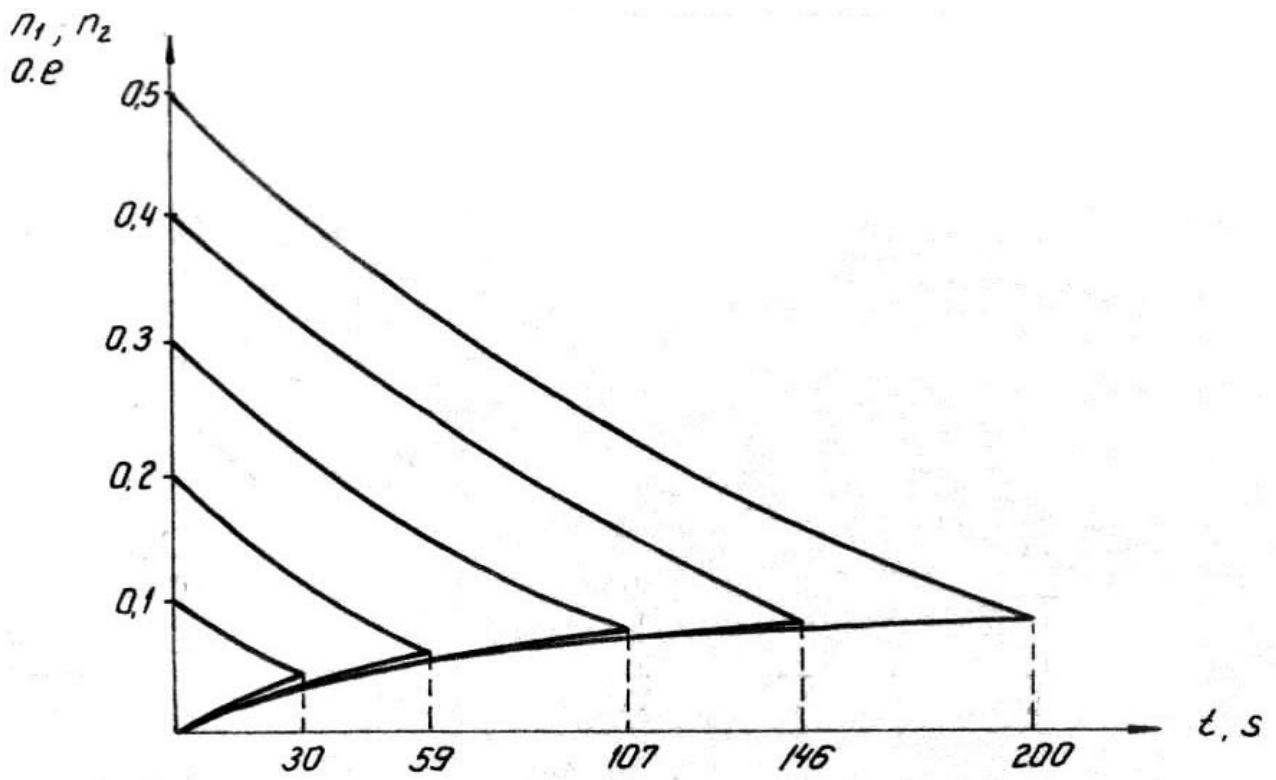
В подходящ момент се спира достъпът на пара към турбината за определено време. След синхронизирането потокът на пара към турбината се възстановява. Едно успешно ЧАП зависи от състоянието на мощностите на двата генератора. С помощта на описания в [2] модел са направени изчисления за възможностите за ЧАП на различни типове ТГ в нашата ЕЕС, като резултатите са дадени в Таблица 4.

Таблица 4

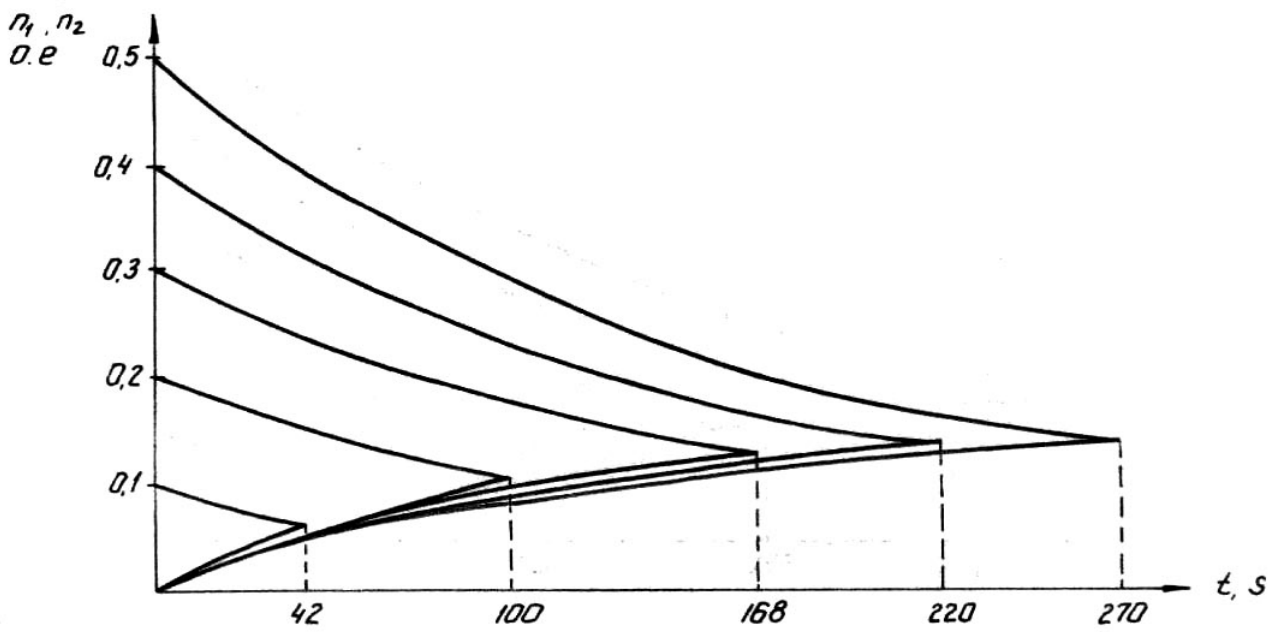
№	Развъртан	Развъртащ	Условия, при които е възможно ЧАП
1.	ТГ тип ТВВ-200-2А	ТВВ 200-2	$n_{01} = 0,1-0,2$ о.е. $I_{p1} = (1,1-1,3) I_{p10}$ о.е. $M_3 = 10\%$ $t_{ac} = 25$ s
2.	ТВВ 200-2А	ТВВ 165-2	$n_{01} = 0,1-0,2$ о.е. $I_{p1} = (1,1-1,3) I_{p10}$ о.е. $M_3 = 10\%$ $t_{ac} = 30$ s
3.	ТВВ 200-2А	ТВС 100	$n_{01} = 0,1-0,2$ о.е. $I_{p1} = (1,1-1,3) I_{p10}$ о.е. $M_3 = 10\%$ $t_{ac} = 30$ s
4.	ТВВ 200-2А	ТВФ 60-2	$n_{01} = 0,1-0,2$ о.е. $I_{p1} = (1,1-1,3) I_{p10}$ о.е. $M_3 = 10\%$ $t_{ac} = 50$ s

3. Анализ на резултатите от изследването

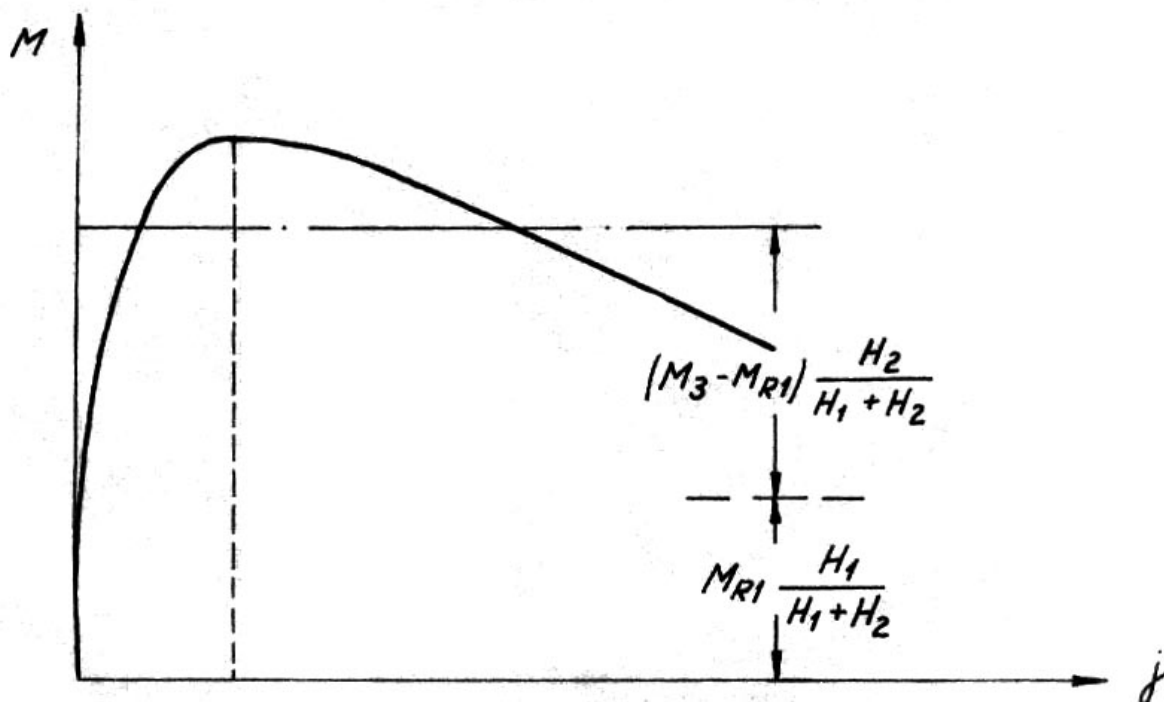
От табл. 1 и фиг. 1 следва, че с голям статорен ток не винаги се получава кратко време за пускане.



Фигура 1.



Фигура 2.



Фигура 3.

При съотношение на мощностите на двата генератора 1:2 (табл. 2), 1:3 (табл. 3) инерционната константа T_1 е по-малка от T_2 , тогава пусковата енергия на генератора G_2 е още по-малка. Пускането при пропорционално на честотата на въртене възбуждане продължава по-дълго време, в сравнение константно възбуждане, въпреки че не се изменя значително пусковата енергия. Следователно продължителността на пускането не трябва да се разглежда като мярка за пусковата енергия. За да се запази възможно най-малка продължителност на АР на генератор G_2 , подходящ задвижващ момент е 10% - 20 % (табл. 3).

При съотношение на мощностите на двата генератора 1:3 (табл. 3), 1:2 (табл. 2) се препоръчва да се избере на генератор G_1 : начална честота на въртене $0,1 \div 0,2$ о.е., роторен ток (1,1-1,2) отнесен спрямо възбуждането на празен ход, задвижващ момент на турбината 10%.

Едно успешно ЧАП зависи от съотношението на мощностите на двата генератора.

С нарастване на общия реактанс на проводниците трансформаторите и генератора, пускане може да се затрудни и дори да стане невъзможно.

4. Заключение

1. Въз основа на практически ориентиран математически апарат ЧАП може да се моделира, като се вземе под внимание: началната честота на въртене, възбуждането, задвижващият момент на турбината и противодействащият въртящ момент.
2. Резултатите позволяват да се предвидят границите и условията за успешно ЧАП, когато е необходимо генераторите да бъдат пуснати и да работят в компенсаторен режим.
3. С помощта на моделирането може да се извършват модерни изследвания за възможностите на ЧАП на различни типове ТГ в нашата ЕЕС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Canay, M. Teilfrequenzanlauf in Pumpspeicherwerken, Brawn Boveri Mitteilungen 7, 1974.
2. Димитрова, Е. С., И. В. Врангов. Изследване на асинхронния режим при честотно асинхронно пускане на синхронен генератор, Известия на ВМЕИ „В. И. Ленин”, т. 42, кн. 5, 1987 г.

Автор: Евдокия Стоянова Димитрова, доц., д-р, кат. „Електроенергетика и автоматика”, Колеж по Енергетика и Електроника, Технически Университет - София; E-mail address: evdokia49@hotmail.com

Постъпила на 03.11.2011

Рецензент проф. д-р Е. Николов

ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЧЕСТОТНОТО АСИНХРОННО ПУСКАНЕ

Евдокия Димитрова

Резюме: В статията е направен анализ на метода на честотното асинхронно пускане (ЧАП) на базата на традиционните числени методи.

При решаване на оптимизационни задачи за процеси в динамично състояние, при които математическото описание е зададено със системи диференциални уравнения, а управляващите параметри се изменят дискретно и непрекъснато, се прилага принципът на максимума. С помощта на него е съставен алгоритъм и по него е направена програма за ЕИМ. По тази програма са получени оптималните стойности за времето на успешно ЧАП на различни типове турбогенератори (ТГ) в нашата ЕЕС, когато е необходимо генераторите да бъдат пуснати и да работят в компенсаторен режим.

Ключови думи: честотно асинхронно пускане; турбогенератор; принцип на максимума

OPTIMIZATION OF FREQUENCY ASYNCHRONOUS STARTING

Evdokiya Dimitrova

Abstract: This paper gives analysis of the method of the frequency asynchronous starting (FAS) based on the traditional numerical methods.

While solving optimization problems for processes in dynamic condition, when mathematical description is provided with differential equations, and managing parameters modulate discreetly and continuously, the principle of maximum is applied. With the help of this principle is constructed and algorithm and on its basis is developed a program for ECM (Electronic Calculation Machine). With this program are calculated the Optimum results for the time of successful FAS of different types of turbo generators (TG) at our electro-energetic system, when it is necessary to start the generators and to work in compensational mode.

Key words: frequency asynchronous starting; turbogenerator; principle of maximum

1. Въведение

Термичните централи в нашата електроенергийна система (ЕЕС) изискват значителна реконструкция и модернизация. В тези случаи могат да се използват генераторите в ТЕЦ, чиято топлотехническа част е в ремонт или реконструкция. Синхронните генератори (СГ) могат при необходимост да бъдат развъртени и

включени в паралел за работа като синхронни компенсатори (СК) за производство на реактивна мощност (РМ) и за регулиране на напрежението.

Всичко това определя необходимостта от търсене на подходящи режими на пускане на синхронните турбогенератори (ТГ) по технико-икономически съображения и с оглед на съвременното развитие на техниката.

Честотното асинхронно пускане (ЧАП) е видоизменена форма на известното отдавна и с широко приложение честотно синхронно пускане (ЧСП). И при двата метода пусканата машина се привежда в движение от друг генератор, който се задвижва от собствена турбина [1].

При решаване на оптимизационни задачи за процеси в динамично състояние, при които математическото описание е зададено със система диференциални уравнения [2], а управляващите параметри могат да се изменят дискретно и непрекъснато, се прилага формулираният от Л. Понтрягин принцип на максимума [3].

2. Оптимизация на ЧАП на синхронните ТГ

Въз основа на диференциалните уравнения за движението на двете машини, описващи процеса на ЧАП, се получава израза [2]:

$$\frac{dy_i}{dt} = \varphi_i(y, u), \quad (1)$$

където: $i = 1, 2, \dots, n$;

y – векторът на състоянието на процеса, разглеждан като функция на времето;

u – векторът на управляващите параметри.

Управляващите параметри са функция на времето $u(t)$ и са ограничени в допустимата област $u \in U$, при изменението им могат да се изменят параметрите на състоянието на ЧАП.

Критерият за оптималност за определен период от време се определя от подинтегралната функция, която характеризира процеса за периода $t_{(0)} \div t_{(k)}$ [3]:

$$I = \int_{t_{(0)}}^{t_{(k)}} \varphi_0(y, u) dt \quad (2)$$

При оптимално динамично управление най-често срещаната задача е за бързодействие. При нея критерият (2) приема вида:

$$I = \int_{t_{(0)}}^{t_{(k)}} dt = t_{(k)} - t_{(0)} \rightarrow \min \quad (3)$$

Необходимо е така да се изберат управляващите параметри $U_{\text{опт}(t)}$, че процесът да се приведе от зададено начално състояние в момент $t_{(0)}$, до зададено крайно състояние в момент $t_{(k)}$ за минимално време.

Определянето на $U_{\text{опт}(t)}$ в задачата за бързодействие се решава с помощта на принципа на максимума, който може да се формулира по следния начин:

Въвежда се векторът $\lambda_{(t)}$, който е ориентиран по направление на движението. Това е векторът, по направлението на който функционалът (2) ще има най-бързо изменение.

За уравненията на движението на двете машини, описани със система диференциални уравнения съществува оптимално управление $U_{\text{опт}(t)}$. Състоянието на системата се привежда от него от начално до зададено крайно положение за минимално време и функцията има вида:

$$H[\lambda(t), y(t), u(t)] = \sum_{i=1}^n \varphi_i [y(t)u(t)] \lambda_i, \quad (4)$$

където: λ_i са функциите на времето, които удовлетворяват системата диференциални уравнения:

$$\frac{d\lambda_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial y_i} = -\sum_{j=1}^n \frac{\partial \varphi_j(y, u)}{\partial y_i} \lambda_j, \quad (5)$$

където: $i = 1, 2, \dots, n$.

Максимумът на $H(\lambda, y, u)$ се търси за всички управляващи параметри в допустимата област U . Функцията H има максимална стойност за уравнението:

$$H[\lambda(t), y(t), U_{\text{опт}}(t)] = \max_{u \in U} H[\lambda(t), y(t), U(t)] \quad (6)$$

За решаването на задачата за бързодействие по принципа на максимума се прилага следният алгоритъм:

Дадена е системата диференциални уравнения (1) и граничните условия:

$$y_0 < y_{\text{max}}; 0 \leq y \leq y_0; y_{\text{min}} S_{\text{кр}} < \Delta n,$$

където: Δn е най-голямата допустима разлика в честотите на въртене при синхронизирането;

$S_{\text{кр}}$ – критичното хлъзгане.

Необходимо е да се намери оптималното управление на процеса на пускане $U_{\text{опт}(t)}$, което да осигури минимално време t_{min} за ЧАП.

Свободно избиращи се параметри са: началната честота на въртене на първия генератор n_{01} ; възбуждането му I_{B1} ; задвижващият момент на водещия генератор Γ_1, M_3 .

Параметри като: инерционните константи T_1, T_2 , свързващият импеданс z ; моментът на освобождаване на втория генератор Γ_2 ; противодействащият въртящ момент на Γ_1 и др. силно влияят на процеса на пускането, но те принадлежат към даденостите на съоръженията и не могат да бъдат променени.

1. Съставя се функцията (4) за:

$$H(\lambda, y, u) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(y, u) \lambda_i$$

2. Съставя се системата диференциални уравнения:

$$\frac{d\lambda_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial y_i}$$

3. Решава се системата за

$$\lambda_i(t), \text{ където } \lambda_i(t) = C_1 = \text{const}$$

4. Замества се $\lambda_i(t)$ в израза за $H=C_1U$

5. Намира се $H_{\max} = \max H$

Оптималното управление $U_{\text{опт}}$ в случая не зависи от времето t . Функцията H ще има максимум при максималната възможна стойност на U , т. е. $\pm U_0$ в зависимост от знака на интеграционната константа C_1 . Ако $C_1 > 0$ оптималното управление $U_{\text{опт}} = \pm U_0$; ако $C_1 < 0$, то $U_{\text{опт}} = -U_0$, т. е.

$$U_{\text{опт}} = U_0 \text{sign} C_1, \tag{7}$$

където:

$$\text{sign} C_1 = \begin{cases} +1 & \text{при } C_1 > 0 \\ -1 & \text{при } C_1 < 0 \end{cases} \tag{8}$$

Замествайки (7) и (8), се получава:

$$\frac{dy}{dt} = U_0 \text{sign} C_1 \tag{9}$$

След интегриране на (9) се получава израза:

$$y_0 = (U_0 \text{sign} C_1)t + C_2 \tag{10}$$

Интеграционните константи C_1 и C_2 се определят от началните и крайни условия. При $y_{(0)} = y(t_{(0)})$ и $t_{(0)} = t = 0$ се получава:

$$C_2 = y_{(0)}, \text{ при } t = t_k \text{ и } y(t_{(k)}) = y_{(k)}, \tag{11}$$

където:

$$y_{(k)} = (U_o \text{sign} C_1) t_{(k)} + y_{(0)}, \quad (12)$$

следователно:

$$t_{(k)} = \frac{y_{(k)} - y_{(0)}}{U_o \text{sign} C_1} \quad (13)$$

Необходимо условие в (13) е $t_k > 0$, откъдето:

$$C_1 = \text{sign}(y_{(k)} - y_{(0)}) \quad (14)$$

Минималното време за прехода е:

$$t_{(k)} = \frac{|y_{(k)} - y_{(0)}|}{U_o} \quad (15)$$

Като се вземе под внимание (7) и (14), изразът за оптималното управление приема вида:

$$U_{ont} = U_o \text{sign}(y_{(k)} - y_{(0)}) \quad (16)$$

Оптималната траектория се получава като заместим интеграционните константи C_1 и C_2 от (11) и (14) в (10):

$$y = [U_o \text{sign}(y_{(k)} - y_{(0)})] t + y_{(0)} \quad (17)$$

Поставената оптимизационна задача е решена, като е намерено минималното време (15) за преход по оптималната траектория (17).

По описания алгоритъм е направена програма за ЕИМ IBM 43-41. По тази програма са получени оптималните стойности за времето на успешно ЧАП на различни типове ТГ в нашата ЕЕС, като резултатите са дадени в таблица 1.

Таблица 1

№	Развъртан СГ-2	Развъртащ СГ-1	Минимално време за ЧАП
1	ТГ тип ТВВ-200-2	ТВВ-200-2А	12
2	ТВВ-200-2А	ТВС-100	18
3	ТВВ-220-2А	ТВВ-220-2А	10
4	ТВВ-165-2	ТВВ-165-2	10
5	ТВВ-200-2А	ТВВ-165-2	16
6	ТВВ-165-2	ТВФ-60-2	20

3. Анализ на резултатите от изследването

От таблица 1 следва, че минималното време за успешно ЧАП на най-често срещаните ТГ в нашата ЕЕС, когато е необходимо да бъдат пуснати и да работят в режим на СК може предварително да бъдат определени.

Успешното ЧАП се характеризира освен с минималното време за пускане и с незначителна топлинна енергия в ротора, плавно синхронизиране, ниско възбуждане.

С нарастването на общия реактанс на проводниците, трансформаторите и генератора, пускането може да се затрудни и дори да стане невъзможно.

ЧСП с развъртане от собствени агрегати може да се осъществи във всички ТЕЦ в ЕЕС, които разполагат с две резервни възбудителки. При една резервна възбудителка е целесъобразно пускането да се извърши по метода на ЧАП. В противен случай трябва да се търси развъртащ агрегат в съседните водни или термични електроцентрали, като се съобразява времето на развъртане, съотношението на мощностите и големината на възбудителните токове.

4. Заключение

1. При решаване на оптимизационни задачи за процеси в динамично състояние, при които математическото описание е зададено със системи диференциални уравнения, а управляващите параметри се изменят дискретно и непрекъснато, се прилага принципът на максимума. С помощта на него може да се моделира ЧАП, при критерий за оптималност минимално време за пускане.

2. Синхронните генератори могат при необходимост да бъдат развъртани и включени в паралел за работа като СК за производство на реактивна мощност и за регулиране на напрежението. Подходящ начин за пускане в този случай е ЧАП. Процесът може да се осъществи при минимално време с помощта на принципа на максимума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Canay, M., Teilfrequenzanlauf im Pumpspeicherwerken, Brawn Boveri, Mitteilungen 7, 1974.
2. Димитрова, Е. С., Й. В. Врангов, Изследване на асинхронния режим при честотно асинхронно пускане на синхронен генератор, Известия на ВМЕИ „В. И. Ленин”, т. 42, кн. 5, 1987 г.
3. Понтрягин, Л. С., В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко, Математическая теория оптимальных процессов. М., Физматиз, 1971.

Автор: Евдокия Стоянова Димитрова, доц., д-р, кат. „Електроенергетика и автоматика”, Колеж по енергетика и електроника, Технически Университет - София; E-mail address: evdokia49@hotmail.com

Постъпила на 03.11.2011

Рецензент проф. д-р Е. Николов

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА РАЗЛИЧНИТЕ РЕАКЦИОННИ ПЪТИЩА ВЪРХУ ПОДРОБНОТО КИНЕТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА ОКИСЛЕНИЕТО НА АЦЕТИЛЕН

Илияна Найденова

Резюме: Фокусът на настоящата работа е върху сравнението на две химико-кинетични схеми за моделиране на окислението на ацетилена, както и анализа на ефекта на температурата и стехиометрията върху степента на превръщане на ацетилена. Избраните, новоразработени химикокинетични механизми са известни със способността си достоверно да пресъздават основните параметри описващи окислението на ацетилена в условията, за които те са валидирани. Изучени бяха специфичните реакционни пътища за превръщането на ацетилена и образуването на основните му продукти. Значителни различия се установиха при представянето на експериментално измерените резултати от двата реакционни механизма.

Ключови думи: окисление на ацетилен

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT REACTION PATHWAYS ON THE DETAILED KINETIC MODELING OF ACETYLENE OXIDATION

Iliyana Naydenova

Abstract: The work is focused on the comparison of two different chemical kinetic schemes for acetylene oxidation modeling and the analysis of the effect of temperature and stoichiometry on the acetylene conversion rate. The chosen chemical kinetic schemes are recently developed and well known for delivering fairly good representation of the main parameters of acetylene oxidation at conditions for which they have been validated. The role of the specific reaction paths for acetylene conversion and the main products formation were studied. A considerable difference was found in the representation of the experimentally measured results for both chemical kinetic schemes.

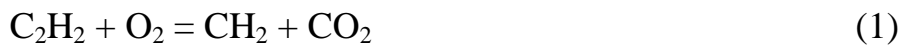
Keywords: acetylene oxidation

1. Introduction

Acetylene and ethylene chemistry is of crucial importance in high-temperature combustion. The acetylene is often defined as one of the species playing a critical role in

the soot precursors and soot particle formation and growth. Despite the numerous experimental and theoretical studies for at least half of a century many questions remain unanswered. One of the reasons for the great interest on the acetylene combustion kinetics is due to its significant role in the process of soot formation. Several recent publications describe the experimental and numerical investigations of the acetylene pyrolysis and oxidation in different combustion conditions [1-6].

Acetylene oxidation is experimentally studied in an isothermal plug flow reactor (PFR) by Alzueta et al. [1]. The experimental results are simulated with an in-house chemical kinetic model where, the effect of temperature and stoichiometry on the acetylene conversion is studied. The authors draw special attention on the initiation reaction ($C_2H_2 + O_2 = \dots$) with its possible product channels and the subsequent acetylene oxidation paths and the related derivatives. The authors point also on the H-abstraction reaction by the C-H bond fission and discuss the suggested reactions with the related rate coefficients from several earlier investigations [3-6]. The initiation step ($C_2H_2 + O_2 = \dots$) in [1] is represented by the reactions:



with the rate coefficients adopted from [3]. The global reaction flow in [1], showed the major reaction paths responsible for the acetylene oxidation and the main product formation channels. Accordingly, the acetylene is preferably oxidized in the reaction:



Furthermore, the ketenyl radical (HCCO) is mainly oxidized by molecular oxygen to CO, CO₂, H and OH. The authors [1] reported that the results are independent on the stoichiometry. The reactions $C_2H_2 + H + M = C_2H_3 + M$, and $C_2H_3 + O_2 = HCO + CH_2O$ found to contribute significantly to the C₂H₂ conversion in rich conditions. Nevertheless, their mechanism did not reproduce the temperature dependence of acetylene decay as well as the T_{max} of the CO and CO₂ profiles except for the much diluted mixture. They stated that the slow C₂H₂ conversion at low temperatures ($T < 1000$ K) is due to the competition reaction channels like the H and O₂ recombination to HO₂ and observed a tendency of slight increase of the HO₂ concentration with increasing the temperature up to 1000 K and the air-equivalence ratio (λ) of the reactive mixture.

The main conclusions of the authors [1] can be summarized as follows:

- Regardless the variety of the possible products described in the literature for the initiation reaction ($C_2H_2 + O_2 = \dots$) the results are only sensitive to the global reaction rate but not to the chosen product channels.
- The acetylene conversion is sensitive to the same reactions in all studied mixtures independently on the stoichiometry at atmospheric pressure and the given temperature interval.
- Some sensitivity of the acetylene conversion is observed also for the reaction channel involving species like C₂H₂OH and OCHCHO but, these channels are rarely studied and the rates are based on literature estimates which demand an extensive research.

Laskin and Wang presented a detailed investigation of acetylene and ethylene oxidation in [6]. Based on previous investigations [7,8] the authors deduced that, specific reaction channels for the molecular reaction ($C_2H_2 + O_2 = \dots$) cannot be defined by kinetic modeling. Accordingly, any of the discussed channels with an appropriately chosen rate coefficient can reproduce the experimental ignition delay times. The authors performed a detailed investigation of the relevant reaction pathways on the basis of fundamental consideration of the reaction energy. They analyzed the acetylene isomerization reaction and several possible product channels of vinylidene ($H_2CC:$) oxidation by quantum mechanical calculations and by simulating the shock-tube ignition delay data reported in the literature. The general conclusions from their work are:

- In shock-tube pyrolysis experiments [9], the preferred pathway is the isomerization of acetylene to vinylidene, followed by a reaction of H_2CC with O_2 .
- This reaction sequence can account for acetylene shock-tube ignition delay data.

This approach is adopted also in the later, extended version of the mechanism – the $H_2/CO/C_1-C_4$ kinetic model [2] which was used in the present work cited as the USC mechanism.

The main objective of the present work is to compare the above described chemical kinetic schemes [1, 2] for acetylene oxidation modeling in an isothermal plug flow reactor at atmospheric pressure. The aim is to study the different reaction paths of the acetylene oxidation implemented in the reaction schemes and to analyze their ability to predict the effect of temperature and stoichiometry on the acetylene conversion under plug flow reactor conditions. For that purpose the simulations were compared with the experimentally measured characteristics of acetylene oxidation described in [1]. The work is being conducted as a Short Term Scientific Mission within a collaboration activity under the COST Action CM0901 [13] and is still work in progress, only the preliminary results are shown.

2. Experimental conditions used for the simulations

The acetylene oxidation is experimentally studied in an isothermal, quartz flow reactor [1] at temperatures between 700 and 1470 K and at atmospheric pressure.

Table 1: Investigated mixtures and the respective combustion conditions.

Reaction system [ppm]				Air-equiv- alence ratio	T	p	Target	Ref.
C_2H_2	O_2	N_2	H_2O	λ	[K]	[atm]	Species concentration [ppm]	
500	875	991625	7000	20	700 – 1500	1.00	C_2H_2 , CO, CO_2 , C_2H_4	[1]
500	1 250	991250	7000	2	700 – 1500	1.00	C_2H_2 , CO, CO_2	[1]
500	2 500	990000	7000	1	700 – 1500	1.00	C_2H_2 , CO, CO_2	[1]
500	25 000	967500	7000	0.7	700 – 1500	1.00	C_2H_2 , CO, CO_2	[1]

Four different mixture compositions are studied from fuel rich ($\lambda = 0.7$) to very lean conditions ($\lambda = 20$) as shown in Table 1. The outlet products are analyzed with a gas-chromatograph. The only species detected in concentration above the uncertainty lim-

its are C_2H_2 , CO , CO_2 and C_2H_4 . The experimental work, the technical equipment and the operating conditions are described in detail in [1,10].

3. Computer modeling

Calculations were performed with the high temperature combustion $H_2/CO/C_1-C_4$ model [2], referred as the USC mechanism, with the version for pressure of one atmosphere. The program package HOMREA [11] was used setting the same combustion conditions as they were in the experiment. In HOMREA the plug flow reactor was defined as time dependent zero-dimensional system with constant temperature and pressure assumption. In addition to this simulations with CHEMKIN-PRO [12] were performed to derive the reaction flow analyses (RFA) of the kinetic schemes. In this case the plug flow reactor sub-model was used, where the plug flow is described as distance-dependant system. The results for both programs were about the same with difference within a tolerable range.

4. Results and discussion

Figure 1, shows the acetylene conversion profiles for two of the mixture compositions presented in Table 1, at rich (left hand side) and much diluted condition (right hand side).

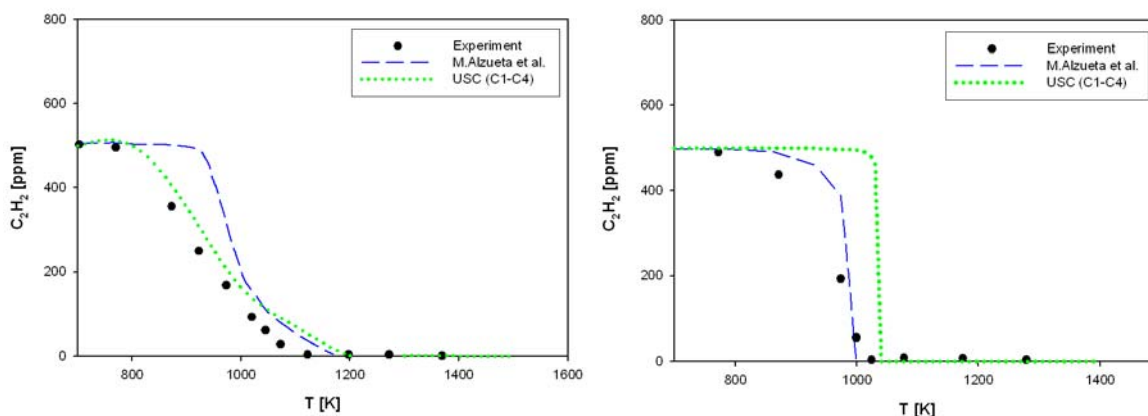


Figure 1: Temperature dependence of the experimentally measured (closed symbols) and calculated (lines) acetylene decay profiles at rich ($\lambda = 0.7$ - left) and much diluted conditions ($\lambda = 20$ - right).

Figure 2, shows the temperature dependence of the major products (CO and CO_2) concentration profiles, measured under the same conditions. These examples show the fuel richest and the leanest mixtures studied. For these conditions the two models differ in their agreement with the experiment. The USC-mechanism better predicts the rich conditions, whereas the model by M. Alzueta et al. works better for very lean conditions.

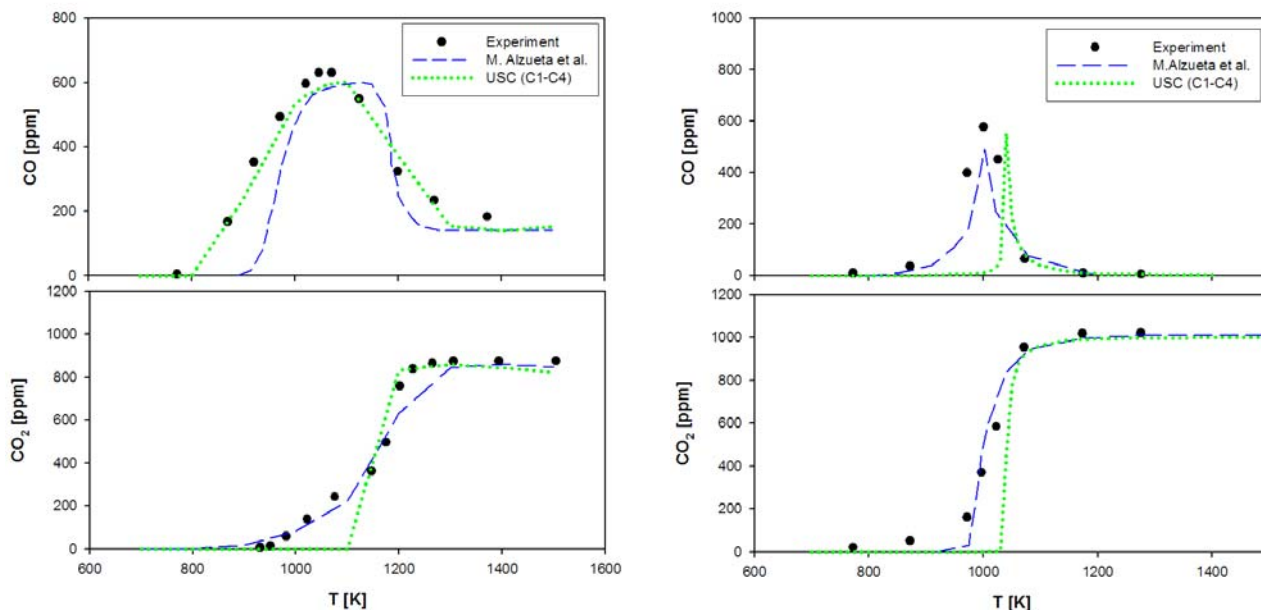


Figure 2: Temperature dependence of the experimentally measured (closed symbols) and calculated (lines) acetylene decay profiles at rich ($\lambda = 0.7$ - left) and much diluted conditions ($\lambda = 20$ - right).

The mechanism analysis of the Alzueta et al. kinetic scheme was previously reported in [1] and adopted from the original paper in the present work. Therefore, global reaction flow analysis and global sensitivity analyses with respect to the CO formation were carried out only for the USC mechanism. The RFA and the sensitivity analysis were performed at atmospheric pressure for two different $C_2H_2/O_2/N_2/H_2O$ mixtures – the much diluted ($\lambda = 20$) and the rich mixture ($\lambda = 0.7$). The choice is based on the facts that, the O_2 availability in these two mixtures considerably differs and again for the same mixtures both studied mechanisms showed the worst and the best agreement with the experiment. The initial temperature for examined mixtures was chosen to correspond to the temperature at which notable acetylene decay is observed. The global reaction paths of the acetylene oxidation (Figure 3) and the most sensitive reactions influencing the radical pool production under the examined conditions were studied. The arrow's thickness in Figure 3 denotes the path's importance.

The global sensitivity analysis showed that, by the reactor's outlet where the radical pool is significantly increased the most sensitive reactions for the much diluted mixture ($\lambda = 20$) of the USC mechanism were:



The results observed in this particular work were found to coincide with the investigations reported from the original authors [2] for shock tube experiments. Nevertheless, the mechanism could not quantitatively reproduce the experimentally measured

temperature dependence of the C_2H_2 decay and the CO and CO_2 profiles for the much diluted conditions.

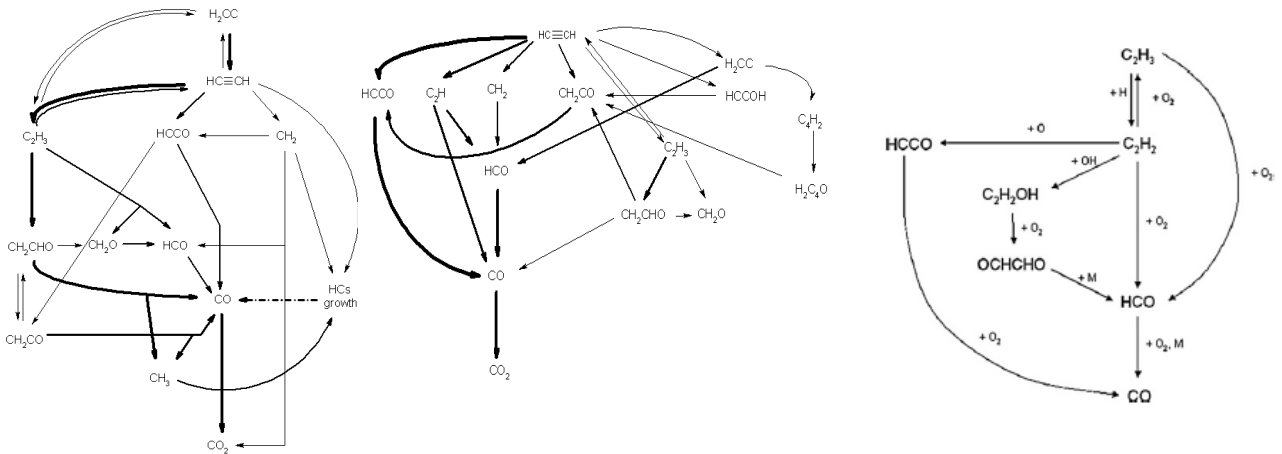


Figure 3: RFA diagram for the USC Mech - rich (left) at $T = 875K$, lean (middle) at $T=1030K$, and the Alzueta et al. (right) under different stoichiometric conditions (according to [1]) of the C_2H_2 oxidation mixture at atmospheric pressure.

The influence of the choice and the variety of the $H_2CC + O_2 = \dots$ reaction channels for the C_2H_2 conversion was also studied for this particular case (much diluted conditions $\lambda = 20$). For that purpose the reaction channels discussed in [6]:



were introduced in addition to the reaction:



As the rate and the branching ratio of the reaction (12) are unknown the rate coefficients were recalculated with respect to the number of added channels. The results confirmed previous conclusions [1,6] that the effect on the acetylene conversion is insignificantly low and the results are sensitive mostly to the global reaction rate.

The reactions with the highest sensitivity coefficient with respect to the CO formation according to the global sensitivity analysis performed for the rich mixture of the USC mechanism ($\lambda = 0.7$) were:



An additional analysis obtained at the reactor's inlet showed that the CO formation is very sensitive to the reaction of vinylidene oxidation (12) together with vinyl radical recombination reaction (13). These results confirmed the previously observed [6] major role of the vinyl recombination path for the acetylene oxidation in the rich conditions.

5. Conclusion

A considerable difference was found in the representation of the experimentally measured results for both investigated chemical kinetic schemes.

In the USC mechanism the C_2H_2 conversion shows a strong dependence on the T and the mixture stoichiometry at the studied conditions. The reaction pathways of acetylene oxidation in the USC mechanism considerably differ between rich and lean conditions. In the rich conditions the most favorable path was via the vinyl radical recombination whereas, in the much diluted conditions the C_2H_2 oxidation goes preferably through the vinylidene oxidation at the early stage of the process and via ketene oxidation at the reactor's outlet. Nevertheless, the mechanism failed reproducing quantitatively the experimentally measured temperature dependence of the C_2H_2 decay and the CO and CO_2 profiles for the much diluted mixture.

The Alzueta et al. model shows exactly the opposite tendencies with respect to the influence of the temperature and stoichiometry on the acetylene conversion. On the contrary to the USC Model, the Alzueta et al. model describes more precisely the properties measured in the much diluted mixture.

These results suggested the need of further investigation of the possible reaction channels delivering the radical pool in the acetylene oxidation. A deeper analysis of the key reactions and their reaction rates would help improving the mechanisms predictability.

Acknowledgement

The author acknowledges the COST Action CM0901 (EU) for the financial support under the Short Term Scientific Mission - „COST STSM Reference Number: COST-STSM-CM0901-7289”. A deep gratitude is expressed also to the host institution (Aragón Institute of Engineering Research (I3A), University of Zaragoza, Spain) in the face of Professor M. U. Alzueta for her exclusive support of this work. Sincere thanks to Dr. R. Quiceno, Shell Global Solutions, Chester, UK, and Dr. J. Marquetand, IWR Heidelberg University, Germany for their useful comments and fruitful discussions.

References

- [1] M. Alzueta, M. Borruely, A. Callejas, A Millera, R. Bilbao Combust. Flame 152, 377-386, 2008.
- [2] H.Wang, X. You, A.V. Joshi, S.G. Davis, A. Laskin, F. Egolfopoulos & C.K. Law, USC Mech Version II, published in http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm, May 2007
- [3] S.W. Benson, Int. J. Chem. Kinet. 28, 665-672, 1996.
- [4] C. Sheng, J.W. Bozzeli, Int. J. Chem. Kinet. 32, 623-641, 2000.
- [5] J.C. Ryu, H. Seo, J.G. Kang, K.H. Oh, Bull. Korean Chem. Soc. 18, 1071-1075, 1996.
- [6] A. Laskin, H.Wang, Chem. Phys. Lett. 303, 43-49, 1999.
- [7] J.A. Miller, R.E. Mitchell, M.D. Smooke, R.J. Kee, 19th Proc. Comb. Inst. 181, 1982.
- [8] Y. Hidaka, K. Hattori, T. Okuno, K. Inami, T. Abe and T. Koike. Combust. Flame 107, 401, 1996.
- [9] J.H. Kiefer and W.A. Von Drasek. Int. J. Chem. Kinet. 22, 747, 1990.
- [10] M.U. Alzueta, A. Tena, R. Bilbao, M. Finestra, Energy Fuel, 15, 724-729, 2001.
- [11] U. Maas, J. Warnatz. Proc. Comb. Inst. 22, 1695–1704, 1988.
- [12] Chemkin-Pro. Release 15082. Reaction Design: San Diego, 2009.
- [13] I. Naydenova, J. Marquetand, U. Riedel, C. Esarte, A. Millera, R. Bilbao, M.U. Alzueta, 2nd Annual COST Action CM0901 Meeting, 7-9 September 2011, I3A, Saragossa University, Spain.

Автор: Илияна Иванова Найденова, гл. асистент д-р, катедра „Енергетика и машиностроене“, Колеж по енергетика и електроника към Технически университет - София, E-mail address: inaydenova@tu-sofia.bg

Постъпила на 02.12.201

Рецензенти доц. д-р Христо Тодориев, доц. д-р Ивайло Ганев